

Möglichkeiten der Erfassung von unstetigen Deformationen in Raum und Zeit

Determination of Inconstant Deformations with Respect to Space and Time

Otto Heunecke

Die Bestimmung der Deformationen eines Objekts in Raum und Zeit ist der Inhalt ingenieurgeodätischer Überwachungen. Während die zeitverdichtete Erfassung mit automatisierten Messsystemen seit vielen Jahren Stand der Technik ist, wird die räumlich verdichtete Erfassung erst mit neueren Messverfahren in effizienter Form möglich. Diese Entwicklungen führen zu Konsequenzen in der Planung, der Art der Datengewinnung und den Möglichkeiten der Ergebniserzeugung bei Überwachungsaufgaben, die insbesondere auch dazu geeignet sind, Unstetigkeiten und Unregelmäßigkeiten besser erkennen zu können.

Schlüsselwörter: Geodätische Überwachungsmessungen, Objektdiskretisierung, unstetiges Deformationsverhalten, Abtastung in Zeit und Raum

The determination of deformations of an object with respect to space and time is the essential task of geodetic monitoring. While the condensed registration in time is state of the art for many years due to automated measuring methods, recently enabled by new measuring techniques also spatially condensed information clustering is efficiently possible. These developments lead to consequences in planning, the way of data acquisition and the possibilities of obtaining results at geodetic monitoring applications, which especially can be used to recognize inconstancies and irregularities in a better way.

Keywords: Geodetic monitoring, object discretization, irregular deformation behaviour, sampling in time and space

1 EINLEITUNG

Geodätische Überwachungsmessungen sollen i. d. R. nicht nur exemplarisch an wenigen, vereinzelt Messstellen, sondern möglichst vollständige Aussagen zu dem Verhalten eines Messobjekts liefern. Während mithilfe automatisierter Messverfahren eine zeitlich verdichtete Erfassung seit vielen Jahren Stand der Technik ist, gelingt es dank neuer Messtechniken nunmehr auch räumlich verdichtete Informationen hoher Qualität effizient zu gewinnen. Diese Entwicklungen, getrieben von neuen Sensortechnologien, der digitalen Kommunikation und dem ubiquitären Computing, führen zu durchgreifenden Änderungen in der Konzeption von Überwachungsmessungen, der Art und Weise der Datengewinnung und den Möglichkeiten zur Ableitung und Vorhaltung von Ergebnissen. Die Vollständigkeit der zu gewinnenden Information in Raum und Zeit ist das nachfolgend diskutierte Qualitätskriterium im Hinblick auf das Erkennen eines unregelmäßigen Verhaltens.

Ungeachtet dessen, dass die Registrierung von Messwerten bei automatisierten Messsystemen in einer vorzuziehenden Abtaststrategie Δt , d. h. diskret, erfolgt, wird von einer zeitkontinuierlichen Überwachung gesprochen, wenn eine möglichst lückenlose Erfassung der Objektveränderungen das Ziel ist /DIN 18710-4 2010/. Bei diskontinuierlichen und periodischen Überwachungen werden die Objektzustände lediglich zu wenigen ausgewählten Zeitpunkten dokumentiert und untereinander verglichen. Ein Monitoring, was sich als Überbegriff für alle Arten der unmittelbaren systematischen Erfassung von Prozessen und somit auch die von geometrischen Veränderungen bei technischen und natürlichen Objekten infolge wirkender Kräfte etabliert hat, unterstellt im Allg. eine zeitkontinuierliche Überwachung. Von Echtzeitsystemen ist dann zu sprechen, wenn die für eine Entscheidung relevanten Ergebnisse so zeitig vorliegen, dass eine adäquate Aktion eingeleitet werden kann.

Der Kontinuitätsbegriff ist darüber hinaus auch im Ortsbereich zu sehen, wenn ausgehend von den erfassten Punkten und damit einhergehend einer zunächst diskreten Beschreibung auf das Verhalten eines Messobjekts als Ganzes geschlossen werden muss. Die Ermittlung von Zielgrößen wie Verzerrungen, Biegungen und Verwindungen zur Beschreibung von Verformungen, siehe /DIN 18710-4 2010, Anhang E/, verlangt eine Betrachtung eines Objekts auf kontinuumsmechanischer Grundlage /Heunecke et al. 2013, Kap. 3/. Nicht erkannte und nicht berücksichtigte Unregelmäßigkeiten (ungleichmäßige Beschleunigungen, Sprünge etc.) und Unstetigkeiten (Risse, Brüche, Verwerfungslinien etc.) sowohl in der Zeit als auch im Raum, vor allem auch diesbezüglich unvollständige oder gar falsche Vorkenntnisse bei der Planung der Messungen, führen in der Konsequenz zu verfälschten Interpretationen der ermittelten Ergebnisse.

2 GEODÄTISCHE ÜBERWACHUNGSMESSUNGEN

Vermessungen zur Überwachung von technischen und natürlichen Objekten werden durchgeführt, um deren Bewegungen und Verformungen, subsummiert als Deformationen, zu erfassen. Sie bestehen in der Gesamtheit aller notwendigen Maßnahmen der Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation /DIN 18710-4 2010/. Geodätische Überwachungsmessungen werden angewendet in der Nutzungsphase eines Bauwerks oder einer Maschinenanlage, zur Kontrolle des Verhaltens von natürlichen Objekten mit Schadenspotenzial wie bei Rutschhängen, bei den ein Bauvorhaben begleitenden Beweissicherungsmessungen und bei (Belastungs)Versuchen (siehe /Heunecke et al. 2013, Kap. 1/). Ein Sonderfall liegt vor, wenn für das zu untersuchende Objekt als Ganzes oder in einzelnen Bereichen keine Veränderungen zu erwarten sind, was bspw. auf Fundamente und Widerlager zutrifft.

Der primäre Inhalt von geodätischen Überwachungsmessungen besteht in dem Nachweis eines gegenüber den erwarteten geometrischen Veränderungen abweichenden Verhaltens bzw. in der Bestätigung eines erwarteten Verhaltens. Das frühzeitige Erkennen von unerwarteten Bewegungen und Verformungen dient vor allem der Instandhaltung und der Bestandssicherung. Erwartete Verformungen können zumindest näherungsweise mittels numerischer Modelle, insb. mit der Methode der finiten Elemente, bei als bekannt angenommenen konstitutiven Beziehungen einschließlich der unterstellten Lagerungsbedingungen in definierten Belastungssituationen berechnet werden.

Unabhängig von der Vielschichtigkeit der Aufgabenstellungen liegt einer (ingenieur) geodätischen Modellbildung zugrunde, ein zu überwachendes Objekt durch eine genügende Anzahl repräsentativer Punkte zu beschreiben, deren Veränderungen zueinander und möglichst auch in Bezug auf einen äußeren Referenzrahmen („Georeferenzierung“) durch Messungen über der Zeit erfasst werden. Die angenommenen Lagerungsbedingungen sind durch Mess-

punkte an den Fundamenten und Widerlagern anhand der Messungen ebenso zu verifizieren wie die erwarteten Verformungen durch die weiteren Messpunkte im Objektraum. Die Bau- und Geomesstechnik prägt hierfür den Begriff „Beobachtungsmethode“ (vgl. /Heunecke et al. 2013, Kap. 1/).

Damit stellt sich bei einer Überwachung die bisher allein auf wohldefinierte Messpunkte ausgerichtete Diskretisierungsaufgabe, siehe Abb. 1. Während das Objekt selbst als Kontinuum gesehen werden darf, ggf. noch zu unterteilen in bei der Planung als solche bekannte Teilbereiche, was sich infolge innerer und äußerer Beanspruchungen mehr oder weniger in ständiger Veränderung befindet, ist für eine modellhafte Beschreibung eine Abstrahierung in Raum und Zeit erforderlich. Werden dabei auch die einwirkenden Kräfte berücksichtigt, um das kausale Verhalten von Ursache und Wirkung analysieren zu können, spricht man von der modellhaften Beschreibung als einem dynamischen System /Heunecke et al. 2013, Kap. 3/.

Komplexität und Detailierungsgrad der realen Verhältnisse bestimmten Aufwand und Schwierigkeitsgrad bei der Modellierung, aber auch die Aussagekraft von Ergebnissen: Je wirklichkeitsnäher und damit im Allg. aufwendiger ein Modell, desto höherwertiger die Aussagekraft. Von gewissen Vorkenntnissen, wo repräsentative Messpunkte anzulegen sind und zu welchen Zeitpunkten welche Messgrößen bestimmt werden sollen, ist basierend auf dem zunächst rein theoretisch begründeten Modell auszugehen. Ist auch das kausale Verhalten zu untersuchen, sind die einwirkenden Kräfte bzw. die ihnen zugrunde liegenden originären Wirkgrößen, z. B. Umgebungstemperaturen, in ebenso repräsentativer Art und Weise parallel zu erfassen. Sind aber die erforderlichen Vorkenntnisse nur rudimentär oder gar falsch, weil die theoretische Modellvorstellung unvollständig ist, kann eine Überwachung im Resultat nicht die gewünschten Aussagen liefern. Zumindest besteht eine Gefahr, dass sich in solchen Situationen die Modellierung und auch die Messungen als so nicht sinnvoll und zielführend herausstellen – ggf. sogar, ohne einen solchen Mangel anhand der Messergebnisse zu erkennen.

Die Abb. 2a zeigt schematisch eine linear interpolierte Bewegung aus der Bestimmung eines Punkts P_1 zu drei Zeitpunkten und den tatsächlichen Verlauf. Handelt es sich bei der tatsächlichen Bewegung um ein periodisches Phänomen der Frequenz ν_N , ist die Abtastrate Δt so zu planen, dass mehr als zwei Messungen in einer Periode $P_N = \nu_N^{-1}$ vorliegen. Andernfalls kann aus den diskreten Werten die Periode nicht eindeutig rekonstruiert werden /Heunecke et al. 2013, Kap. 9/, was z. B. bei der Ermittlung von Eigenschwin-

	Objekt	Modell
Geo-metrie-bereich („Raum“)	Das Objekt stellt ein Kontinuum dar, ggf. zu separieren in unterschiedliche Teilbereiche.	Das Objekt wird über eine gewisse Anzahl charakteristischer Messpunkte beschrieben ⇒ Diskretisierung im Raum.
Zeit-bereich	Das Objekt befindet sich mehr oder weniger in ständiger Veränderung.	Das Objekt wird in gewissen Zeitabständen wiederkehrend beobachtet ⇒ Diskretisierung in der Zeit.

Abb. 1 | Diskretisierung im Geometrie- und Zeitbereich (vgl. /Heunecke et al. 2013, Kap. 1/)

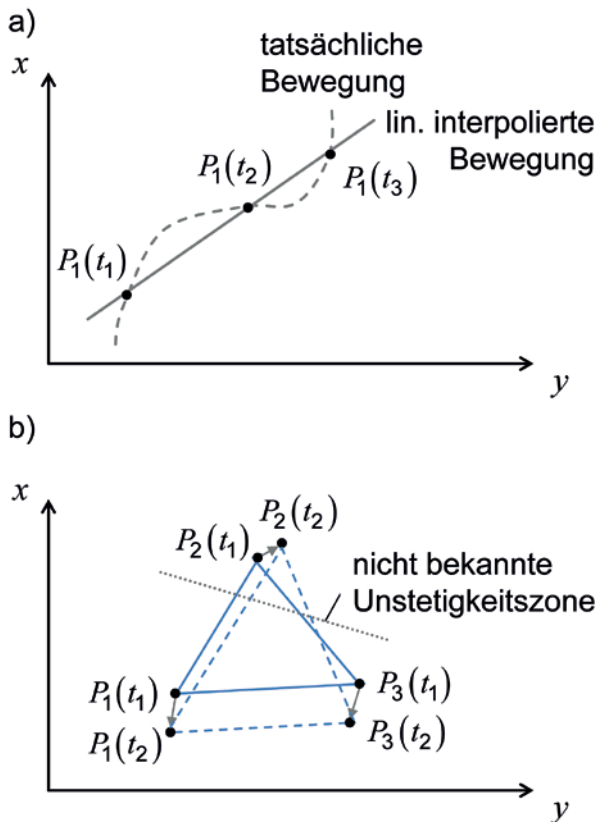


Abb. 2 | Fehlinterpretationen einer Bewegung aus zeitdiskreten Messungen (a) und eines Verformungszustands im Dreieck $P_1 P_2 P_3$ durch eine nicht bekannte Unstetigkeitszone (b)

gungen zu beachten ist. Darüber hinaus bestimmt sich die Wahl der Abtastrate durch die Zeit, die zur Reaktion auf ein irreguläres Ereignis als erforderlich angesehen wird. Will man, z. B. aus Gründen einer Frühwarnung, umgehend wissen, ob eine Veränderung stattgefunden hat, ist Δt entsprechend klein anzusetzen.

In Abb. 2b ist schematisch dargestellt, wie der Verformungszustand eines Dreiecks in der x, y -Ebene falsch interpretiert wird, wenn die Homogenität des finiten Elements $P_1 P_2 P_3$ durch eine im theoretischen Modell nicht bekannte und auch anhand der Messungen nicht erkannte Unstetigkeitszone gestört ist. In diesem Fall kann aus den Verschiebungen der Eckpunkte nicht auf die repräsentativen Verzerrungen im Element geschlossen werden. Wird nämlich mithilfe der Verzerrungs-Verschiebungsbeziehung aus der (linearen) Kontinuumsmechanik (vgl. /Heunecke et al. 2013, Kap. 3 und 7/)

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \Delta y_{23} & 0 & \Delta y_{31} & 0 & \Delta y_{12} & 0 \\ 0 & \Delta x_{32} & 0 & \Delta x_{13} & 0 & \Delta x_{21} \\ \Delta x_{32} & \Delta y_{23} & \Delta x_{13} & \Delta y_{31} & \Delta x_{21} & \Delta y_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dy_1 \\ dx_2 \\ dy_2 \\ dx_3 \\ dy_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

der Verzerrungszustand des Dreiecks berechnet, ist die Homogenität des betrachteten Gebiets eine der zu unterstellenden Voraussetzungen. Andernfalls sind die ermittelten Verzerrungsgrößen, die Dehnungen bzw. Stauchungen ε_x und ε_y in Koordinatenrichtung und

der Scherwinkel γ_{xy} , zwar formal, nicht aber korrekt zu bilden. In (1) ist A die Fläche des durch die Punkte P_1 , P_2 und P_3 gebildeten Dreiecks, Δx_{ij} und Δy_{ij} sind die Koordinatendifferenzen zwischen den Punkten P_i und P_j und mit dx_i , dy_i , sind die Koordinatenänderungen des Punktes P_i , $i=1,2,3$ gegenüber dem Ausgangszustand zum Zeitpunkt t_1 bezeichnet. Aus den Verzerrungsgrößen ε im x, y -Koordinatensystem ist die Hauptverzerrungsellipse ε^H mit

$$\varepsilon_1^H = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right), \quad (2)$$

$$\varepsilon_2^H = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_x + \varepsilon_y - \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right), \quad (3)$$

$$\Theta = \arctan \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \quad (4)$$

zu ermitteln, die zeichnerisch üblicherweise im Schwerpunkt des Dreiecks dargestellt wird (siehe Abb. 3). Das Vorzeichen der Hauptwerte (2) und (3), d. h. die Kennzeichnung von Dehnung oder Stauchung, wird durch die Pfeilspitzen zum Ausdruck gebracht; ihre Einheit ist in ppm anzugeben.

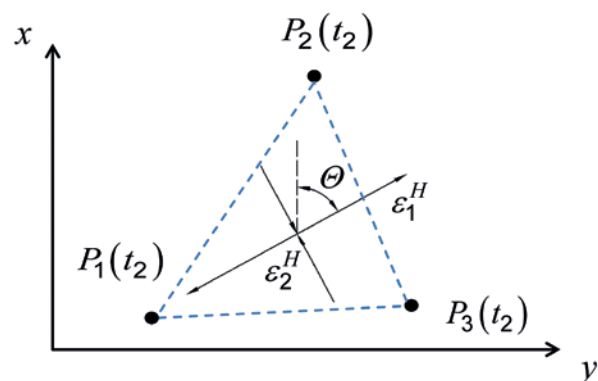


Abb. 3 | Zweidimensionaler Hauptverzerrungszustand ε^H ; schematische Darstellung (vgl. /DIN 18710-4 2010, Bild E.2/ und /Heunecke et al. 2013, Abb. 7.5/)

3 GEOSENSORNETZE

Ureigenes geodätisches Mittel zur Beobachtung eines Objekts ist die Anlage und Auswertung eines Überwachungsnetzes mit dem Ziel, aus wiederholten Messungen auf Verschiebungen der wohl definierten und repräsentativ angelegten Netzknoten zu schließen. Die Abstrahierung des Objekts ist durch die Anlage eines solchen Netzes und die Messzeitpunkte („Epochen“) unmittelbar vorgegeben, wobei sich die Koordinaten in den i. d. R. überbestimmten Konfigurationen erst aus der Auswertung originärer Messungen und Zusatzinformationen, etwa dem Anbringen von Kalibrierparametern, über funktionale Beziehungen ergeben. Dual hierzu ist ein stochastisches Modell mitzuführen, um zu Genauigkeitsaussagen für die Ergebnisse zu kommen und statistische Nachweise zu führen. Ergänzend, weil bestimmte Messgrößen sonst nicht erfasst werden

können, sind bei den meisten Überwachungsprojekten von je her lokale Messeinrichtungen vorgesehen, die häufig nur auf die Registrierung von relativen Geometrieänderungen ausgerichtet sind, z. B. Verdrehungen und Dehnungen.

Ein Nutzen von Redundanzen (identisch bestimmten Messgrößen, insb. auch zur Plausibilitätsprüfung) und Komplementaritäten (unterschiedlichen, sich in ihrer Aussagekraft ergänzenden Messgrößen) ist praktizierter Stand der Technik. Ausgehend von den erfassten Veränderungen an wenigen Punkten zu wenigen Zeitpunkten des Objekts stellt sich das Generalisierungsproblem, wenn der Rückschluss auf das Verhalten als Kontinuum zu leisten ist (siehe Abb. 1). Nicht vorab bekannte und auch nicht anhand der Ergebnisse identifizierte Unstetigkeitsstellen im Raum und Unregelmäßigkeiten in der Zeit führen zwangsläufig zu Fehlinterpretationen bei derartigen Rückschlüssen.

War es zunächst nur gegeben, solche Netze händisch zu vermessen (während die lokalen Messeinrichtungen bereits seit spätestens den 1970er-Jahren automatisiert betrieben werden konnten), wurde es mit dem Aufkommen von Robot-Tachymetern (in den 1980er-Jahren) und ständig mit GNSS-Empfängern besetzten Stationen (in den 1990er-Jahren) möglich, Permanentnetze einzurichten. Für die einzelnen Punkte des geodätischen Netzes entstehen dabei verdichtet über der Zeit Messreihen, die mithilfe der Methoden der Zeitreihenanalyse untersucht werden können. Derartige permanent betriebene Überwachungsnetze erlauben rein beschreibend eine verbesserte Betrachtung von Deformationen im Zeitbereich, mit der verbleibenden Einschränkung auf i. d. R. nur wenige ausgewählte Objektpunkte. GNSS-Permanentnetze dienen z. B. der Überwachung tektonisch aktiver Gebiete (z. B. /Gülal 2013/). Hierbei stellen sich Erdbeben zumeist als Sprünge in den registrierten Messreihen dar.

Am Markt verfügbare geodätische Monitoringsysteme, die in der Anwendung solche Permanentnetze darstellen, erlauben neben Tachymetern und GNSS-Empfängern das Ansteuern weiterer Sensoren, z. B. Neigungsgeber, und bieten standardmäßige Möglichkeiten zur Auswertung der aufgezeichneten Messreihen /Stempfhuber 2010/. Kennzeichnend ist, dass größtenteils auch als eigenständige Instrumente zu verwendende Einheiten mittels einer digitalen, i. d. R. seriellen Schnittstelle mit einem Steuerrechner verbunden werden, bei geotechnischen Sensoren, z. B. Extensometern, im Allg. unter Zwischenschaltung einer Loggingeinheit. Der Datenfluss von den Instrumenten bzw. Sensoren zu einem zentralen Rechner vor Ort erfolgt unter Nutzung gängiger Möglichkeiten der drahtgebundenen und drahtlosen Kommunikation, die Weiterleitung zu abgesetzten Rechnern für einen Fernzugriff auf das Monitoringssystem zumeist über das Internet oder Mobilfunk (/Pink 2007/ und /Lienhart & Merk 2010/). Erfolgt dies auf geplanten Pfaden, kann bezüglich der Kommunikation von einem infrastrukturellen Netz gesprochen werden.

In einer weiter gefassten Sicht entsteht, wenn man die verwendeten Einheiten zur Datenerfassung als Sensorknoten betrachtet,

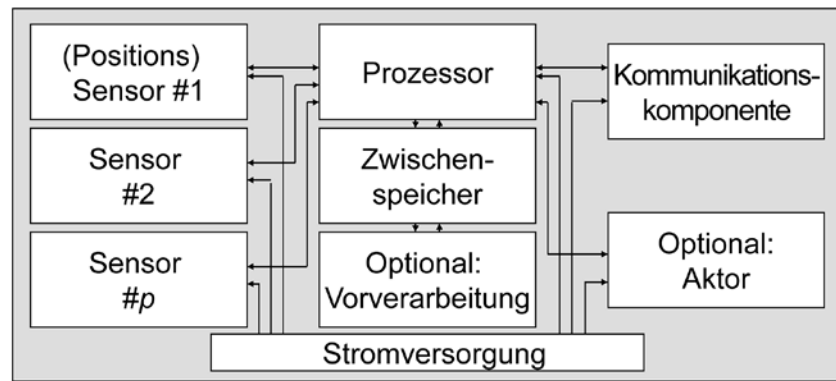


Abb. 4 | Schematischer Aufbau eines Sensorknotens /Heunecke 2012b/

ein Sensornetz. Ein Sensornetz besteht grundlegend aus den folgenden Komponenten /Heunecke 2012b/:

- Menge von automatisiert arbeitenden Sensoren, die zu Sensorknoten fusioniert im Raum verteilt sind;
- verbindendes Kommunikationsnetzwerk (nicht notwendigerweise immer nur drahtlos, obwohl es die englische Bezeichnung Wireless Sensor Network – WSN – nahelegt);
- zentrale Station der Datenzusammenführung und -aufbereitung vor Ort, auch als Datensinke bezeichnet, sowie abgesetzte Rechner für einen Fernzugriff; geeignete Softwareprogramme für die weiterführende Auswertung und ggf. einzuleitende Reaktionen, z. B. Alarmgebung.

Um zu einem vollständigen, aktuellen Gesamtbild zu kommen, müssen die Daten von den Sensorknoten permanent (in Zeitabständen Δt) und/oder ereignisgesteuert zusammengeführt werden. Die Zuordnung der Messinformation verlangt eine eindeutige Adressierbarkeit im Netz, einen Zeitstempel der Messungen und einen bekannten Ort der jeweiligen Sensorknoten, sodass mindestens einer der integrierten Sensoren eines multifunktionellen Knotens ($p > 1$) auf die Bestimmung der Position ausgerichtet sein muss, sofern der unveränderte Einbauort nicht anderweitig separat bestimmt wird. Weitere Sensoren sind häufig auf die Erfassung von Umweltbedingungen ausgelegt, etwa Temperaturen, Feuchtigkeiten etc. Ein solcher Knoten für sich, siehe Abb. 4, ist folglich ein Multisensorsystem.

Eigenschaften wie miniaturisierte Bauweise und geringe Stückkosten der Sensorknoten werden oft als kennzeichnend aufgeführt. Um einen Sensorknoten autark zu halten, ist auf die Gewährleistung einer ausreichend dimensionierten Energieversorgung zu achten. Alle Abläufe auf einem Sensorknoten werden über einen integrierten Prozessor organisiert. Ein Datenzwischenspeicher ist dann erforderlich, wenn die Messinformation nicht ständig weitergeleitet werden kann oder soll. Ein optional integrierter Aktor kann eine bestimmte Reaktion ausführen, z. B. das Öffnen eines Schiebers.

Der Begriff eines „Netzes“ bei einem WSN steht für die kommunikative Vernetzung, bei der aus Sicht der Informatik die Kommunikationswege Kanten darstellen und ihre Schnittpunkte (Sensor) Knoten bilden. Ad-hoc besagt, dass sich die kommunikative Vernetzung (z. B. mittels WLAN) nach Aktivieren der Sensorknoten eigenständig konfiguriert. Erfolgt dies auf sich selbst suchenden

Pfaden, bei dem die Sensorknoten auch eine Routing-Funktion übernehmen können bzw. müssen, spricht man von einem Multi-hop-Ansatz. Ein Vorteil der dynamischen Routenwahl ist die verbesserte Verfügbarkeit, wenn bei Ausfall eines als Relaisstation fungierenden Knotens die weiterzuleitenden Daten auf alternativen Pfaden an die Zentrale gesendet werden. Zu beachten ist allerdings, dass Reichweiten und Datendurchsatz nicht überschritten werden.

Der Anwendungsbereich von Sensornetzen ist überaus weit zu sehen. Wenn durch ein kooperatives Zusammenspiel geeigneter Sensorik beabsichtigt ist, bestimmte geographische Bereiche hinsichtlich der erfassten Parameter bzw. daraus abgeleiteter Informationen bewerten zu können, spricht man bei fließendem Übergang von Geosensornetzen – GSN/Bill 2011/. Bei einem Geosensornetz kommen die räumlichen Beziehungen der Knoten untereinander im Sinne eines geodätischen Netzes hinzu. GSN haben, wenn auch bisher nur an wenigen Stellen explizit so benannt, beim ingenieurgeodätischen Monitoring bereits Fuß gefasst. Mithilfe von GSN wird es möglich, die allgegenwärtige Diskretisierungsaufgabe in Raum und Zeit entsprechend der Abb. 1 effizient zu gestalten und räumlich verdichtete Informationen zum Objektverhalten durch Erhöhung der Anzahl der Messpunkte zu gewinnen. Mit einem mehr an Messstellen und einer ständigen Messbereitschaft der Sensorknoten reduzieren sich erforderliche Vorkenntnisse über das Objekt und sein Verhalten. Ein Erkennen von Verhaltensanomalien auch in a priori nicht erwarteten Bereichen wird leichter möglich. Es verbleibt, die sensitiven Größen (Verschiebungen, Verdrehungen, Dehnungen, ...) einer Überwachungsaufgabe auszuwählen und die Sensorknoten darauf auszulegen.

Bei entsprechender Dichte des Sensornetzes kann von einer lückenlosen und, vergleiche das Verständnis von zeitkontinuierlich in der DIN 18710-4, somit quasi raumkontinuierlichen Erfassung gesprochen werden. Man bleibt aber bei einer punktwisen Erfassung wie in geodätischen Netzen üblich. Mit Blick auf eine größere Anzahl von Sensorknoten stellt sich zwangsläufig die Frage nach kostengünstigen Sensorkomponenten. /Glabsch et al. 2010/ zeigen bspw. auf, wie einfache, für den Massenmarkt entwickelte Navigationsempfänger auch für Überwachungsmessungen genutzt werden können und Punktbestimmungen im Bereich einiger Millimeter ermöglichen. Die Effizienz ergibt sich letztlich im Wesentlichen aus derartigen kostengünstigen Sensorknoten und einer leichten Inbetriebnahme in wartungsarmen Ad-hoc-Netzen.

4 SCANNENDE MESSVERFAHREN

Scannende Messverfahren erfassen über Richtungs- und Streckenmessungen berührungslos eine Objektoberfläche in einem unregelmäßigen Raster von sehr vielen, bei Wiederholung aber nicht reproduzierbaren Einzelpunkten. Vor allem gilt Letzteres dann, wenn zwischenzeitlich Objektveränderungen stattgefunden haben. Originäres Ergebnis einer Scanaufnahme ist eine unstrukturierte Punktwolke, die bei Einschränkung einer Erfassungsrichtung auch als Profil vorliegen kann. Messverfahren wie das terrestrische Laser-scanning (TLS) können zur Extraktion von Oberflächengeometrien, d. h. zur Zustandsbeschreibung, und deren Veränderungen eingesetzt werden. Andere scannende Verfahren wie das Ground Based

Synthetic Aperture Radar, siehe z. B. /Rödelsperger 2011/, sind nachfolgend nicht betrachtet.

Die Größe eines TLS-Laserspots, der Footprint, liegt im Bereich 5-10 mm bei einem Objektstand bis etwa 50 m, die Genauigkeit einer 3D-Position eines statischen Scans beträgt ca. $\sigma = 5$ mm für den jeweiligen Einzelpunkt. Bringt man Signalisierungen am Objekt an, z. B. Zielkugeln, und beschränkt sich bei der Auswertung auf diese ausgewählten und markierten Punkte, bleibt es bei einer punktdiskreten Beschreibung des Objektverhaltens. Die Nutzung der dichten, rasterförmigen Abtastung ohne Reproduzierbarkeit der einzelnen Punkte erfordert ein Umdenken zu einer flächenorientierten Beschreibung der Deformationsvorgänge. Für die Auswertung sind im Speziellen ein Clustering und die Modellierung geometrischer Elemente zur lokalen Oberflächenapproximation erforderlich.

An dieser Stelle sei davon abgesehen, dass Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit, z. B. durch Nässe, und Ausrichtung des Objekts zum Scanner zwischenzeitlich erfolgen können, was ggf. zu berücksichtigen ist und prinzipiell genauigkeitseinschränkend wirkt. Der Ansatz versagt, wo infolge der Oberflächenrauheit eine geeignete Approximation nicht möglich ist, z. B. bei Felsformationen. Nachfolgend ist unterstellt, dass die Erfassung des interessierenden Oberflächenbereichs mit einem Standpunkt gegeben ist und ein Zusammenführen mehrerer Scans, die sog. Registrierung, dann nicht behandelt werden muss.

Das Clustering bedeutet eine Einteilung benachbarter Punkte in Klassen a priori definierter Ausdehnung. In einfacher Form gelingt dies, wenn das Mess- dem Objektkoordinatensystem unmittelbar ohne Berücksichtigung von Rotationen zugeordnet werden kann. Dann genügt im einfachsten Fall bereits eine arithmetische Mittelbildung der Punkte eines Clusters in der interessierenden Koordinatenkomponente, im Hinblick auf das Vorliegen von Ausreißern zweckmäßigerweise auch als Median zu bilden. Die Beschreibung des Deformationsvorgangs erfolgt auf der Basis der hergeleiteten Klassenmittelpunkte. Man löst sich von der bisherigen punktdiskreten Betrachtung hin zu einem flächenelementorientierten Verfahren /Neuner & Heunecke 2012/.

Durch das Vorgehen geht eine beträchtliche Reduktion des TLS-Rauschniveaus einher, wodurch die Sensitivität zur Aufdeckung von Veränderungen der Oberflächenausschnitte in optimalen Konfigurationen bis in den Submillimeterbereich gesteigert werden kann /Han et al. 2010/. Für die Zeit, die zu der Erfassung einer 3D-Szene erforderlich ist, muss unterstellt werden, dass die Objektveränderungen während des Scanvorgangs vernachlässigbar klein sind. Im Profilmodus mit mehreren Profilen pro Sekunde können auch Objekte hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens untersucht werden, etwa Windräder oder Brücken /Vennegerts et al. 2010/. Durch wiederholte Erfassung der Profile bei unverändertem Instrumentenaufbau, wobei Abtastungen mit bis zu 50 Profilen/s und je ca. 10.000 Punkten möglich sind, entstehen daraus abgeleitete Amplitudenspektren für die jeweiligen Klassenmittelpunkte, die in ihrer Gesamtschau das Verformungsverhalten des Objekts, insb. die Eigenform(en) und sein Dämpfungsverhalten, widerspiegeln.

Das Clustering bestimmt die räumliche Filterung der Ergebnisse. Größere Cluster (Ausdehnung im m- bis dm-Bereich) führen bei stärkerer Glättung auf eine bessere Genauigkeit, kleinere Cluster

(im cm-Bereich) erlauben eine differenzierte Betrachtung verschiedener Objektbereiche. Ein zielgerichtetes Zusammenspiel der zeitlichen und der geometrischen Diskretisierung ist anwendungsbezogen zu konzipieren. Wenngleich flächenelementorientiert, erfolgt die Beschreibung letztendlich durch das Verhalten eines für das Cluster repräsentativen, nicht aber als solchen existenten Punkts. Der Begriff der Abtastung ist nicht nur im ursprünglichen Verständnis einer Messfrequenz, sondern auch als ein räumliches, für das Objektverhalten repräsentatives Kriterium zu sehen /Heunecke et al. 2013, Kap. 16.2/.

5 OBJEKTINTEGRIERTE MESSUNGEN

Für den „Blick in das Innere“ ist es bei Überwachungsmessungen üblich, Sensoren im Innern von Objekten zu platzieren. Eingebettete, insb. bei der Herstellung von Massivbauwerken unmittelbar verbaute Sensoren, bspw. zur Erfassung von Dehnungen und Temperaturen, kennt man in der Baumesstechnik seit mehr als 75 Jahren, zunächst vornehmlich nach dem Schwingsaitenprinzip konstruiert. Bohrlochextensometer und Inklinometer sind etablierte Verfahren der Geomesstechnik, wobei Mehrfach-Bohrlochextensometer, siehe Abb. 5, im Kern darauf ausgelegt sind, etwaige Unstetigkeitszonen im Untergrund identifizieren zu können. In ähnlicher Weise dienen Inklinometer und die mit ihnen erfassten Biegelinien im Speziellen dazu, Scherzonen im Messprofil erkennen zu können.

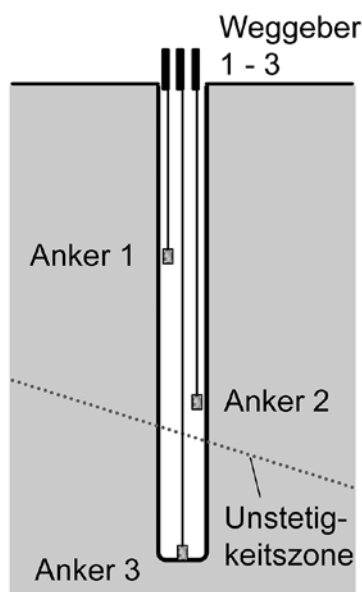


Abb. 5 | Dreifach-Bohrlochextensometer

In den letzten Jahren haben faseroptische Sensoren erhebliche Bedeutung erlangt und werden bei Überwachungen eingesetzt, um primär in Form von Dehnungen auftretende geometrische Änderungen zu erfassen /Brunner 2009/. Die Verschiebungen ΔL , aus denen mit Bezug zu einer Basis die Dehnungen ε resultieren, werden in Richtung der verlegten Faser bestimmt. Dabei ist es von Vorteil, wenn an mehreren Messstellen in einer Faser Dehnungsinformationen gewonnen werden können, insb. in inhomogenen

Materialien. Durch eine Zusammensetzung mehrerer Fasern, z. B. zu Strain-Rosetten /Woschitz 2010/ oder Einbau in textilen Strukturen /Kuhne et al. 2010/ ist es möglich, diese Größen auch in mehreren Richtungen bzw. sogar flächenhaft zu registrieren. Aus drei in einem bekannten Winkel zueinander bestimmten Dehnungen ε_i kann auf eine wie in Abb. 3 dargestellte Hauptverzerrungsellipse ε^H geschlossen werden.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Dank dem heutigen Stand der beschriebenen Messtechniken und ihrer kombinierten Nutzung können Überwachungsaufgaben bearbeitet werden, die bis vor Kurzem nicht möglich waren. Die Ansätze der Fusion redundanter mit komplementären Messgrößen, d. h. solche Ansätze, die „heterogene Sensorik vernetzen, um je nach Aufgabe und Instrumentierung gezielt beobachten zu können“ /Kutterer 2011, S. 102/, sind nicht grundsätzlich neu. Allerdings ist dies heute auf einen zuvor nicht gekannten technischen Niveau möglich, sowohl was die zeitliche als auch räumliche Komponente einer Erfassung betrifft. Mittels GSN ist eine im Raum dicht verteilte Sensorik zu schaffen, scannende Messverfahren sind – so lange freie Sicht auf den Objektbereich gegeben ist – per se ausgelegt, in einem dichten Raster eine Objektoberfläche zu erfassen, und die objektintegrierte Sensorik liefert Aussagen über innere Zusammenhänge.

Die zuvor skizzierten Messverfahren unterscheiden sich in ihrer Dimensionalität, räumlichen sowie zeitlichen Auflösung, Sensitivität und Qualität – und auch in den Kosten, die zu ihrer Nutzung aufzubringen sind. Zudem ist TLS zumindest bisher nicht für Dauerüberwachungen ausgelegt. Neben der auf Messungen beruhenden und damit datengetriebenen (empirischen) Beschreibung von Deformationsvorgängen, sind modellbasierte (theoretische) Analysen üblich. Derartige Modelle beziehen die Kausalkette von Ursache und Wirkung ein, erlauben auch dort Aussagen zu Deformationen, wo nicht gemessen werden kann, und bieten eine Möglichkeit zur Prognose. Extrapolierte Aussagen erfolgen hierbei in stetiger Fortschreibung eines Prozesses ohne Berücksichtigung von Unregelmäßigkeiten und Unstetigkeiten. Als Ultima Ratio aller Auswertungen ist die Gegenüberstellung von erwarteter Systemreaktion mit den in-situ Messungen zu sehen – und letztlich auch die Identifikation von Prozessparametern aus dem Abgleich (z. B. /Lienhart 2007/), sofern das Modell zuvor nicht im Sinne eines Regelkreises um neu erkannte Effekte, z. B. Risszonen, zu ergänzen ist.

Die kombinierte Nutzung der vorstehend beschriebenen Mess- und Auswertverfahren, d. h. nicht nur eine Daten-, sondern auch eine Methodenfusion, begründet letztlich ein modernes, erweitertes Verständnis eines geodätischen Überwachungsnetzes. „Netze“ bzw. die Vernetzungen verteilter Sensorik stabilisieren die Parameterschätzung und gestatten sowohl ein Erkennen wie auch Eliminieren von unerwünschten systematischen Effekten als auch das Einführen zusätzlicher, nicht unmittelbar beobachtbarer Größen (vgl. /Heunecke et al. 2013, Kap. 16.3/). Dies erweiterte Verständnis inkorporiert die gängigen Kommunikationstechniken sowie das omnipräsente Computing. Statt wie bisher mit z. B. Tachymetern und GNSS-Empfängern zu beobachten, sind neue Instrumente, Sensoren und Verfahren hinzugekommen, die funktional unter

Einbeziehung ihrer stochastischen Eigenschaften miteinander zu verknüpfen sind, um vollständige Messergebnisse zu erzeugen. Dies kann bei der Untersuchung von Setzungs- und Senkungserscheinungen u. U. auch auf Messungen durch Fernerkundungssatelliten wie TerraSAR-X erweitert werden, wobei es zu einer Kombination von flächenhaft-differenziellen und punktwise-absoluten Aussagen zum Objektverhalten kommt. Ein Messergebnis gilt in der Metrologie nur dann als vollständig, wenn es zusammen mit Angaben zu erreichten Messunsicherheit ausgewiesen wird (vgl. /DIN 1319-1 1995/). Die Methode der kleinsten Quadrate („Gauß-Verfahren“) und ihre robusten Alternativen bieten hierzu die grundlegenden, jedoch noch weiterzuentwickelnden Werkzeuge.

Ein wesentlicher Mehrwert verdichteter Messungen liegt schließlich darin, die Abhängigkeit der Ergebnisse vom bei der Planung einer Überwachung vorhandenen Ausgangswissen zu reduzieren und somit die Aussagekraft zu steigern: Unregelmäßigkeiten und Unstetigkeitsstellen in Raum und Zeit können durch empirischen Befund leichter und besser erkannt werden. Ohne aber einen hohen Grad an Automatisierung wird man die hierbei anfallenden Datenmengen nicht handhaben können.

LITERATUR

- Bill, R. (2011):** Geosensornetzwerke als Komponente im Geomonitoring. In: Busch, W.; Niemeier, W.; Sörgel, U. (Hrsg.): GeoMonitoring Tagung 2011 – Ein Paradigmenwechsel zur Beherrschung von Georisiken. TU Clausthal, 115–127.
- Brunner, F. (2009):** Faseroptische Sensorik: Ein Thema für die Ingenieurgeodäsie? In: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformation, 97, 335–342.
- DIN 1319-1 (1995):** Grundlagen der Messtechnik, Grundbegriffe. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18710-4 (2010):** Ingenieurvermessung – Teil 4: Überwachung. Beuth-Verlag, Berlin.
- Glabsch, J.; Heunecke, O.; Pink, S.; Schuhbäck, S. (2010):** Nutzung von Low-Cost GNSS Empfängern für ingenieurgeodätische Überwachungsaufgaben. Wißner-Verlag, Augsburg. In: GNSS 2010 – Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert. DVW-Schriftenreihe, 63, 113–129.
- Gülal, E. et al. (2013):** Tectonic activity inferred from velocity field of GNSS measurements in southwest of Turkey. In: Acta Geodaetica et Geophysica, 48, 109–121.
- Han, D.; Heunecke, O.; Keuser, M.; Liebl, W.; Neumann, I.; Nichelmann, K. (2010):** Anwendung des TLS zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens von Flächentragwerken aus Stahlbeton. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2010 – Beiträge zum 16. Int. Ingenieurvermessungskurs, München. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 57–65.
- Heunecke, O. (2012a):** Raum- und zeitkontinuierliche Ansätze zur messtechnischen Erfassung von Deformationsprozessen. In: Festschrift Kurt Brunner, Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie, 87, 95–107.
- Heunecke, O. (2012b):** Anwendungen von Geosensornetzen in der Ingenieurgeodäsie, Wißner-Verlag, Augsburg. In: Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2012. DVW-Schriftenreihe, 68, 171–186.
- Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013):** Handbuch Ingenieurgeodäsie. Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Auflage. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- Kuhne, M.; Schaller, M.-B.; Käseberg, S.; Thiele, E. (2010):** Sticktechnische Integration optischer Faser-Bragg-Gitter-Messsensoren auf Trägergewebe zur Applikation an Tragwerken im Bauwesen. In: Fortbildungsseminar „Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen“, Weimar. DVW-Schriftenreihe, 62, 283–296.
- Kutterer, H. (2011):** Kombinierte Modellierung und Analyse heterogener geodätischer Daten. In: Busch, W.; Niemeier, W.; Sörgel, U. (Hrsg.): GeoMonitoring Tagung 2011 – Ein Paradigmenwechsel zur Beherrschung von Georisiken. TU Clausthal, 101–114.
- Lienhart, W. (2007):** Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Dissertation, TU Graz. Shaker Verlag, Aachen.
- Lienhart, W.; Merk, G. (2010):** Vom Feld ins Internet – ein Beispiel zur Nutzung internetfähiger Mobilkommunikation bei der Messwerterfassung und Visualisierung von Deformationsmessungen. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2010 – Beiträge zum 16. Int. Ingenieurvermessungskurs, München. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 183–196.
- Neuner, H.; Heunecke, O. (2012):** Geodätische Überwachung von Bauwerken. In: Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012, Schwerpunkt: Gebäudediagnostik. Verlag Ernst & Sohn, Beitrag D7; 655–694.
- Pink, S. (2007):** Entwicklung und Erprobung eines multifunktionalen Geosensornetzwerkes für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Schriftenreihe Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, 83.
- Rödelsperger, S. (2011):** Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 668.
- Stempfhuber, W. (2009):** Geodätische Monitoringsysteme – Stand der Technik und Abgrenzung der gegenwärtigen Systeme. In: DVW-Schriftenreihe, 59, 181–191.
- Vennegeerts, H.; Liebig, J.; Hansen, M.; Neuner, H.; Paffenholz, J.; Grünberg, J.; Kutterer, H. (2010):** Monitoring eines Brückentragwerks – Vergleichende Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner und Sensoren der Bau- messtechnik. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2010 – Beiträge zum 16. Int. Ingenieurvermessungskurs, München. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 297–307.
- Woschitz, H. (2010):** Entwicklung einer langarmigen faseroptischen Strain-Rosette zum Monitoring eines Rutschhangs. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformation, 98, 29–39.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85577 Neubiberg
otto.heunecke@unibw.de

