

Nachweis von Turmbewegungen mit einem Multisensorsystem

Jan Schmidt, Michael Möser, TU Dresden

Zusammenfassung: Die Messkonzepte für die geodätische Überwachung hoher Bauwerke haben sich in den letzten Jahren durch die Automatisierung der Messmittel grundlegend geändert. Durch die Kombination verschiedener Messeinrichtungen zu einem hybriden Messsystem soll das Bewegungsverhalten aus kontinuierlichen Beobachtungen abgeleitet werden, um kritische Situationen in Echtzeit zu erkennen. Aus welchen Komponenten ein solches System bestehen kann, soll im folgenden Artikel am Beispiel des Fernsehturmes Dresden vorgestellt werden.

1 Automatisierte messtechnische Überwachung

Alle Ingenieurbauwerke unterliegen einem hohen Schadensrisiko. Insbesondere die Standsicherheit von Türmen, Brücken, Tunnels und Hochhäusern ist dabei mit einer bestimmten Zuverlässigkeit zu erfüllen. In verschiedenen Vorschriften und Dienstanweisungen werden Grundsätze zur Überwachung und zum rechtzeitigen Erkennen von gefahrenanzeigenden Verformungen und Lageänderungen geregelt. Dabei sind Nachweise zur Betriebssicherheit und Nutzungsdauer in regelmäßigen Abständen zu erbringen. Zunehmend wird von den Betreibern eine kontinuierliche Messwerterfassung gefordert, um vor dem Erreichen von Grenzwerten, Rückschlüsse auf das statische Verhalten, Alterung und Ermüdung des Materials ziehen zu können.

Für die geodätische Überwachung von Türmen gibt es seit mehr als 30 Jahren fest standardisierte Messprogramme, die aus

- Richtungsmessungen mit Theodolit,
- Neigungsmessungen mit Libellen (Klinometer) und Lotungsmessungen,
- Schlauchwaage und Präzisionsnivellement

bestehen. In den letzten 10 Jahren wurden diese analogen Messtechniken durch automatisierte, digitale Sensorik ersetzt, so dass heute

- mit motorisierten Totalstationen, GPS-Messungen und elektronischen Libellen das Biegeverhalten des Turmbauwerkes nachgewiesen wird und

- automatisierte Schlauchwaagen und Digitalnivelliere zur Feststellung von Setzungen des Fundaments und zur Bestimmung von Verformungen des Baugrunds eingesetzt werden.
- Das Biegeverhalten in Abhängigkeit von Wind und Temperatur und die Korrelation mit Eigenschwingungen können mit einer Modellierung nach der Methode mit finiten Elementen nachgewiesen und präzisiert werden (Heunecke, 1999).

Die automatisch erzeugten Signale der einzelnen Sensoren werden mittels Digitalrechner verarbeitet. Auf dieser Grundlage definierte Schlemmer (1997) für diese Vermessungssensoren den Begriff der „Hybriden Messsysteme“. Sie sind die Kombination verschiedener Messeinrichtungen oder einzelner Sensoren, die durch unterschiedliche Messprinzipien Messwerte erfassen und zusammen verarbeiten.

Zunehmend werden hybride Messsysteme für die automatisierte „berührungslose“ (keine manuelle Objektpositionierung und Objekterkennung) Überwachung eingesetzt. Mit diesen automatisierten Überwachungsmessungen bei Abtastraten von wenigen Minuten bis zu stündlichen Wiederholungsintervallen und einer Echtzeitauswertung wird seit einiger Zeit der Begriff „Monitoring“ verbunden, der die Prozesse

- Kontinuierliche Erfassung der Messdaten und on-line Berechnung der Deformationsgrößen,
- Systemselbstüberwachung durch interne Kontrolle
- Unterstützung großer Datenbanken (Client/Server-Systeme),
- Automatisches Senden der Daten per Internet und Funk
- Alarmierung mittels Email oder SMS

verbindet.

Im konstruktiven Ingenieurbau geht es beim Monitoring im Sinne einer Lebensdauervorhersage um die Ermittlung von Grenzzuständen für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit. Im Rahmen von Sicherheitskonzepten ist die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes durch Messungen an kritischen Stellen nachzuweisen. Damit ergeben sich für das Monitoring die Forderungen nach Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Die Genauigkeit lässt sich aus gerätespezifischen Parametern abschätzen bzw. durch redundant erfasste Deformationen spezifizieren. Messwerterfassung, Datenübertragung und Auswerteroutinen bilden die Bereiche, die zur Beurteilung der Zuverlässigkeit herangezogen werden sollten. Mit APSwin (Automatisiertes Polarmesssystem) und GeoMos (Geodätisches Monitoring System) von Leica Geosystems oder GeoMonitor von Solexperts liegen Problemlösungen vor, die Auswerteroutinen mit Transformationen, der Kalman-Filterung und Deformationsanalysen enthalten (Möser, 2002).

2 Rahmenbedingungen für einen Fernsehturm

Fernsehtürme werden durch den unregelmäßig angreifenden Wind zu Schwingungen angeregt. Für Fernsehtürme werden im Zusammenhang mit Prüf- und Erhaltungsordnungen Forderungen nach regelmäßiger Bauwerksüberwachung bei möglichst hohen Windgeschwindigkeiten erhoben und die Eigenschwingzeiten sind zu kontrollieren. An großen Fernmeldetürmen werden sehr große Sendeleistungen abgestrahlt, so dass an den Turmspitzen Gefahrenbereiche ausgewiesen sind, an denen nur im abgeschalteten Zustand die Eigenfrequenzen bestimmt werden konnten. Mit einem Multisensorsystem sollen zukünftig mittels geodätischer Mess- und Auswertemethodik diese Eigenfrequenzen ohne Abschalten ermittelt werden.

Interessant für die Betreiber ist auch die Ermittlung der Auslenkung infolge Tagesgang der Sonne. Ein Ziel war ursprünglich, daraus den Turmruhepunkt statistisch zu ermitteln, um dies als Ausgangswert für die Senkrechtstellung zu verwenden. Bessere Aussagen erhält man jedoch durch Setzungsmessungen, mit denen die Senkrechtstellung ermittelt werden kann. Die Tagesgänge der Messepochen über die Jahre verglichen liefern evtl. Hinweise auf Unregelmäßigkeiten im Tragverhalten; z. B. nach dem Verpressen von Rissen oder nach dem plötzlichen Auftreten von Rissen. Der Vergleich der Vorgaben der Nutzer zur Auslenkung des Turmes und damit der Richtfunkspiegel, „der Strahl könnte bei zu starker Auslenkung seinen Gegenspiegel evtl. nicht treffen“, hat nach 35 Jahren zu keinen Beanstandungen der Nutzer geführt.

Das grundlegende Messkonzept des Dresdner Fernsehturms wurde beim Kurs Ingenieurvermessung 2000 in München bereits vorgestellt. In den letzten Jahren entwickelte sich daraus ein Multisensorsystem, das im Folgenden vorgestellt werden soll.

3 Messverfahren

3.1 Registrierung meteorologischer Daten

Als Hauptursache für die tageszeitliche Bewegung hoher Bauwerke, wie z.B. des Fernsehturms Dresden, muss der durch einseitige Erwärmung hervorgerufene Temperaturgradient zwischen sich gegenüberliegenden Turmseiten angesehen werden. Hierdurch erfährt die jeweils der Sonne zugewandten Seite infolge Temperaturanstiegs eine Ausdehnung, welche eine Neigung des Turmes der Sonne abgewandten Seite zur Folge hat. Dieser Tagesgang wird von Bewegungen, welche durch auf das Bauwerk einwirkende Windkräfte hervorgerufen werden, überlagert. Um also die Möglichen Ursachen in Zusammenhang mit den Verformungen bringen zu können, ist es erforderlich die meteorologischen Verhältnisse am Bauwerk selbst zu erfassen.

Die Temperaturmessung erfolgte mittels vier Temperaturmesswiderständen PT100, welche in 53 m Höhe in den vier Haupthimmelsrichtungen an die Außenseite des Turmes angebracht wurden. Die Erfassung des Windes wurde durch drei Sensoren auf der Aussichtsplattform in 150 m Höhe realisiert. Hiermit können sowohl die Windgeschwindigkeiten im Osten, Süden und Westen als auch die Windrichtung in Form von Spannungswerten registriert werden. Die Aufzeichnung aller meteorologischen Daten wurde mit Hilfe eines Hydra Daten Loggers realisiert, welcher für dessen Steuerung und Speicherung der Messwerte an einen PC angeschlossen wurde. Die Registrierung der Temperatur- und Winddaten erfolgte gemeinsam mit einem Zeitstempel im Abstand von fünf Minuten in einer Textdatei.

Für eine Graphische Darstellung der Temperaturverhältnisse im Tagesverlauf wurden die Temperaturdifferenzen der gegenüberliegenden Turmseiten betrachtet. Da höhere Temperaturen des Südens gegenüber dem Norden eine Neigung in nördliche Richtung in Abhängigkeit von der Größe der Differenz zur Folge haben, wurde die Differenz Süd minus Nord mit ansteigenden Werten auf der positiven X-Achse (Hochwert) eines kartesischen Koordinatensystems abgetragen. Je größer der Gradient Süd-Nord, desto stärker ist demnach auch die erwartete Bewegung nach Norden. Für den Gradienten West-Ost, welcher die Rechtswerte des Koordinatensystems darstellt, gelten diese Überlegungen analog. In Abb. 1 ist der Verlauf der Temperaturgradienten für den 12.06.2003 dargestellt.

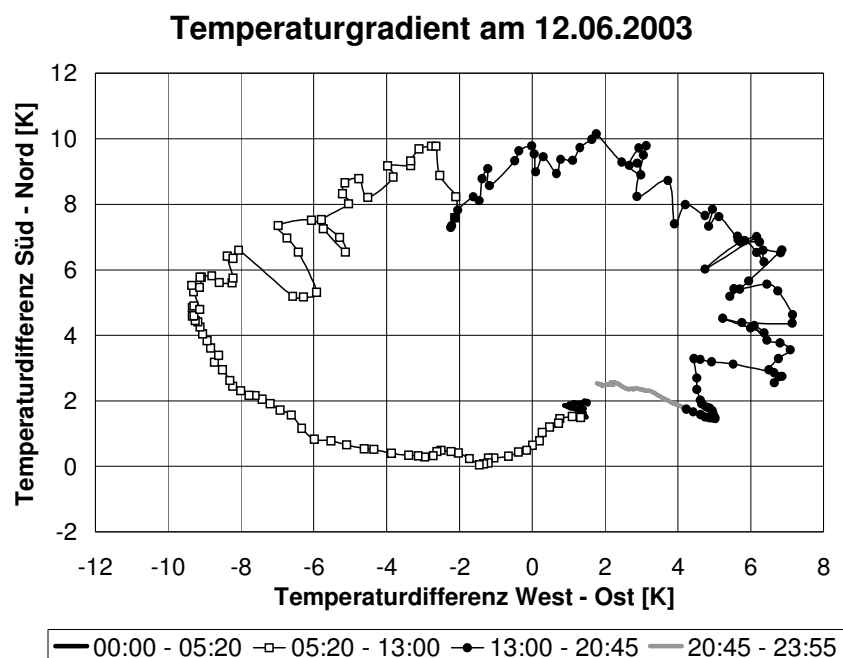


Abb. 1: Verlauf der Temperaturgradienten für den 12.06.2003

3.2 Tachymetrische Messungen

Für die Beobachtung der Bewegung des Turmes in 150 m Höhe wurde das automatisierte Tachymeter TCA 2003 der Firma Leica verwendet. Als Beobachtungsstation diente ein Betonpfeiler des Überwachungsnetzes welcher sich 150 m südlich des Turmes befindet. Die Orientierungsmessung und Kontrolle der Richtungsstabilität erfolgte zu einem zweiten Beobachtungspfeiler, der 100 m nördlich des Instrumentenstandpunktes liegt. Die für die Turmbewegung repräsentativen Objektpunkte befanden sich am Geländer der Aussichtsplattform in 150 m Höhe. Hier wurden an zwei Positionen Halterungen installiert, welche gleichzeitig einen Reflektor für die Distanzmessung und eine Antenne für die kontinuierliche GPS-Überwachung aufnehmen können (Abb. 2).

Durch die Verwendung der Monitoring - Funktion konnte die Datenerfassung ohne ständigen Beobachter realisiert werden. Im Abstand von 5 Minuten wurde je ein Vollsatz zu den drei Zielpunkten gemessen. Somit konnte die Bewegung des Objektes für den hier ausgewählten Referenztag (12.06.2003) in der Zeit von 08:30 Uhr bis 14:45 Uhr beobachtet werden. Abb. 3 zeigt den Bewegungsverlauf des Turmes in Höhe der Aussichtsplattform für den angegebenen Beobachtungszeitraum.



Abb. 2: Reflektor mit GPS-Antenne

**Bewegungsverlauf am 12.06.2003 (08:30 - 14:45)
aus TCA-Messungen**

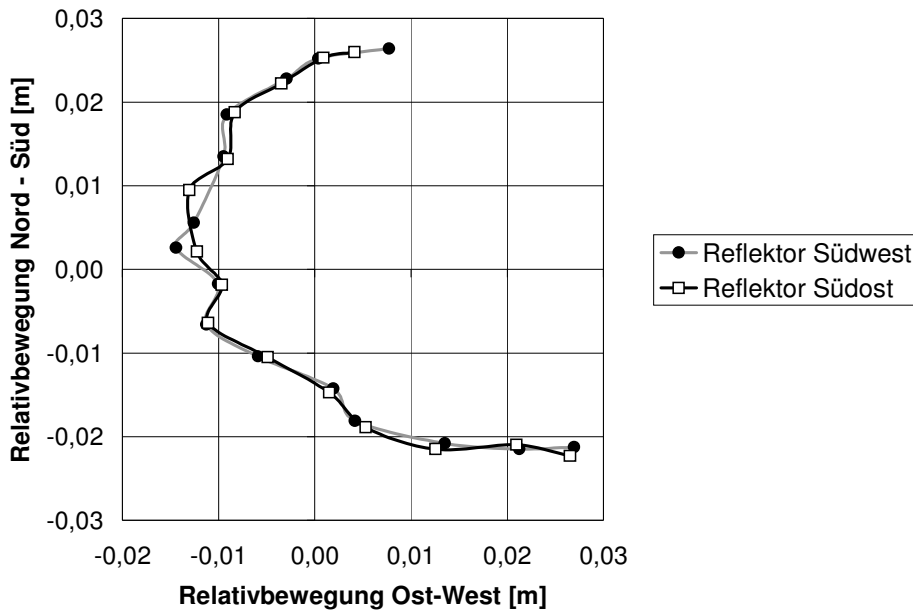
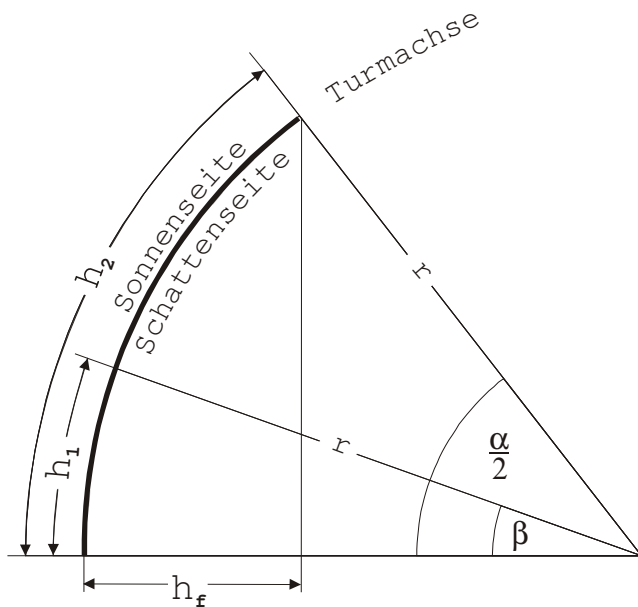


Abb. 3: Bewegungskurve für den 12.06.2003 aus TCA - Messungen

3.3 Neigungssensor

Als weiteres Messsystem für die Beobachtung relativer Lageänderungen kam der hochpräzise Neigungsmesser NIVEL20 von Leica zum Einsatz. Dieser wurde im Turminnern in einer Höhe von 53 m installiert. Mit einer Aufzeichnungsrate von einer Minute wurde die Neigung in zwei orthogonalen Richtungen erfasst. Um aus den Messwerten eine aussagekräftige Bewegungskurve des Turmes in 150 m Höhe zu erhalten, mussten die gemessenen Neigungswerte unter Berücksichtigung der Instrumentenhöhe in ein metrisches System überführt werden. Außerdem war es erforderlich das instrumenteninterne Koordinatensystem zu drehen, da die Y-Achse des Instrumentes mit der Nordrichtung einen Winkel von 37,5gon einschließt.

Berechnungsgrundlage für die Lageänderung des Turmes in 150m Höhe ist eine Approximation des Biegeverhaltens durch einen Kreisbogen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Turm am Fuß fest im Boden verankert ist und die Turmachse durch einseitige Erwärmung einer Turmseite eine gleichmäßige Krümmung mit dem Radius r beschreibt. Die Auslenkung eines Punktes am Turm entspricht bei bekannter Höhe h und gemessener Neigung β der Pfeilhöhe h_f . Abb. 4 zeigt die vereinfachten geometrischen Annahmen. Nachfolgend sind die allgemeine Form sowie die für den speziellen Anwendungsfall abgeleitete Formel zur Berechnung der gesuchten Größe dargestellt:



$$h_f = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$h_f = \frac{h_1}{\beta[\text{rad}]} \left\{1 - \cos \left(\frac{h_2}{h_1} \cdot \beta[\text{rad}]\right)\right\}$$

Abb.4: Geometrische Beschreibung der Turmneigung

Somit lassen sich die mit der NIVEL20 gemessenen Neigungswerte in 53 m Höhe in metrische Lageänderungen für einen Punkt in 150 m Höhe umwandeln. Werden nun die für jede Messepoche berechneten Werte in einem Diagramm graphisch dargestellt erhält man den Tagesgang, die innerhalb eines Tages vollzogene Bewegung des Turmes (Abb. 5).

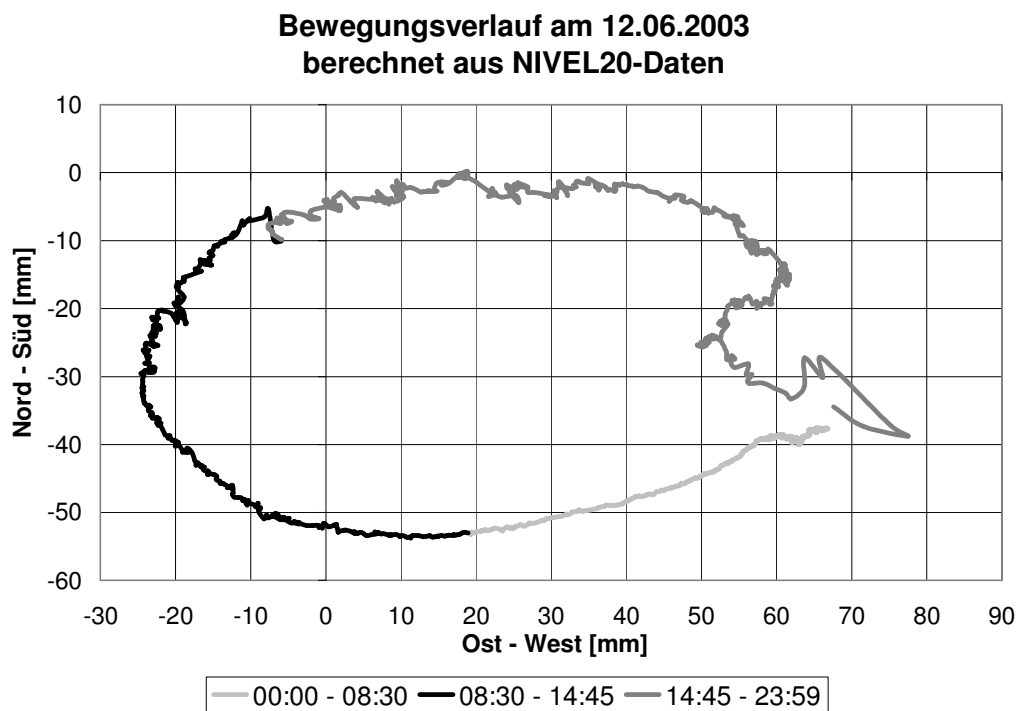


Abb. 5: Bewegungskurve für den 12.06.2003 aus NIVEL20-Daten

Welche Auswirkung eine über einen längeren Zeitraum gleichmäßig starke Windlast auf die Bewegung der Turmachse ausübt, soll an folgendem Beispiel gezeigt werden. Abb. 6 zeigt ein ansteigen der Windstärke auf über 20 m/s für einen Zeitraum von etwa 15 – 20 Minuten, wobei der Wind hier aus westlicher Richtung auf das Bauwerk einwirkt. Die Reaktion des Turmes ist für die Ost-West-Komponente in Abb. 7 dargestellt. Hier ist für den gleichen Zeitraum eine Auslenkung nach Osten mit einem Betrag von 5 cm zu erkennen.

Windstärke am 27.07.2003 (18:00 - 20:20)

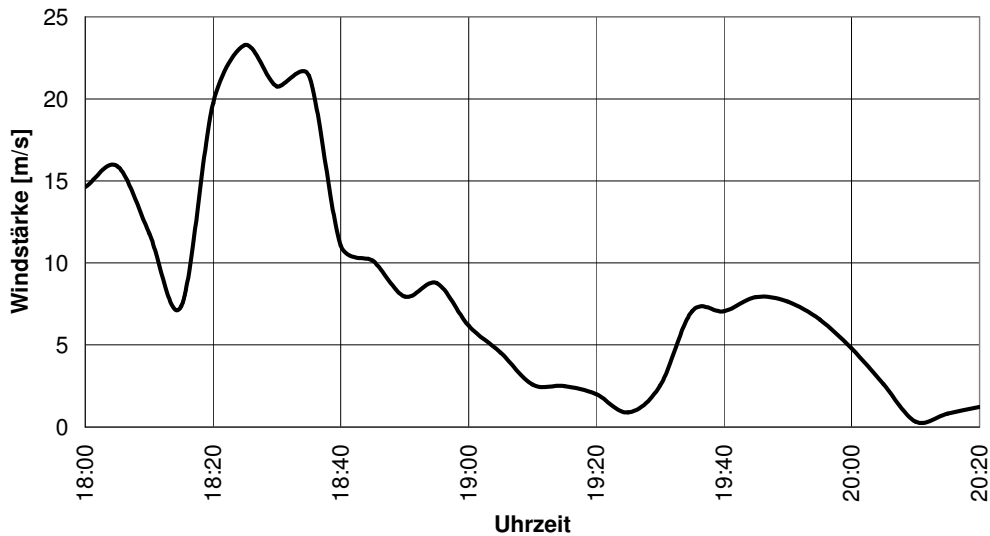


Abb. 6: Windstärke am 27.07.2003

**West - Ost Bewegung am 27.07.2003 (18:00 - 20:20)
berechnet aus NIVEL20-Daten**

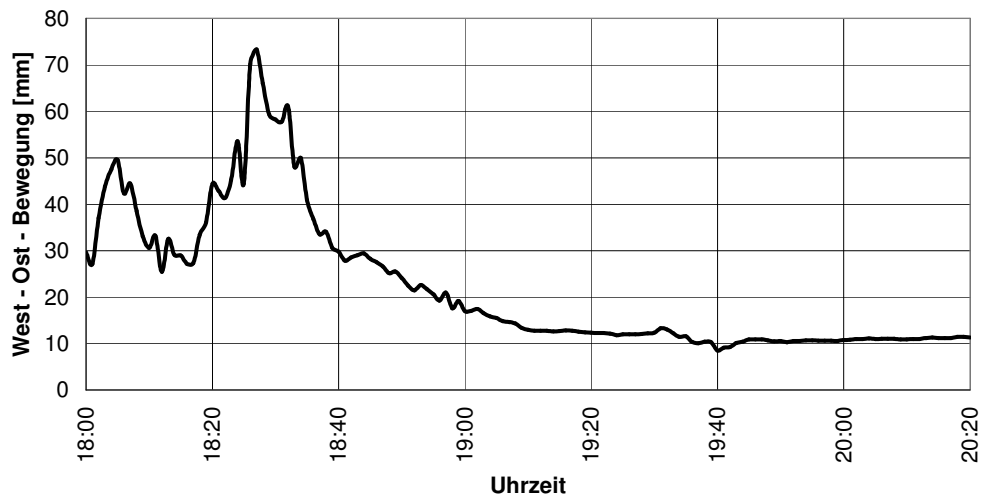
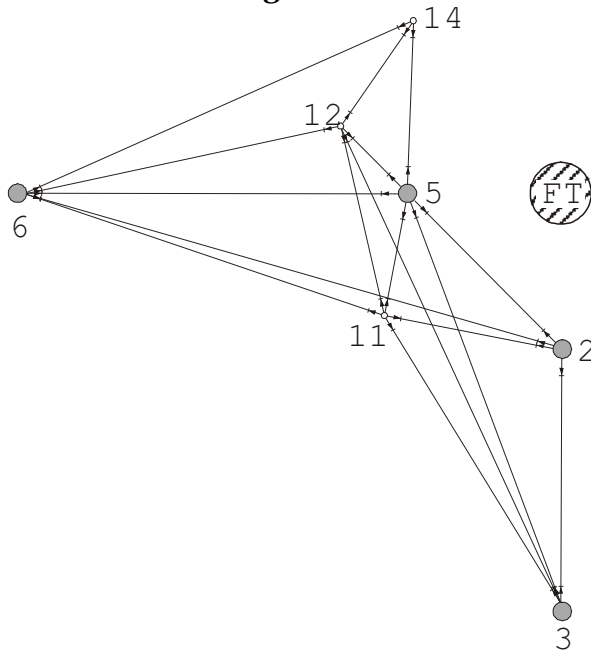


Abb. 7: Turmbewegung in West-Ost-Richtung

3.4 GPS-Messungen



Eine weitere Möglichkeit der kontinuierlichen Beobachtung von Punktbewegungen bietet das GPS. Um die hierbei im System WGS84 erhaltenen Koordinaten in das lokale Turmsystem zu überführen, waren einige Vorarbeiten notwendig. Die Grundlage der Transformation war die Bestimmung von vier Transformationspunkten sowohl im WGS84 als auch im lokalen Überwachungsnetz und anschließender Ausgleichung mit Panda.

Abb. 8: Erweitertes Überwachungsnetz mit TCA 2003

Da die vorhandenen Beobachtungspfeiler (2, 3, 5 und 6) im Hinblick auf optimale Bedingungen für trigonometrische Beobachtungen errichtet wurden, aber für GPS-Messungen untauglich sind, war es erforderlich das lokale Netz um GPS-Taugliche Punkte (11, 12 und 14) zu erweitern. Die Bestimmung der lokalen Koordinaten der Neupunkte erfolgte durch Messung eines Richtungs- und Streckennetzes in allen Kombinationen. In Abb. 8 ist das erweiterte Überwachungsnetz dargestellt.

Im Anschluss daran wurden die vier Passpunkte mit Compact L1/L2 Antennen bestückt und GPS-Rohdaten mittels Trimble 4000 SSI Empfänger aufgezeichnet. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit einer Rate von 15 Sekunden und einem Elevationswinkel von 10 Grad über einen Zeitraum von 45 Minuten pro Standpunkt. Die Auswertung der Basislinien erfolgte in GPSurvey, wobei als Referenzstationen zum einen die Station auf dem Dach des Beyerbaus der Technischen Universität und zum anderen die des Landesvermessungsamtes in Dresden dienten, da Rinex-Daten beider Stationen für den Beobachtungszeitraum zur Verfügung standen. Daran anschließend wurde eine Ausgleichung der Koordinaten der Transformationspunkte mit dem GPSurvey Network-Modul „Adjustment“ durchgeführt, so dass nun ausgeglichene Koordinaten der Passpunkte in beiden Systemen vorlagen. Die Bestimmung der Transformationsparameter erfolgte mit dem Software-Paket Leica SkiPro. Für die kontinuierliche Beobachtung der zeitlichen Lageveränderung der Turmachse wurden am Geländer der Aussichtsplattform in 150 m Höhe zwei GPS-Antennen AT 502 von Leica, wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, montiert. Eine der Antennen befand sich

Eine der Antennen befand sich südwestlich der Turmachse, die andere in Richtung Südost, so dass der durch das Bauwerk selbst abgeschattete Bereich für beide Antennen möglichst im Norden liegt. Die Speicherung der Messwerte erfolgte auf SR 530 Empfängern mit einer Aufzeichnungsrate von 15 Sekunden. Als Referenzstation, welche auf dem Dach eines in unmittelbarer Nähe zum Fernsehturm befindlichen Betriebsgebäudes installiert war, diente eine Zephyr-Antenne von Trimble, wobei die Aufzeichnung der Rohdaten mittels eines Empfängers vom Typ 5700 erfolgte.

In der Auswertesoftware GPSurvey wurden nach einer Datenreduktion Momentanlösungen im Abstand von einer Minute getrennt für die Position Südost und Südwest im System WGS84 berechnet, welche durch die zuvor bestimmten Transformationsparameter im SkiPro in lokale Koordinaten des Überwachungsnetzes überführt wurden. In den Abb. 9 und 10 sind die Verläufe der Rechtswerte beider Antennenpositionen für den Zeitraum vom 14.06.2003 bis 18.06.2003 dargestellt. Beide Antennen zeigen ein analoges Muster, welches der Ost-West-Bewegung des Turmes für diesen Zeitraum entspricht.

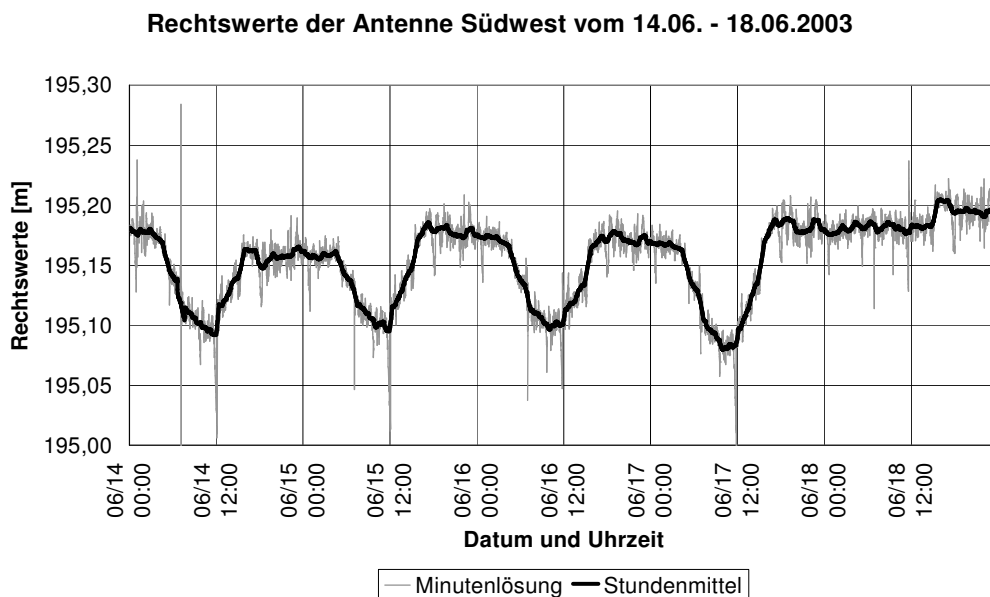


Abb. 9: Rechtswerte der Antenne Südwest

Für die Interpretation der Kurven wurden nun die Temperaturgradienten der entsprechenden Tage hinzugezogen, welche für den Zeitraum vom 14.06 – 17.06. ausgeprägte Temperaturunterschiede mit Beträgen von 5 bis 6 Kelvin zwischen sonnenbeschienener und sonnenabgewandter Turmseite zeigen. Die Ausnahme bildet der 18.06., da hier der Temperaturgradient nur einen Maximalwert von 2 Kelvin annimmt, was dazu führt, dass keine temperaturbedingte Turmbewegung stattfindet. Stellt man den Verlauf der geglätteten Rechts- und Hochwerte ge-

meinsam für einen Tag in einem Diagramm dar, so erhält man den aus GPS-Beobachtungen gewonnen Tagesgang des Turmes (Abb. 11).

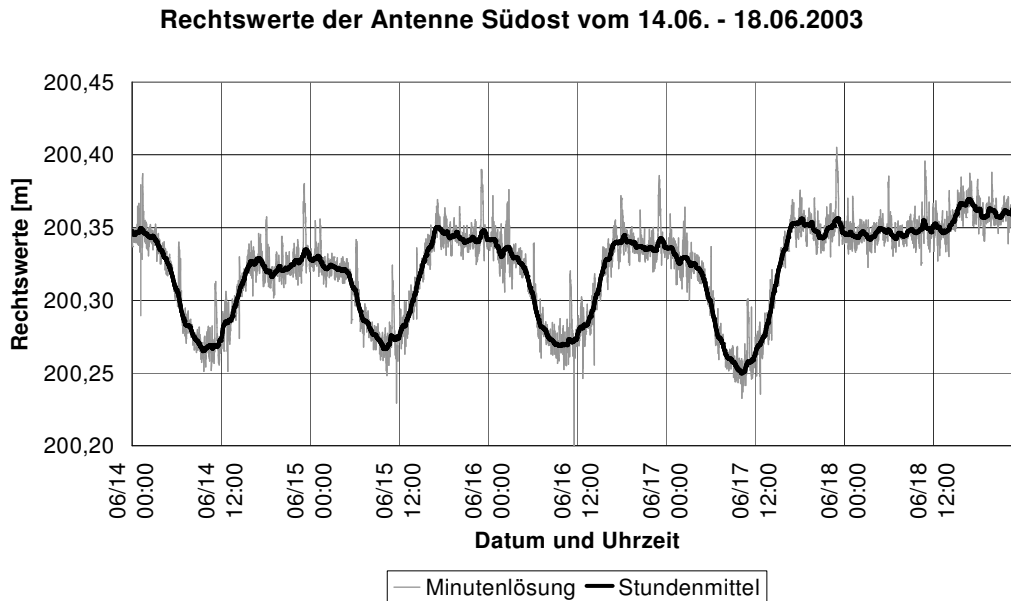


Abb. 10: Rechtswerte der Antenne Südost

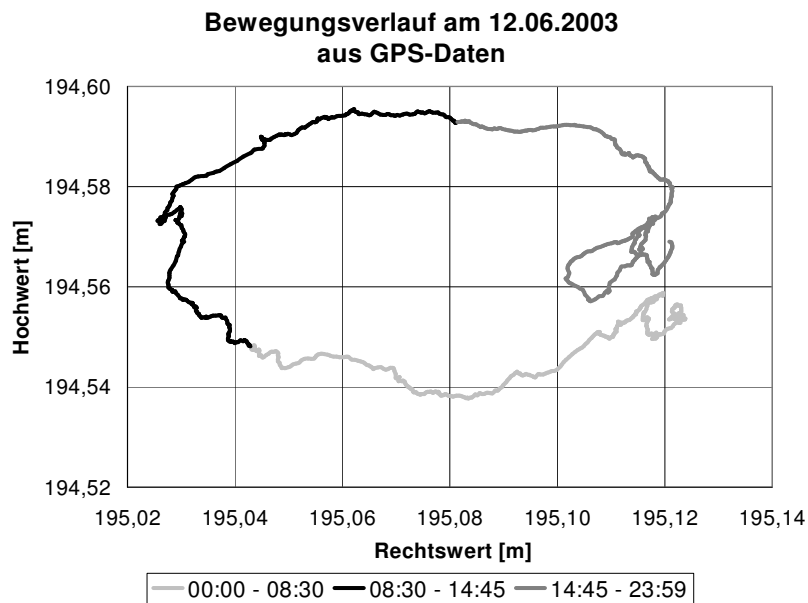


Abb. 11: Bewegungskurve für den 12.06.2003 aus GPS-Daten-Daten

3.5 Vergleich der Messsysteme

Für die Bestimmung der temperaturbedingten Verformung des Fernsehturmes Dresden kamen im Rahmen der Untersuchungen 3 Messmethoden zum Einsatz. Ein Vergleich der Abb. 3, 5 und 11 zeigt einen ähnlichen Verlauf der Turmbewegung. Leider war eine tachymetrische Beobachtung über einen längeren Zeitraum nicht möglich, aber für den hier betrachteten Tagesabschnitt haben alle

drei Kurven etwa gleiche Dimensionen. Aus den Diagrammen der GPS-Messung, sowie der auf die entsprechende Höhe umgerechneten Messwerte der NIVEL20, können die Maximalbewegungen abgeleitet werden. Diese betragen 8,5 bis 9 cm in Ost-West-Richtung bei einem maximalen Temperaturgradienten von 8 K bzw. 5 cm in Nord-Süd-Richtung bei max. 5 K Temperaturdifferenz.

Durch diese Ergebnisse konnten theoretische Annahmen der temperaturinduzierten Turmbewegung gestützt werden. Mittels eines einfachen statischen Modells und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahlbeton wurde hier bei einem Temperaturunterschied zwischen sonnenbeschienener und sonnenabgewandter Seite von 8 K der Betrag der Auslenkung des Turmes in 150m Höhe mit etwa 9,5 cm berechnet.

4 Fazit

Überwachungskonzepte für Türme und ähnliche Bauwerke werden zunehmend als hybride Messsysteme mit geodätischen und „nicht geodätischen“ Sensoren der Baumesstechnik und Geotechnik entwickelt. Dabei spielen für das Echtzeit - Monitoring die Software auf dem Steuerrechner und die Datenfernübertragung mit Funk oder GSM eine entscheidende Rolle. Als Resümee bleibt für den Geodäten: Dem Betreiber und Auftraggeber sind die Ergebnisse der Überwachungsmessungen und der physikalischen Kenngrößen (Meteosensoren) sowie die Zuverlässigkeit der Auswertealgorithmen zeitnah bereitzustellen.

Literatur:

- HEUNECKE, O. [1999]: Messwertgestütztes Überwachen und Nachrechnen von Baukonstruktionen. In: Moderne Sensorik für die Bauvermessung, Tagung Duisburg, VDI-Berichte 1454. Düsseldorf: VDI-Verlag
- MÖSER, M.; NEUMANN, G. [2002]: Automatisierte Tachymeter für das Monitoring. In: Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Schriftenreihe des DVW, Heft 43, Seite 69 – 83.
- SCHLEMMER, H. [1998]: Hybride Vermessungssysteme – Ein Überblick. In: Hybride Vermessungssysteme – Grundlagen und Anwendungen. Schriftenreihe des DVW, Heft 29, Seite 13 – 28.

Anschriften:

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser
Dipl.-Ing. Jan Schmidt
Geodätisches Institut
Technische Universität Dresden
Mommsenstraße 13
01062 Dresden
E-Mail: Michael.Moeser@mailbox.tu-dresden.de
E-Mail: Jan.Schmidt2@mailbox.tu-dresden.de