

Michael Möser, Gunnar Neumann, Jan Schmidt

„Und er bewegt sich doch“

## **Das Mess- und Informationssystem für die Überwachungsmessungen am Funk- und Fernmeldeturm Dresden**

Seit 38 Jahren werden am Fernsehturm Dresden Überwachungsmessungen zum Nachweis der Standsicherheit durchgeführt. Das bisherige Messkonzept enthielt Horizontal- und Vertikalwinkelmessungen, hydrostatische Höhenmessungen und Präzisionsnivelements. Zur Bestimmung der Turmschwingungen infolge Wind und Sonne wurde das Messkonzept durch Neigungsmessungen und GPS-Messungen ergänzt. Die Daten werden schrittweise in einem Informationssystem verarbeitet.

Since 38 years the deformation monitoring of TV-Tower in Dresden are realized to demonstrate the static stability. As before the monitoring layout contained horizontal and vertical angles, hydrostatic and precis levellings. Now the measurements are completed by clinometers and GPS to record parameters that affect the object: temperature, atmospheric pressure and wind. The results are imported to a information system for monitoring of buildings.

### **1 Geodätische Bauwerksüberwachungsmessungen mit Monitoring**

Die geodätische Erfassung der Bewegungen und Verformungen, kurz der Deformationen eines Messobjekts, ist eine der Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie. Die messtechnische Bauwerksüberwachung dient dem Erfassen der Veränderung der räumlichen Lage (3D-Koordinaten) und der Geometrie von Bauwerken, Verkehrs-, Maschinen- und Industrieanlagen sowie natürlichen Objekten wie rutschgefährdeten Hängen, Gletschern oder auch der Erdkruste. Dabei geht es um das rechtzeitige Erkennen gefahrenanzeigender Verformungen und Lageänderungen von Bauwerk, Gründung und Umgebung. Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung liegt in der Früherkennung und damit Vermeidung

möglicher Havarien an Objekten, wie z.B. Stauanlagen, Großbrücken (Pfeiler), Turmbauwerken und Kraftwerksanlagen.

Dabei sind Nachweise zur Betriebssicherheit und Nutzungsdauer in regelmäßigen Abständen zu erbringen. Im Rahmen von Sicherheitskonzepten ist die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes durch Messungen an kritischen Stellen nachzuweisen. Repräsentative Objektpunkte werden mittels geodätischer Messverfahren periodisch und automatisch gemessen. Zunehmend wird von den Betreibern der genannten Anlagen und Gebäude eine kontinuierliche Messwerverfassung gefordert, um vor Erreichen von Grenzwerten unter Belastung Rückschlüsse auf das statische Verhalten, Alterung und Ermüdung des Materials ziehen zu können. Als Messsysteme stehen dafür automatisierte Schlauchwaagen an Turbinentischen, automatische Digitalnivelliere zum Nachweis von Setzungen, automatisierte Tachymeter im Tunnel und an Rutschhängen und Satellitenvermessungssysteme (GPS – Global Positioning System) zur Verfügung [1]. Dabei reicht die Abtastrate von Sekunden, wenigen Minuten bis zu stündlichen Wiederholungsintervallen.

In vielen Fällen wird durch die modernen Kommunikationstechnologien (Internet, Funk) gefordert, dass die erfassten Messdaten und Informationen sofort analysiert und ohne Zeitverzögerung einer Zentrale übermittelt und Alarmmeldungen ausgelöst werden. Mit automatisierten Überwachungsmessungen verschiedener Sensoren und einer Echtzeitauswertung wird seit einiger Zeit der Begriff „Monitoring“ verbunden, der den Prozess Überwachung, Warnung und visuelle Darstellung verbindet.

Anforderungen an das Monitoring sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Die Genauigkeit lässt sich aus gerätespezifischen Parametern abschätzen bzw. durch redundant erfasste Deformationen spezifizieren. Messwerverfassung, Datenübertragung und Auswerterroutinen bilden die Bereiche, die zur Beurteilung der Zuverlässigkeit herangezogen werden sollten.

Wesentliche Merkmale von Monitoring sind:

- Kontinuierliche Erfassung der Messdaten einschließlich Druck, Temperatur u.a. und automatische Berechnung der Deformationsgrößen,
- Unterstützung großer Datenbanken (Client/Server-Systeme),
- Echtzeit Datenübertragung und automatisches Senden der Daten per Internet,
- Alarmierung mittels Email oder SMS.



Ein Monitoringsystem besteht aus dem Mess- und Informationssystem. Die vom Messsystem erfassten Daten werden im Informationssystem archiviert, verwaltet und analysiert. Außerdem enthält es Informationen zum Messaufbau, zu den Messstellen, den Sensoren und dem Messobjekt. Berechnungsalgorithmen ermöglichen die 3D-Koordinatenbestimmung und verbinden Transformationen und die Kalman-Filterung zur Deformationsanalyse.

Bild 1. Tachymeter TPS 1101 der Fa. Leica Geosystems (Schweiz)

## 2 Das Messkonzept „Dresdner Fernsehturm“

Der Funk- und Fernmeldeturm Dresden, eher bekannt als „Fernsehturm“, wurde 1964 zur Koordinierung des Rundfunk- und Fernsehempfanges im Osten von Dresden, im Stadtteil Wachwitz, auf einem Plateau an den Elbhängen errichtet. Der Turm hat eine Gesamthöhe von 252 m mit einer Aussichtsplattform in 148 m Höhe. Bis zur Höhe von 167 m besteht der Turm aus einer Stahlbetonkonstruktion, deren Außendurchmesser am Boden 9,40 m und sich bis zum Kelchansatz in einer Höhe von 94,5 m auf 7,10 m verjüngt. Es schließt sich der 85 m lange Antennenträger als Stahlrohrmast an. Die Gründung erfolgte 5,50 m tief im Granitgestein auf einem Fundamentring mit 21 m Durchmesser.

Die geodätischen Messverfahren an Turmbauwerken dienen dem Nachweis der Funktions- und Standsicherheit. Die vom Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie seit 1965 ausgeführten Messungen am Fernsehturm Dresden umfassen die Bestimmung von Eigendehformationen infolge äußerer und innerer Kräfte sowie Setzungen und Neigungen des gesamten Baukörpers.

Für ein Turmbauwerk solcher Höhe ist es notwendig, schon mit Baubeginn Messsysteme zu installieren, mit denen Deformationen, insbesondere geringe Setzungsbeträge erfasst und erkannt werden. Schon in den einzelnen Bauphasen kann dann auf die Veränderungen reagiert werden. Nach Fertigstellung dienen diese Messeinrichtungen der Überwachungsmessung und somit dem geforderten



Nachweis der Standsicherheit. Zur Charakterisierung des Verhaltens eines Bauwerkes müssen repräsentative Objektpunkte festgelegt und für eine messtechnische Erfassung dauerhaft und in geeigneter Form vermarktet werden.

Das am Fernsehturm Dresden mit Baubeginn umgesetzte Messkonzept gliedert sich in die Überwachung des Fundamentbereiches und die Eigenverformung des Turmschaftes. Es soll im Folgenden beschrieben werden.

Bild 2. Funk- und Fernmeldeturm Dresden

### **3 Setzungsmessungen**

Die Gesamtlast des Turmes wird durch das Ringfundament aufgenommen und in den Untergrund weitergeleitet. Deshalb ist sein Verhalten maßgebend für die Beurteilung der Standsicherheit. Die Folge einer ungleichmäßigen Setzung (Kippung) wäre die Schiefstellung des gesamten Turmes. Bezogen auf eine Messbasis von 10 m im Fundament würde sich durch dessen Kippung um 1 mm eine Ablage des Turmzentrums in 250 m Höhe von 25 mm ergeben. Fehlertheoretisch betrachtet wirkt sich die Genauigkeit der Bestimmung der Kippung mit dem gleichen Vergrößerungsfaktor auf das Ergebnis der Schiefstellung aus. Das Messverfahren zur Überwachung des Ringfundamentes muss hohen Genauigkeitsanforderungen entsprechen. Hierfür wurden in die Innenwand des Betonringes 8 Fundamentbolzen

eingbracht, die gleichmäßig den Innenkreis unterteilen. Sie dienen der Aufnahme von Präzisionsschlauchwaagen. Mit dem Einsatz dieses hydrostatischen Messsystems können Höhenunterschiede mit einer Genauigkeit besser 0,05 mm bestimmt werden. Nach Fertigstellung des Ringfundamentes wurden im September 1964 die ersten Messungen durchgeführt [2]. Diese Messepoche dient als Referenz für die folgenden Messungen, deren zeitlichen Abfolge sich am Baufortschritt orientierte und nach Bauende jährlich durchgeführt wurde. Somit konnte für die einzelnen Bauphasen und der damit verbundenen Erhöhung der Eigenlast (Gesamtgewicht des Turmes beträgt nach Fertigstellung im Jahr 1969 7500 t) das relative Bewegungsverhalten des Fundamentes und die Reaktion des Baugrundes erfasst werden. Aus den Messergebnissen lassen sich Kippungen in der Bauphase ableiten, die eine Schiefstellung des Turmes in Richtung West erzeugen und 1974 ausklingen. In den Folgejahren kehrt sich diese Erscheinung um, so dass er sich heute nach Nordost neigt (Bild 3). Scheinbar müssen in dieser Zeit ungleichmäßige Hebungen stattgefunden haben, die mit den Ergebnissen aus einem zweiten unabhängigen Messverfahren bestätigt werden können.

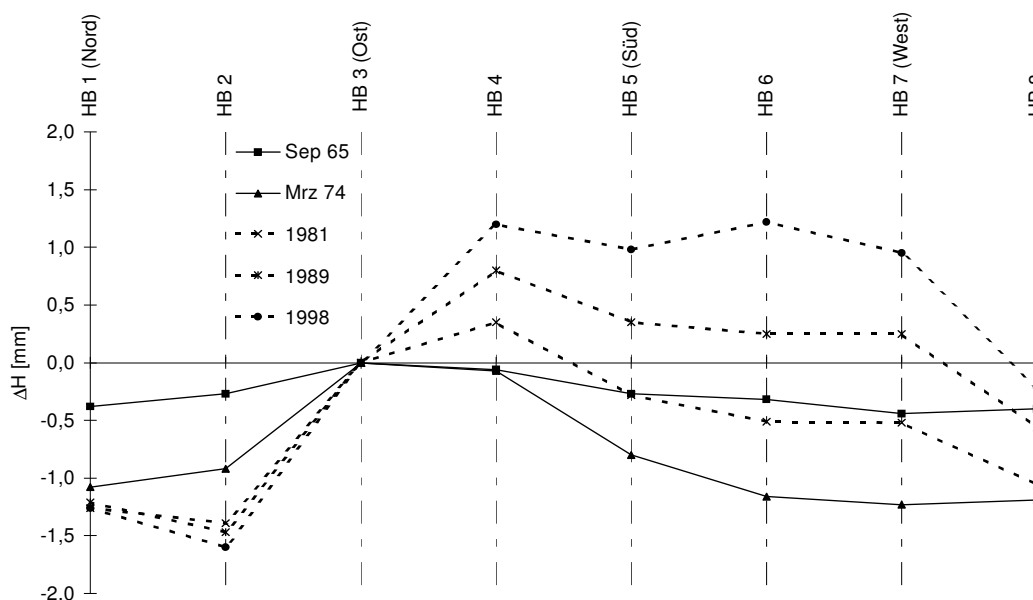


Bild 3. Hydrostatische Messungen mit der Schlauchwaage

Um die absolute Setzung des Turmes zu bestimmen, wurden am Turmfuß Mauerbolzen in den vier Haupthimmelsrichtungen vermarktet. Durch ein Präzisionsnivelement werden diese an 8 bestehende Höhenfestpunkte in der Ortslage Pappritz angeschlossen. Mit dem Verfahren können in diesem Höhennetz

Genauigkeiten für die Höhen von kleiner 0,5mm erreicht werden. Auch hier dient die erste Messung vom September 1964 als Bezugsepoche für weitere Deformationsmessungen und Deformationsanalysen. Aus dem Epochenvergleich zwischen aktueller Messepoche und Bezugsepoche werden mit Hilfe statistischer Tests gesicherte Aussagen über Stabilität aller Höhenbolzen erhalten. Im Ergebnis dieser Deformationsanalysen verzeichnen die Turmbolzen nach einer Setzung, die während der Bauphase beginnt und bis zum Jahr 1974 abklingt, eine ungleichmäßige Hebung, die bis dato anhält (Bild 4). Die mit Hilfe des hydrostatischen Messsystems ermittelte Kippung kann mit dem Präzisionsnivellement bestätigt werden.

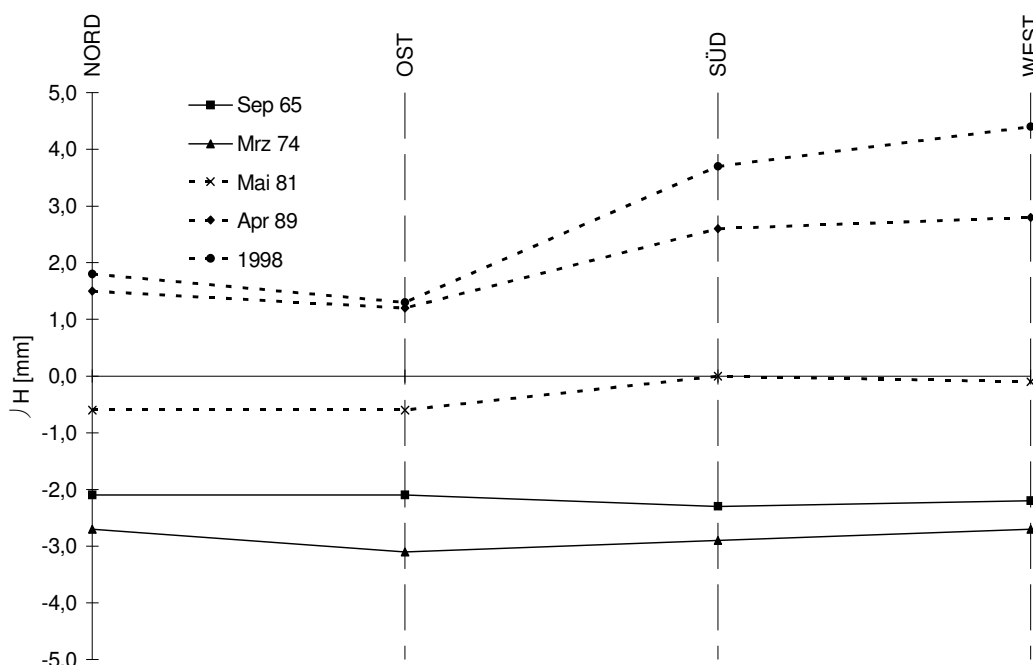


Bild 4. Nachweis der Setzungen mit Präzisionsnivellement

#### 4 Trigonometrische Messungen

Zusätzlich zu den schon erwähnten Deformationen im Gründungsbereich des Bauwerkes wird auch das Bewegungsverhalten des gesamten überirdischen Bereiches überwacht. Zum Einen reagiert der Turm auf die durch Wind auftretenden Kräfte. Er wird dadurch zu Schwingungen angeregt, deren Frequenz bei 0,2Hz liegt. Bei gleichförmiger Luftströmung kommt es zu einer Karmanschen Wirbelbildung, die eine Auslenkung des Turmes quer zur vorherrschenden Windrichtung erzeugt. Zum Anderen ändert sich durch die Sonneneinstrahlung der Temperaturgradient innerhalb des Turmschaftes im Tagesverlauf. Auf Grund des Temperaturgefälles zwischen der

Sonne zu- und abgewandter Seite dehnt sich der Beton unterschiedlich aus und der Turm verformt sich. Gerade in der Bauphase muss dieses Verhalten bekannt sein, um Fehler in der Bauausführung von den Einflüssen der Eigenverformung trennen zu können. Für die Erfassung dieser tageszeitlichen Deformationen wurden im halbstündlichen Abstand von zwei stabilen Beobachtungspfeilern (Bild 5), die sich jeweils in einer der orthogonal zueinander ausgerichteten Hauptachsen befinden, simultane trigonometrische Messungen mit Theodoliten höchster Genauigkeit zu ausgewählten Zielmarken in unterschiedlichen Höhen durchgeführt (Bild 6).



Bild 5. Theodolit auf einem Beobachtungspfeiler

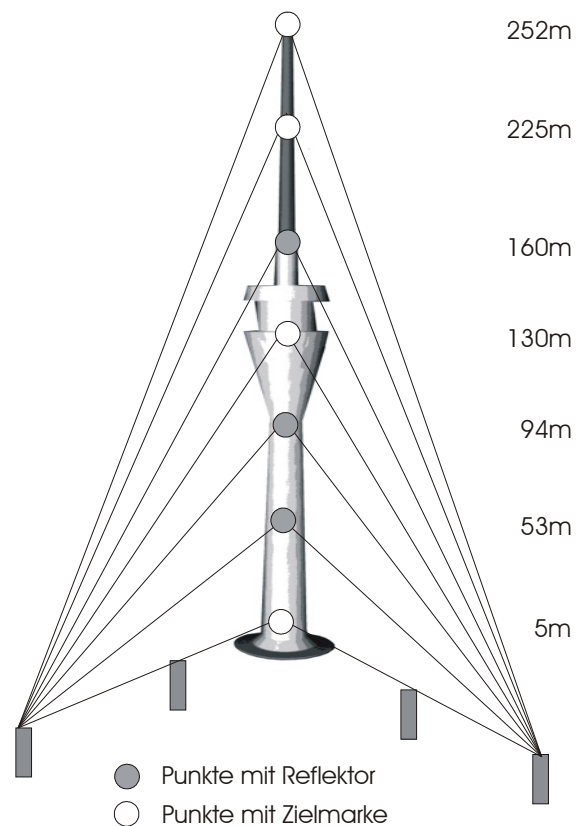


Bild 6. Zielmarken am Turmmantel des Fernsehturms

Aus den minimalen Änderungen der Richtungsdifferenzen zu einem Bezugspunkt am Turmfuß und den näherungsweise bekannten Strecken lassen sich mit Hilfe der Bogenformel Abweichungen des Turmzentrums quer zur Beobachtungsachse ermitteln. Die Genauigkeit dieser Bestimmung liegt bei 2,5 mm in der jeweiligen Achsrichtung. Die Bewegungsgeschwindigkeit kann in 120 m Höhe bis zu 2cm/Stunde betragen. Zur Visualisierung des Bewegungsverhaltens infolge der Sonneneinstrahlung bietet sich neben der Draufsicht für die einzelnen Beobachtungsebenen eine Aufrissdarstellung mit allen Messpunkten an. Diese zu

unterschiedlichen Tageszeitpunkten erzeugte Biegelinie verdeutlicht am besten das Verformungsverhalten des gesamten Turmes. Mit der Weiterentwicklung im geodätischen Instrumentenbau konnte das Verfahren zur Bestimmung der Eigenverformung in den letzten Jahren erheblich vereinfacht werden. Während der Sanierung des Turmmantels bestand die Möglichkeit, die alten Zielmarken durch Reflektoren zu ersetzen, die es jetzt ermöglichen, mit einem Tachymeter auch die Distanz zum Turm zu messen. Somit kann von einem Standpunkt aus das Bauwerk gleichzeitig in seinen zwei Hauptachsen überwacht werden. Mit Hilfe der neuesten Instrumentengeneration wurde der Messprozess weitgehend automatisiert, so dass nach einer Anlernphase und der Festlegung eines Beobachtungsintervalls das Tachymeter kontinuierlich die Bewegung der Zielpunkte erfasst. Dadurch wurden die bisher durch den Beobachter verursachten Anzielfehler eliminiert und die Genauigkeit gesteigert. Automatisierte Tachymeter bieten weiterhin den Vorteil, dass sie in bestehende Monitoringsysteme integriert werden können und oftmals als einziger Messsensor einen absoluten Bezug herstellen. Ein Beispiel für ein permanent messendes Überwachungssystem sind die am Fernsehturm Dresden im Laufe dieses Jahres eingebauten Sensoren. In 53 m Höhe wurde im Inneren des Schaftes ein Neigungsmesser installiert, mit dem Neigungswerte und –richtungen im Minutentakt erfasst werden. An der Außenseite befinden sich vier Temperatursensoren, deren Werte über einen Datenlogger abgefragt und auf einem Messrechner gespeichert werden. Mit der langzeitlichen Erfassung der Tagestemperaturverläufe am Turmmantel (Bild7) und den dazu ermittelten Neigungen (Bild 8) kann ein Beitrag geliefert werden, die Eigenschaften des Turmes besser zu bestimmen. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass der tägliche Bewegungsablauf bei vollen Sonnentagen einer elliptischen Bahn folgt, die nicht in ihren Anfangspunkt zurückkehrt.

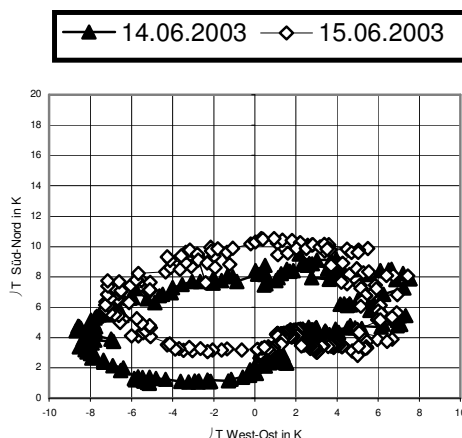


Bild 7. Tagesgang der Temperatur



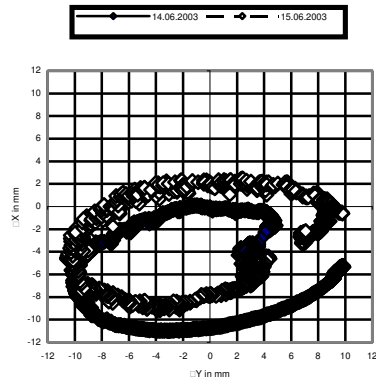


Bild 8. Tagesgang der Neigung

Diese sich jährlich wiederholenden Messungen liefern uns über fast vier Jahrzehnte hinweg ein präzises und kontinuierliches Abbild des Bewegungsverhaltens des Turmfußes und des Turmschaftes. Um diese Messdatenmenge zu verwalten und für Analysen aufzubereiten bot es sich an, sie in digitaler Form zu archivieren. Das Informationssystem „Bauwerksüberwachung FT Dresden“ basiert auf dem relationalen Datenbanksystem MS - Access unter Windows. Dieses Datenbankmanagementsystem besitzt eine Entwicklungsumgebung für individuelle Datenbankapplikationen. Mit der Datenbanksprache SQL werden graphisch formulierte Abfragen in SQL - Anweisungen umgesetzt, so dass der Nutzer diese Anweisungen direkt ansehen und bei Bedarf ändern und ergänzen kann, wobei Tabellen, Abfragen, Berichte und Formulare wesentliche Werkzeuge für die Darstellung geodätischer Messreihen sind.

## 5 Satellitengestützte Überwachung

Obwohl das Global Positioning System (GPS) vordergründig für militärische Navigationsaufgaben entwickelt und aufgebaut wurde, wird es heute auch in vielen zivilen Bereichen erfolgreich eingesetzt. So spielt das GPS bei jeglicher Positionsbestimmung zu Land, zu Wasser und in der Luft eine wichtige Rolle. Die Bestimmung des Standortes des Nutzers, der ein geeignetes Gerät zum Empfang und zur Auswertung der Satellitensignale besitzt, erfolgt über die Messung der Laufzeit, welche das Signal vom Satelliten bis zum Empfänger benötigt. Die Satelliten des Weltraumsegments von GPS senden hierfür Signale auf 2 Frequenzen, der Frequenz L1 für zivile Nutzer und der Frequenz L2 für Anwendungen im militärischen Bereich aus. Auf diese sogenannten Trägerwellen werden mittels Phasenmodulation Codes geprägt, die Informationen zur Identifikation

und aktuellen Position des jeweiligen Satelliten enthalten. Wird nun dieser bekannte Code im Empfänger zu exakt der selben Zeit wie im Satellit erzeugt, so entspricht der zeitliche Versatz zwischen dem vom Satelliten empfangenen und dem vom Empfänger generierten Code genau der Laufzeit des Signals, woraus die sogenannte Pseudodistanz ermittelt werden kann. Da eine exakte Synchronisation von Satelliten- und Empfängeruhr weder technisch noch finanziell schwer realisierbar ist, kommt der Empfängeruhrfehler bei einer dreidimensionalen Positionsbestimmung als vierte Unbekannte hinzu. Diese 4 Unbekannten können durch 4 Pseudostrecken (zeitgleicher Empfang und Auswertung von Signalen vier verschiedener Satelliten) ermittelt werden. Mit diesem Verfahren der Code-Messung auf der Frequenz L1 ist eine absolute Positionsgenauigkeit von 10 – 15 Metern [3] möglich. Diese Genauigkeit, die für viele Anwendungen ausreichend sein mag, ist für Kontroll- bzw. Überwachungsmessungen, bei denen Bewegungen von wenigen Zentimetern erfasst werden sollen, völlig unzureichend. Wie GPS für solche Aufgaben dennoch genutzt werden kann, soll im Folgenden beschrieben werden.

Das Verfahren, welches hierfür zu Anwendung kommt, wird als Differential GPS bezeichnet. Man geht hierbei davon aus, dass der Fehler zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Position für nahe beieinander liegende Punkte annähernd gleich groß ist. Auf einem Punkt, dessen Koordinaten genau vermessen wurden und damit als bekannt vorausgesetzt werden können, wird eine Referenzstation errichtet. Diese Station misst mittels der empfangenen Signale der GPS-Satelliten permanent ihre Position. Der Unterschied in Entfernung und Richtung zwischen der Sollposition und der jeweils aktuell gemessenen Position, die durch aktuell beeinflussende Fehler nicht so genau ist, wird auf der Referenzstation errechnet. Diese so ermittelten Korrekturdaten werden nun mit einer geeigneten Telemetrie-einrichtung an die sich in der Umgebung befindlichen mobilen Roverstationen gemeldet. Diese haben im selben Moment den gleichen, die Position beeinflussenden Fehler. Aber durch die von der Basisstation übermittelten Korrekturdaten sind die Mobilgeräte in der Lage, auch ihre eigene Position entsprechend zu korrigieren. Mit diesem Verfahren ist eine Genauigkeit der Position von zirka ein bis zwei Metern erreichbar. Um die Position des mobilen Empfängers auf wenige Zentimeter genau bestimmen zu können, wird neben dem Code der auf die Trägerwellen aufmoduliert ist auch die Phasenlage der Trägerwellen selbst gemessen. Dieses sogenannte Phasenreststück ist sehr genau messbar aber mehrdeutig, d.h. die Anzahl der ganzen Sinuswellen zwischen Satellit

und Empfänger ist unbekannt. Um dieses Problem zu lösen, wird erst die Phasenmehrdeutigkeit durch Codemessung eingeschränkt. Durch die in den letzten Jahren entwickelten leistungsstarken Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung sowie die Verbesserung der Hardware der Empfänger ist es nun möglich, die Koordinaten des bewegten Rovers in Echtzeit mit Zentimetergenauigkeit bestimmen zu können. Das hier beschriebene Verfahren wird auch als Real –Time - Kinematic (RTK) Technologie bezeichnet.

Zur Untersuchung der Bewegung des Fernsehturmes Dresden kommt ein System der Firma Leica Geosystems zum Einsatz, welches aus 2 GPS-Empfängern vom Typ SR530 mit je einem Satteline 3AS Radio Modem besteht. Ein Empfänger, die Referenzstation, wurde auf dem Dach eines nahe gelegenen Gebäudes fest installiert. Die Bestimmung der Sollkoordinaten für diese Station erfolgte mit Hilfe der von der Permanentstation des Landesvermessungsamtes und der Referenzstation selbst aufgezeichneten Daten eines ausgewählten Tages. Nachdem nun die Position dieses Punktes bekannt war, wurde der Empfänger als Referenz konfiguriert. Dafür werden aus der berechneten Position und den Satellitendaten die aktuellen Korrekturdaten bestimmt und permanent mittels Funkmodem an die Roverstation übertragen. Der zweite Empfänger wurde in ca. 155 m Höhe auf der Aussichtsplattform des Fernsehturmes befestigt und so konfiguriert, dass aus den empfangenen Satellitensignalen und Korrekturdaten der Referenz alle 15 Sekunden eine neue Position berechnet wurde.

Die Ursache für die Turmbewegung ist die einseitige Bestrahlung des Bauwerkes durch die Sonne und die daraus resultierende Temperaturdifferenz zwischen der von der Sonne beschienen und der von der Sonne abgewandten Seite am ersten Tag. Hierdurch bewegt sich die Station hauptsächlich in Richtung Norden, also von der Sonne weg, mit einem Betrag von etwa 6 cm. Am zweiten Tag war der Himmel bedeckt, wodurch hier keine einseitige Erwärmung stattgefunden hat und der Turm annähernd in die Ausgangslage des Vortages zurückwandert. Es wurde nachgewiesen, dass das Satellitenvermessungssystem GPS ein geeignetes System zur kontinuierlichen Erfassung und Auswertung von Bewegungen in Echtzeit mit Zentimetergenauigkeit ist.

## **Literatur**

[1] *Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H.* : Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band Grundlagen. 3. Auflage, Heidelberg, Wichmann Verlag, 2000.

[2] *Sprenger, G.*: Vermessungsarbeiten am Fernsehturm Dresden. In: *Vermessungstechnik* **14** (1966) 9, S. 349-353

[3] *Thaller, G. E.*: Satellitennavigation : Das Global Positioning System (GPS), 1. Auflage, Baden-Baden, Verlag für Technik und Handwerk, 1999

### Zusammenfassung

Geodätische Messverfahren werden zunehmend für die Bauwerksprüfung und –überwachung eingesetzt. Dafür eignen sich elektronische automatisierte Tachymeter mit integriertem Rechner und automatischer Zielerfassung und Zielverfolgung. Kombiniert man die geodätischen Sensoren in einem absoluten Bezugssystem mit weiteren Sensoren am Messobjekt zu einem hybriden Messsystem und realisiert eine Alarmfunktion bei Grenzzuständen, so spricht man von Monitoring. Eine wesentliche Aufgabe dabei ist, die Messungsergebnisse in Echtzeit zuverlässig bereitzustellen.