

Monitoring: ein grundlegender Beitrag zur Überwachung von Bauwerken

Monitoring: a Fundamental Contribution to Building Control

Andreas Eichhorn

Im ersten Teil des Beitrags wird der Bedarf an Bauwerksmonitoring als wichtiger Teil eines Überwachungskonzepts anhand einiger Fallbeispiele motiviert. Im zweiten Teil des Beitrags erfolgt ein Einblick in das Bauwerksmonitoring von der epochenweisen Erfassung von „statischen Zuständen“ des Bauwerks (z.B. durch Deformationsnetze) bis hin zur Beobachtung von dynamischen Deformationsprozessen mit vollautomatischen Monitoringsystemen. Ein wichtiger Diskussionspunkt ist hierbei auch die rasante Entwicklung von Sensorik, die Integration von geodätischen und geotechnischen Sensoren und die Weiterentwicklung in der Auswertetechnik.

Schlüsselwörter: Versagen von Bauwerken, Überwachungsmessungen, statische und dynamische Deformationsprozesse

Showing some practical examples, the first part of the paper motivates the need of monitoring of buildings as an important part of a control and safety concept. In the second part of the paper, an overview of its development from the acquisition of static states of a building (e.g. by deformation networks) to the observation and analysis of dynamic deformation processes with fully automated monitoring systems is given. In this context, important points of discussion are the rapid development of sensor technology, the integration of geodetic and geotechnical sensors and the further development of analysis techniques.

Keywords: Failure of buildings, monitoring, static and dynamic deformation processes

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Betrachtet man aktuelle Aufgabenstellungen im Bereich der Ingenieurgeodäsie sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis, so nimmt das Monitoring von künstlichen und natürlichen Objekten – wie z.B. Bauwerke, Rutschhänge und Bodensenkungen – sicherlich eine zentrale Stellung ein. Gerade die rasante Weiterentwicklung von Sensorik, Kommunikations- und Speichertechniken ermöglicht einen immer höheren Grad an Automatisierung in der Datenerfassung. Innovative Sensoren ermöglichen die hochfrequente Beobachtung von geometrischen Veränderungen mit hoher Punktdichte (z.B. terrestrisches Radar, GB-SAR, /Rödelsperger 2010/) bzw. den „Blick in das Objekt“ (z.B. faseroptische Sensoren, u.a. /Brunner, Woschitz 2011/). Auf der anderen Seite werden hierdurch auch neue Auswertetechniken inspiriert, z.B. derzeit der allmähliche Übergang von der klassisch punktwisen zur raumkontinuierlichen Betrachtung des Messobjektes bzw. die Verknüpfung von Messungen mit numerischen Modellen des Objektes im Rahmen einer „integrierten Auswertung“, z.B. (/Lienhart, Brunner 2007/, /Brunner, Woschitz 2011/ und Abschnitt 5).

Zur Definition und zu den Aufgaben des Monitorings sind in den vergangenen Jahren gerade im geodätischen Bereich einige grundlegende Arbeiten veröffentlicht worden, u.a. /Wunderlich 2006/ und /Niemeier 2007/. Eine sehr kompakte und mit der geodätischen Sichtweise weitgehend übereinstimmende Definition des Begriffs Monitoring ist auch bei Wikipedia zu finden, z.B. /Wikipedia 2011a/. Monitoring bedeutet

- die unmittelbare systematische Erfassung / Beobachtung / Überwachung eines Prozesses,
- u.a. mittels technischer Hilfsmittel,
- mit einer wiederholten Durchführung,
- und dem Ziehen von Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der Ergebnisse.

Eine wesentliche Funktion des Monitorings besteht dann

- im steuernden Eingreifen, falls der beobachtete Prozess nicht den gewünschten Verlauf nimmt
- bzw. bestimmte Schwellwerte unter- / überschritten sind.

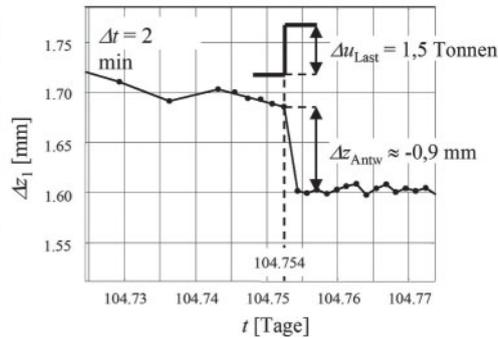


Abb. 1 | Monitoring der Bewegung einer Theaterdecke

Die oben genannten Punkte können anhand des Beispiels einer Bauwerksüberwachung anschaulich dargestellt werden. Das Wiener Theater „Ronacher“ wurde vom Sommer 2006 bis zum Herbst 2008 im Rahmen einer Funktionssanierung grundlegend modernisiert. Hierzu gehörte u.a. der Umbau des Dachstuhls und der Aufbau von Probenräumen auf dem Dach des Theaters. Durch die Baumaßnahmen lag eine erhebliche mechanische Belastung für die 600 m² große Deckenkonstruktion über dem Zuschauerraum vor, deren Vertikalbewegung baubegleitend überwacht wurde.

Die Überwachung erfolgte im Wesentlichen durch die Installation eines automatischen Monitoringsystems mit einem Tachymeter als zentralem Sensor /Eichhorn 2009/ und der Durchführung von Wiederholungsmessungen mit Messraten von $\Delta t = 2$ bis 10 min für repräsentative Punkte im Zentrum der Saaldecke. Die in *Abb. 1* dargestellte Zeitreihe zeigt eine als vollkommen unproblematisch eingestufte vertikale Bewegung der Saaldecke von $\Delta z \approx -1$ mm beim Einhängen eines 1,5 Tonnen schweren Deckenlüsters. Aufgabe des Monitorings war hier, die geometrische Verformung der Decke unmittelbar während des Einhängenvorganges zu erfassen und im Falle des Überschreitens des durch einen Statiker à priori festgelegten Schwellwertes von $\Delta z_{\text{Grenz}} = -12$ mm eine zeitnahe Alarmierung auszulösen, welche als steuerndes Eingreifen in den Bauprozess eine sofortige Entlastung der Decke durch Absenkung des Lüsters zur Folge gehabt hätte. Der zeitliche Verlauf der Deckenbewegung ist in *Abb. 2* für einen Zeitraum von 14 Monaten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die festgelegten Schwellwerte in keiner Phase des

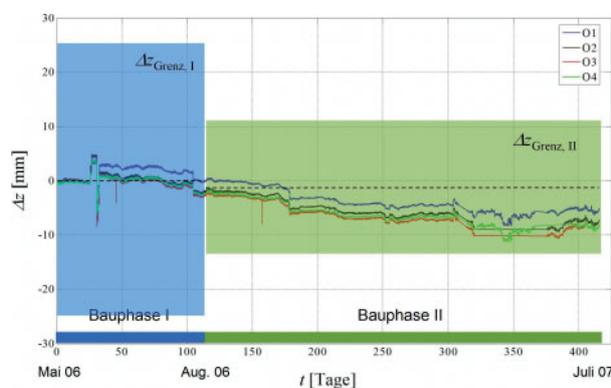


Abb. 2 | Zeitreihe der Deckenbewegung und zulässige Grenzwerte

Bauprozesses überschritten wurden, wodurch dieser auch plangemäß durchgeführt werden konnte.

Das angeführte Beispiel zeigt anschaulich die Integration des Monitorings in einen Bauprozess und dessen Bedeutung für die zeitnahe Beurteilung des aktuellen geometrischen und indirekt auch des physikalischen Zustandes eines Bauwerks.

2 DAS VERSAGEN VON BAUWERKEN

Dass Bauwerke nicht nur während der Bauphase, sondern auch nach ihrer Errichtung mittels Monitoringsystemen überwacht werden müssen, zeigen die nachfolgenden ausgewählten Beispiele.

Das Versagen von Brückenbauwerken ist in Internet-Datenbanken gut dokumentiert und zum Teil auch analysiert, z.B. /Brückenweb 2011/. Die wesentlichen Ursachen von Brückeneinstürzen sind durch

- Naturkatastrophen (z.B. Resonanzkatastrophen),
- Kollisionen mit Schiffen und
- Konstruktionsfehler bzw. Korrosion / Materialermüdung

gegeben. Nur ca. 2 % der Brückeneinstürze ereigneten sich dabei während der Bauphase. Gerade bei den letztgenannten strukturbedingten Ursachen kündigt sich das Versagen oftmals bereits lange im Vorfeld durch eine allmähliche Veränderung der statischen und dynamischen Eigenschaften des Bauwerks an. Hier liefert dann die Beobachtung der Wirkungskette Belastung \Rightarrow Verformung oftmals sinnvolle Indikatoren zur Beurteilung der Standsicherheit des Bauwerks. Als repräsentatives Beispiel sei hier das Versagen der Reichsbrücke in Wien angeführt (*Abb. 3*). Ihr Einsturz erfolgte am 01.08.1976, wobei nach Expertenmeinung die wahrscheinliche Ursache eine Kombination aus Kriechen und Schwinden des Betons in einem Pfeilersockel und besonders ungünstigen Witterungs- und Strömungsverhältnissen war.

Nach der Wiedererrichtung der Brücke wurde ein Online-Monitoringsystem installiert, welches u.a. mittels im Tragwerk installierten Beschleunigungssensoren die Eigenfrequenzen der Brücke beobachtet und die modalen Parameter (Steifigkeit und Dämpfung) eines Finite Elemente-Modells der Brücke aktualisiert /Reichsbrücke 2011/.

Wie bei den Brückenbauwerken gibt es auch für Talsperren Internet-Datenbanken, in denen u.a. auch katastrophale Versagensereignisse wie z.B. ein Bruch des Absperrbauwerks und eine hieraus re-



Abb. 3 | Einsturz der Reichsbrücke in Wien (1976)

sultierende Flutwelle dokumentiert sind z.B. /Talsperrenet 2011/ und /Wikipedia 2011b/. Hieraus ergibt sich, dass in Deutschland, Österreich und der Schweiz seit 1900 keine katastrophalen Talsperrenbrüche stattgefunden haben. Zerstörungen durch Kriegsereignisse – wie z.B. an der Edertalsperre – seien an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Aufgrund der hohen Siedlungsdichte liegt allerdings ein beträchtliches Gefahrenpotenzial vor. Simulationsrechnungen für ein Versagen der Schweizer Talsperre „Tierfeh“ im Kanton Glarus ergeben beispielsweise, dass eine 10 m-Flutwelle den 5 km entfernten Ort Linthal in nur 3 Minuten erreichen würde /Wikipedia 2011b/, wodurch sehr hohe Anforderungen an die Überwachung und frühzeitige Alarmierung zu stellen sind.

Aktuellere Versagensereignisse von Talsperren sind in den USA, Indien, China und in Osteuropa zu finden. Sie kündigen sich oftmals bereits über Wochen und Monate vorher durch Setzungen, Risse und erhöhten Sickerwassereintrag an und sind damit einem Monitoring zugänglich. Die eigentliche Auslösung der Katastrophe erfolgt dann in der Regel durch eine Überströmung des Damms nach Starkregenereignissen bzw. durch Schmelzwasser. Das Beispiel des Versagens der Gewichtsstaumauer „Baia Mare“ im Januar 2000 in Rumänien zeigt eindrucksvoll die Folgen für Mensch und Umwelt. Es handelt sich hierbei um den Damm einer Golderzaufbereitungsanlage, durch welchen aufgrund eines Grundbruchs und einer hieraus resultierenden Überspülung ca. 300.000 m³ mit Schwermetallen (u.a. Cyanid) versetztes Wasser bis in die Theiß und die Donau gelangten und ein



Abb. 4 | Dammbbruch bei Ajka in Ungarn (2010)

Fischsterben auslösten. Als Ursache für die Katastrophe wurde u.a. eine mangelnde Überwachung und Kontrolle des Damms festgestellt. Dies gilt auch für das Versagen des Damms eines Auffangbeckens für Bauxitschlamm bei Ajka in Ungarn im Jahr 2010 (Abb. 4), u.a. /ETHLife 2011/.

Baumaßnahmen „im Bestand“ erfordern das Monitoring der in ihrem Einflussbereich liegenden Bauwerke. Im Fall des eingestürzten Kölner Stadtarchivs im März 2009 (Abb. 5) kündigte sich ein Versagen des Bauwerks möglicherweise bereits Monate im Voraus durch Setzrisse am Gebäude und eine signifikante Absenkung an /Stadtarchiv 2011/. Das Monitoring (z.B. von Setzungen) von Bestandsgebäuden ist daher ein wesentlicher Beitrag für das frühzeitige Erkennen und Beurteilen von Gefährdungen durch die in ihrem Umfeld durchgeführten Baumaßnahmen.



Abb. 5 | Einsturz des Kölner Stadtarchivs (2009)

3 AUFGABEN DES BAUWERKSMONITORINGS

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargelegt wurde, ist das Monitoring von Bauwerken nicht nur auf die Phase von deren Errichtung beschränkt, sondern oftmals auch auf ihre Betriebsphase auszudehnen. Typische Beispiele hierfür sind Brücken, Staudämme und Tunnelbauwerke. Grundlegende Zielsetzungen des Monitorings liegen mit den nachfolgenden Punkten vor, u.a. /Welsch et al. 2000/ und /Niemeier 2007/:

- Die Überwachung des Bauwerks hinsichtlich kritischer Abweichungen von ihrem „Normalverhalten“.
- Die Überprüfung der Integrität der Struktur des Bauwerks.
- Das frühzeitige Erkennen von Schädigungen
- bzw. die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens im Kontext von Risiko-Betrachtungen.

Zu einem „ganzheitlichen Monitoring“ gehört dann nicht nur die Überwachung der Geometrie des Bauwerks, sondern auch das Monitoring

- von geologischen Strukturen / geotechnischen Objekten, welche in Wechselwirkung mit dem Bauwerk stehen, z.B. /Lienhart 2007/

■ und der Umweltbedingungen (z.B. Klimaveränderungen und steigende Verkehrslasten) – hierzu gehört auch das Treffen von Prognosen über die künftige Entwicklung.

Auch das Entnehmen und die Analyse von Materialproben, die bautechnische Überprüfung etc. müssen zum Monitoring gezählt werden. Monitoring kann also durchaus mehr sein, als die Erfassung von geometrischen Veränderungen am Bauwerk. Es ist Teil einer zustandsabhängigen Erhaltungsstrategie für das Bauwerk.

Die Beobachtung des Bauwerks mittels geeigneter geodätischer und geotechnischer Sensoren (Messtechnische Überwachung) und die Bestimmung von dessen Deformationen sind neben der optischen Inspektion – wie z.B. die Detektion von Rissen, Korrosion und anderweitigen Schädigungen – wichtige Komponenten innerhalb des Bauwerksmonitorings. Nach /Welsch et al. 2000/ liefern (geodätische) Überwachungsmessungen an einem Bauwerk wichtige Beiträge

- zur in situ Bestimmung von geometrischen Veränderungen,
- zum Nachweis der Stand- und Funktionssicherheit des Bauwerks (Funktionssicherheit: das Bauwerk muss seine Funktion erfüllen können, z.B. eine Verkehrsbrücke muss eine definierte Verkehrslast aufnehmen können),
- zur rechtzeitigen Erfassung von Veränderungen als Grundlage für Frühwarnsysteme,
- zur Schadensdokumentation und Klärung der Ursache von Schäden,
- zur Prognose des künftigen Bauwerksverhaltens,
- zur Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften
- und zum Erkenntnisgewinn für vergleichbare Bauwerke.

Anhand dieser recht langen Aufzählung wird die Bedeutung von Messungen am und im Umfeld des Bauwerks anschaulich dokumentiert.

Generell ist die messtechnische Überwachung zur Sicherstellung der Stand- und Funktionssicherheit eines Bauwerks in ein Maßnahmen- und Notfallkonzept eingebunden (Abb. 6). Die wichtigste Säule ist hier durch die konstruktiven Maßnahmen gegeben. Hierzu gehört die korrekte Bemessung des Bauwerks für definierte Last- und Betriebsfälle schon in der Planungsphase. Durch die messtechnische Überwachung sollen dann Verhaltensunregelmäßigkeiten am Bauwerk bzw. in dessen Umgebung aufgedeckt werden. Es ist dann die Aufgabe des Maßnahmen- und Notfallkonzepts die Situation zu beherrschen. Dies kann sowohl durch organisatorische / logistische Maßnahmen wie die Entlastung einer Staumauer durch Absenkung der Wasserpegels, die Intensivierung der Überwachung und ggf. die

Evakuierung als auch durch konstruktiv sichernde Maßnahmen wie z.B. die Durchführung von Betoninjektionen geschehen.

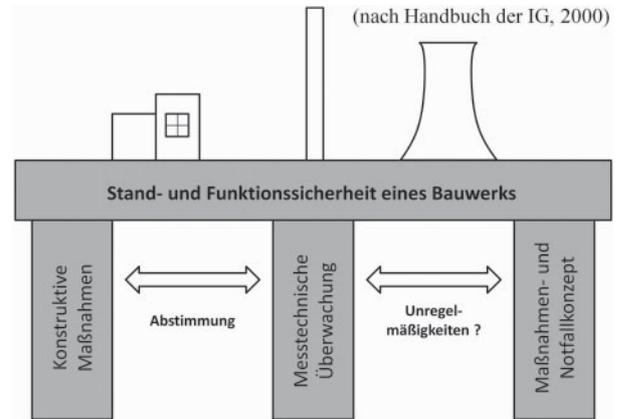


Abb. 6 | Einbindung in ein Maßnahmen- und Notfallkonzept

4 SENSORIK

Die Durchführung von Überwachungsmessungen an einem Bauwerk erfordert eine Kombination von Sensoren, welche in unterschiedlichsten zeitlichen und räumlichen Skalen zum Einsatz kommen (Abb. 7 und Abb. 8). Hierdurch unterscheiden sich Messaufgaben im Bauwesen grundsätzlich von anderen Ingenieurdisziplinen wie dem Maschinenbau oder der Elektrotechnik.

Nach /Pelzer 1988/ reicht das interessierende Spektrum der Bauwerksbewegungen im zeitlichen Bereich von der Erfassung von Vibrationen und Schwingungen mit Periodendauern von einigen Hundertstel Sekunden bis zu Sekunden über kurzfristige Bewegungen (z.B. der Tagesgang des Bauwerks aufgrund der Temperaturbelastung) bis hin zu langfristigen Bewegungen über Monate bzw. Jahre (z.B. Bauwerkssetzungen).

Im räumlichen Bereich sind die interessierenden Ausschnitte des Bauwerks von kleinräumigen, lokalen Bereichen wie einzelnen Fugen und Rissen, über ganze Bauwerksabschnitte (z.B. Wände, Pfeiler, Brückenträger) bis hin zum gesamten Bauwerk inkl. seiner Interaktion mit der Umgebung gegeben.

Im Bereich der großräumigen Erfassung von langfristigen Bauwerksdeformationen erfolgt auch heute noch die Messung von „klassischen“ Ingenieurnetzen. In vielen Fällen getrennt nach Lage und

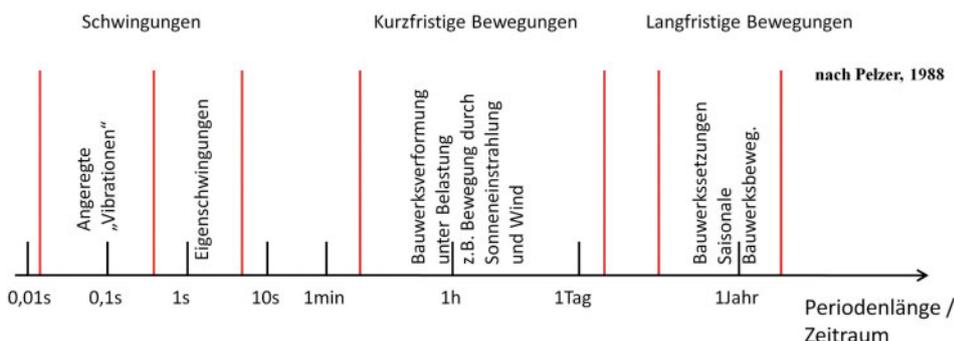


Abb. 7 | Interessierende Bewegungen eines Bauwerks

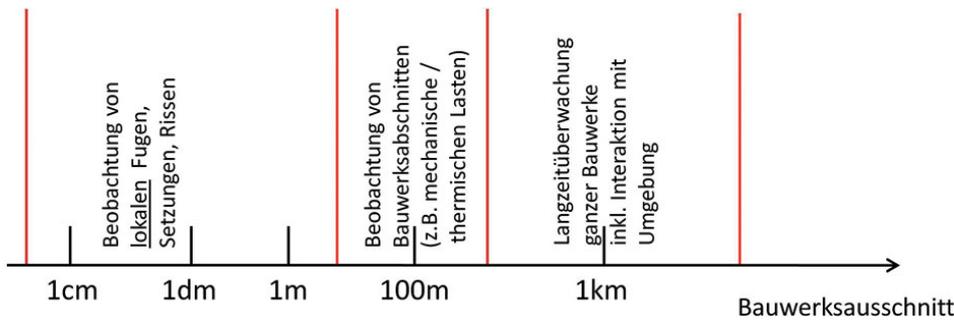


Abb. 8 | Interessierende Ausschnitte am Bauwerk

Höhe mit tachymetrisch bestimmten Richtungs- und Streckenbeobachtungen, GNSS-Beobachtungen und Präzisionsnivellments. Mögliche geometrische Veränderungen am Bauwerk werden durch den Vergleich der Koordinaten der in verschiedenen Epochen bestimmten Netzpunkte ermittelt (Abschnitt 5). Das Messobjekt wird hierbei während einer Messepoche als hinreichend in Ruhe angenommen. „Hinreichend“ bedeutet hier: im Rahmen der erzielbaren Messgenauigkeit.

Die zunehmende Automatisierung von Messsystemen und die Erhöhung der möglichen Messfrequenzen (z.B. bis zu 10 Hz bei einem modernen Tachymeter und bis zu 100 Hz bei einem GNSS-Empfänger) ermöglicht den Übergang von der epochenweisen zur zeitkontinuierlichen Erfassung von Veränderungen am Bauwerk (Abb. 9). Hierbei sind nun auch signifikante Bewegungen des Messobjektes während des Messvorganges zulässig, wie z.B. bei der Bestimmung von Brückenschwingungen mittels Beschleunigungsaufnehmern. Moderne zeitkontinuierliche Messsysteme decken prinzipiell das gesamte Spektrum an interessierenden Bewegungen und Ausschnitten des Bauwerks ab. Hierzu zählen lokale Messungen an Fugen mittels Dehnungsmessstreifen bis hin zur permanenten Beobachtung von großräumig angelegten Punktfeldern mit TPS- oder GNSS-Sensoren. In diesem Zusammenhang erfolgt zunehmend nicht nur die Beobachtung von Bauwerksdeformationen, d.h. der Reaktionen des Bauwerks, sondern ebenfalls der als ursächlich angenommenen Einflussgrößen. Die häufig auch als Trigger bezeichneten Einflussgrößen können z.B. äußere thermische und hydromechanische Belastungen des Bauwerks sein (Abb. 9). Eine wesentliche Zielsetzung ist hier, die am Bauwerk vorliegenden kausalen Deformationsprozesse und dessen „Normalverhalten“ besser zu verste-

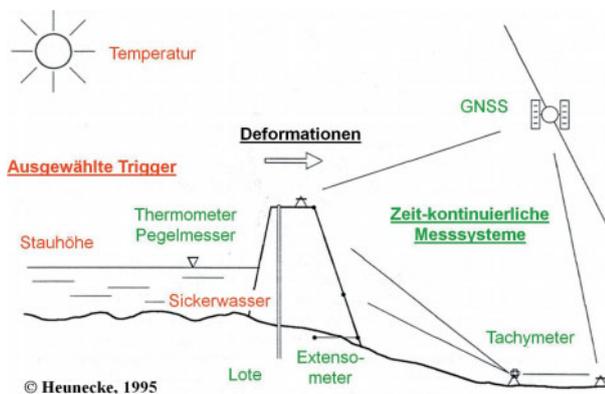


Abb. 9 | Zeit-kontinuierliche Messsysteme

hen, Prognosen für das zukünftige Verhalten zu treffen und damit auch die Beurteilung des Risikos für ein Versagen zu verbessern.

In diesem Zusammenhang ist auch die zunehmende Kombination von „klassisch geodätischen“ Sensoren (z.B. Tachymeter, Nivelliere, GNSS-Sensoren) und geotechnischen Sensoren (z.B. Inklinometer, Extensometer) zu beobachten. Wie in Abb. 10 anhand eines Systems zur Überwachung von Massenbewegungen im Tagebau dargestellt ist /Oasys 2006/, besteht die messtechnische Komponente moderner Monitoring-systeme im Allgemeinen aus unterschiedlichen Sensorgruppen:

- Sensoren zur Erfassung von Triggern (z.B. Niederschlag / Feuchte, Luftdruck, Lufttemperatur),
- geodätische Sensoren (z.B. GNSS, TPS) und
- geotechnische Sensoren (z.B. Inklinometer, Neigungsmesser, Extensometer, seismische Aufnehmer).

Die Messdaten werden zentral erfasst und gespeichert. Neben der Aufbereitung und Verwaltung der z.T. sehr großen Datenmengen ist eine wesentliche Herausforderung mit der sinnvollen Kombination der in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen vorliegenden Messdaten zu einem schlüssigen Gesamtbild des Bauwerksverhaltens gegeben. Man bezeichnet dies auch als die Multi-Skalenproblematik. An dieser Stelle ist neben der Weiterentwicklung der Sensorik auch eine Weiterentwicklung der Auswertemodelle für Überwachungsmessungen erforderlich.

5 AUSWERTEMODELLE

Wie bereits in Abschnitt 4 kurz dargelegt wurde, muss mit der Entwicklung der Sensorik auch eine Weiterentwicklung der Auswertemodelle für Überwachungsmessungen erfolgen. Generell lassen sich die Sichtweisen bei der Modellierung des Bauwerksverhaltens in eine „deskriptive“ und eine „kausale Sichtweise“ unterteilen. Bei der deskriptiven Sicht auf das Bauwerk erfolgt die Modellierung von dessen Zustandsänderungen

- rein geometrisch beschreibend,
- ohne explizit nach den ursächlichen Einflussgrößen zu fragen, bzw. diese messtechnisch zu erfassen.

Deskriptive Auswertemodelle liegen dann mit Kongruenzmodellen (z.B. der Vergleich von aus verschiedenen Messepochen abgeleiteten Netzgeometrien) und kinematischen Modellen vor, siehe z.B. /Pelzer 1985/, /Welsch et al. 2000/ und /Niemeier 2008/. Letztere beinhalten auch die Bewegungen, wie z.B. die translatorischen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Objektpunkten.

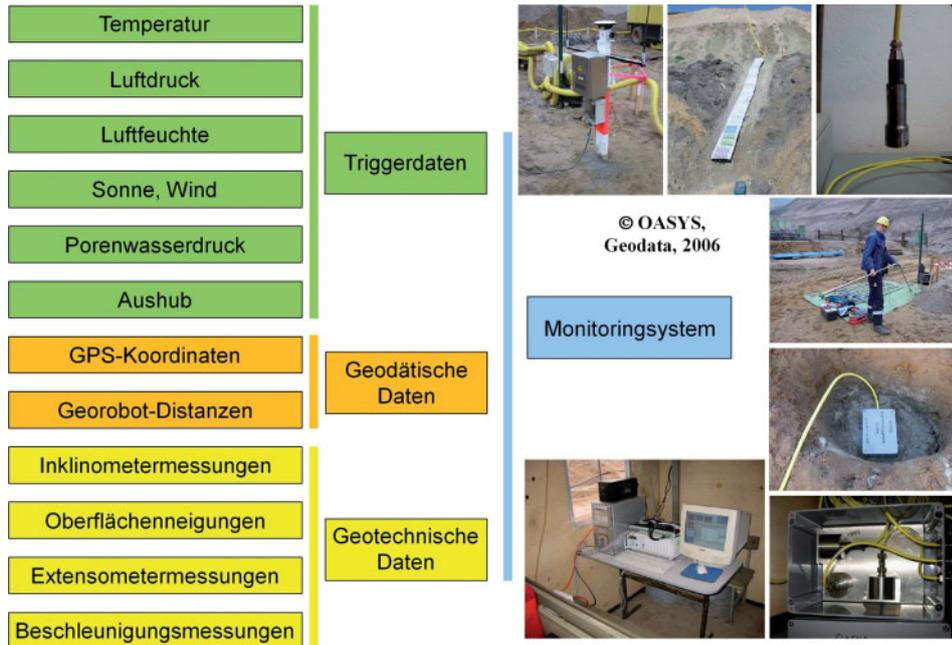


Abb. 10 | Geodätische und geotechnische Sensoren

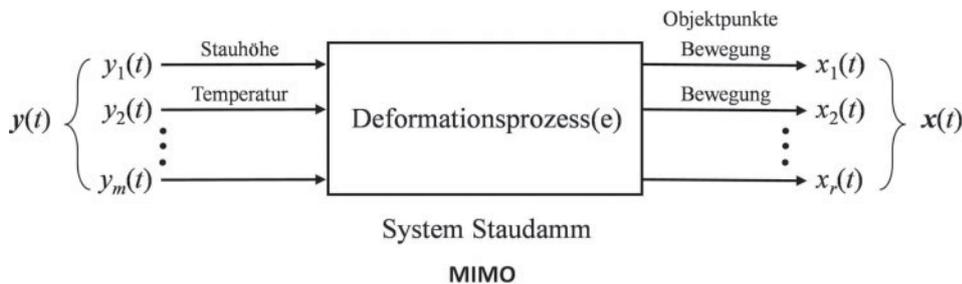


Abb. 11 | Kausale Betrachtung von Deformationsprozessen

- Bei einer kausalen Sicht auf das Bauwerk werden relevante Einflussgrößen explizit in die Modellbildung mit einbezogen
- und direkt oder zumindest indirekt erfasst.

Das Verhalten des Bauwerks wird hier als ein System mit einem Eingang y (Einflussgrößen) und einem Ausgang x (Deformationsgrößen) betrachtet (Abb. 11), während bei der deskriptiven Sicht nur der Ausgang x betrachtet wird.

Je nachdem, ob die Reaktion des Bauwerks auf statische oder dynamische Belastungen untersucht werden soll bzw. welche Vorkenntnisse über das Bauwerk vorhanden sind, werden unterschiedliche kausale Auswertemodelle genutzt /Welsch et al 2000/. Hierzu zählen

- die parametrischen Bauwerksmodelle, welche die physikalische Struktur des Bauwerks abbilden (im Allgemeinen numerische Modelle wie z.B. statische Finite Elemente) und
- die nichtparametrischen Bauwerksmodelle, welche den kausalen Zusammenhang zwischen den Einfluss- und den Deformationsgrößen über Regressions- oder Korrelationsbeziehungen herstellen (z.B. Gewichtsfunktionen, Künstliche Neuronale Netze, etc.).

Eine große Herausforderung liegt in der Verknüpfung von kausalem Modell und der am Bauwerk durchgeführten Messungen im

Rahmen einer integrierten Auswertung. In diesem Zusammenhang ist gerade die Bestimmung der Modellparameter aus den Überwachungsmessungen als Teil der experimentellen Identifikation des Modells ein Gegenstand der aktuellen Forschung in der Ingenieur-geodäsie.

Das nachfolgende Beispiel einer integrierten Auswertung bezieht sich nochmals auf die bereits im Abschnitt 1 eingeführte Saaldecke des Theaters „Ronacher“ in Wien.

Neben der deskriptiven Betrachtung der vertikalen Bewegung von repräsentativen Punkten der Saaldecke (Abb. 2) erfolgt auch eine kausale Betrachtung, nämlich die Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Änderungen des Temperaturgradienten zwischen Dachstuhl und Zuschauerraum und der thermischen Verformung der Decke. Einige Ergebnisse der Modellierung sind in Abb. 12 dargestellt. Das dynamische Verhalten der Decke wird hier als Feder-Dämpfungs-System abgebildet, welches durch den Temperaturgradienten ΔT getriggert wird /Eichhorn 2009/. Die a priori unbekanntes Modellparameter (Federparameter γ und Dämpfungsparameter β) können mit Hilfe der Monitoringdaten in einer Modellkalibrierung bestimmt werden. Die Modellkalibrierung erfolgt in diesem Fall durch ein adaptives Kalman-Filter u.a. /Eichhorn 2005/, in welchem die gesuchten Parameter im Sinne der Ausgleichsrechnung optimal aus den Messdaten geschätzt werden. Das identifizierte Modell ermöglicht die Prädiktion des Deckenverhaltens

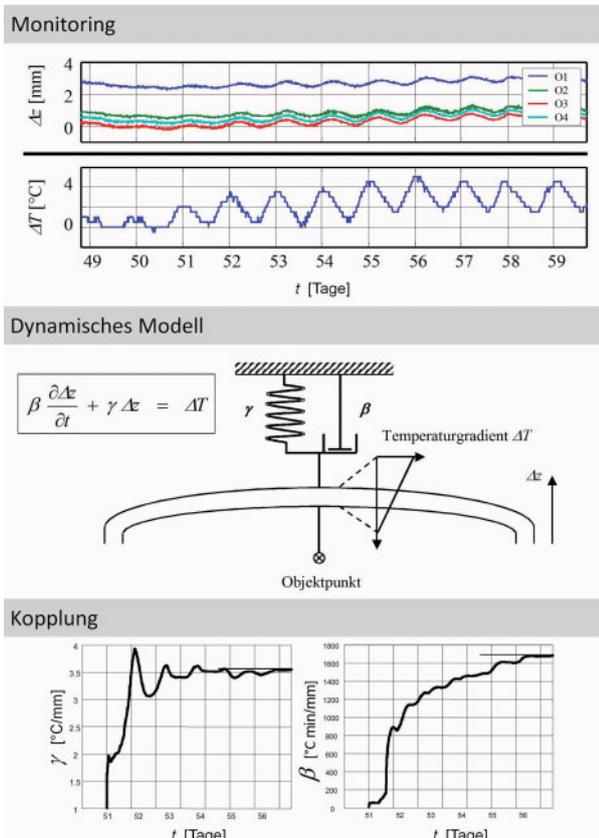


Abb. 12 | Beispiel: Dynamisches Modell von thermischen Deformationen

aufgrund von Temperaturmessungen und die realitätsnahe Simulation von thermischen Lastfällen. Es können damit also auch weiterführende theoretische Experimente mit der Decke durchgeführt werden. Dies trägt maßgeblich zum Verständnis des Deformationsverhaltens bei.

6 AUSBLICK UND TENDENZEN

Eine Weiterentwicklung des Bauwerksmonitorings vollzieht sich derzeit sowohl im Bereich der Sensorsysteme (inkl. der Sensorkommunikation, der Datenverwaltung bzw. -repräsentation) als auch im Bereich der Auswertemodelle (Abschnitte 4 und 5). Als einige wichtige Aspekte sind hierbei

- der Einsatz von innovativer Sensorik wie z.B. terrestrische Radarsysteme (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR), faseroptische Sensoren, Image Assisted Total Stations (IATS), kamerabasierte Systeme zur Verfolgung von Bewegungen (Optical Tracking Systeme),
- der Aufbau von (Geo-) Sensornetzen (z.B. Ad-hoc-Netzwerke mit vielen räumlich verteilten und miteinander kommunizierenden Low-Cost-Sensoren),
- der Einsatz von wissensbasierten Systemen und Methoden der Künstlichen Intelligenz,
- die Kombination der messtechnischen Überwachung mit numerischen Modellen des Bauwerks im Rahmen einer integrierten Auswertung und

der Übergang von der punkweisen zur flächenhaften bzw. in Kombination mit numerischen Modellen vielleicht sogar „raumkontinuierlichen“ Beobachtung des Bauwerkes

zu nennen. Für einige der o.g. Ansätze liegen bereits prototypische Entwicklungen vor.

Als repräsentatives Beispiel für die flächenhafte Erfassung von Deformationen kann die terrestrische Mikrowelleninterferometrie herangezogen werden. Mit Hilfe von GB-SAR kann das Verhalten von ausgedehnten Objekten – wie z.B. Massenbewegungen (Abb. 13) – mit einer hohen zeitlichen Auflösung flächenhaft erfasst und in Kombination mit einem DGM dreidimensional visualisiert werden



Abb. 13 | Monitoring mit GB-SAR

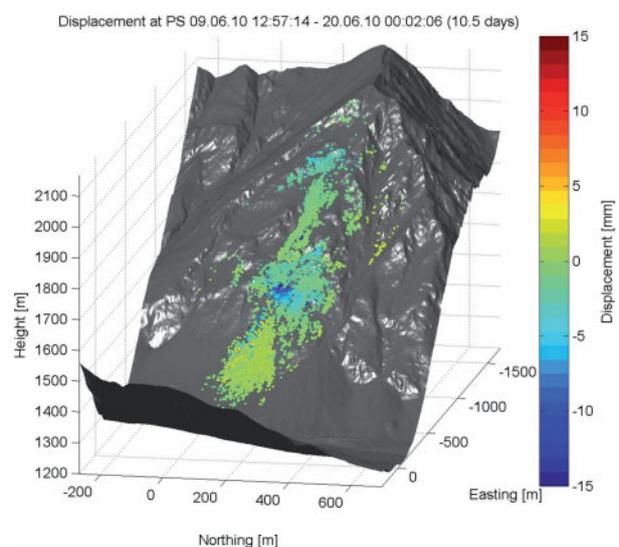


Abb. 14 | Ergebnisse von GB-SAR

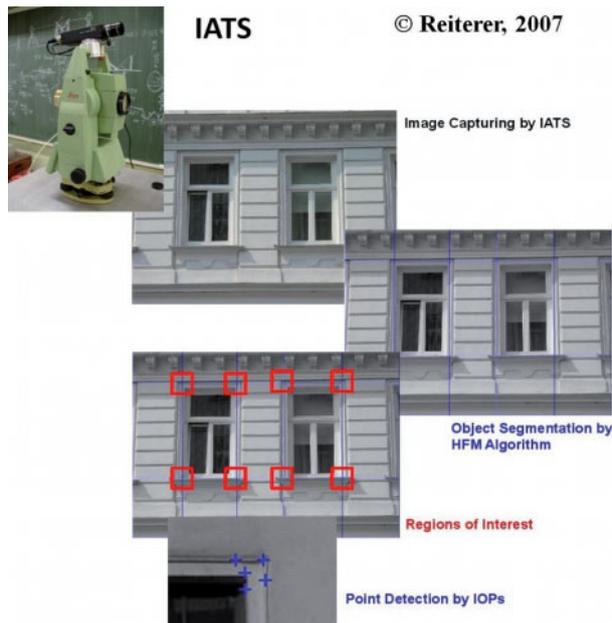


Abb. 15 | Image Assisted Total Station (IATS)

(Abb. 14). Die Integration der flächenhaften Messdaten in ein numerisches Modell der Massenbewegung wird derzeit in einem Forschungsprojekt untersucht, u.a. /Schmalz et al 2010/.

Eine Zusammenführung von Tachymetrie und Photogrammetrie auf der Grundlage von Methoden der künstlichen Intelligenz wird z.B. mit der Entwicklung der Image Assisted Total Station (IATS, Abb. 15) angestrebt. Die Totalstation ist in der Lage, selbstständig für Deformationsmessungen geeignete, nicht signalisierte Objektpunkte an Strukturen zu extrahieren (z.B. die Fensterecken an einer Fassade) und bei Folgemessungen reproduzierbar anzuzielen /Reiterer 2007/.

Optical Tracking Systeme auf Basis von Infrarotkameras sind in der Informatik bereits fest etabliert, u.a. im Bereich der Verfolgung von menschlichen Bewegungen (Human Motion Tracking) und der Augmented Reality. In der Ingenieurgeodäsie werden derzeit Forschungsstudien zum Einsatz der Augmented Reality im Tunnelbau durchgeführt. Für den Ingenieur relevante Informationen, wie z.B. der geologische Schnitt der aktuellen Ortsbrust (Abb. 16) könnten dann bei georeferenzierter Position und Blickrichtung der Helmkamera in dessen Gesichtsfeld eingeblendet werden /Chmelina 2009/. Eine Limitierung des Einsatzes von Optical Tracking Systemen ist durch die derzeit noch sehr beschränkten Messräume gegeben. Mit einem Standardsystem sind nur einige Meter erreichbar.

LITERATUR

Brückenweb (2011): Datenbank von historischen und modernen Brückenbauwerken. URL: <http://www.brueckenweb.de>. Datum der Recherche: 05.09.2011.

Brunner, F.K. ; Woschitz, H. (2011): Über die Erweiterung des ingenieurgeodätischen Monitorings. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 6/2011: 212-218.

Chmelina, K. (2009): Monitoring und Alarmierung bei aktuellen städtischen Tunnelprojekten. In: Proceedings 1. Darmstädter Ingenieurkongress – Bau und Umwelt, TU Darmstadt, III.1.



Abb. 16 | Augmented Reality

Eichhorn, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 585.

Eichhorn, A. (2009): Untersuchung des Deformationsverhaltens einer weitgespannten Saaldecke in einem Wiener Theater. In: Beiträge zum 85. DVW-Seminar „Zeitabhängige Messgrößen – Verborgene Schätze in unseren Daten“, DVW Schriftenreihe, Band 59/2009. Wißner Verlag: 95-114.

ETHLife (2011): Newsletter der ETH Zürich. URL: http://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/101008_Ungarn_su/index. Datum der Recherche: 06.09.2011.

Lienhart, W. (2007): Analysis of Inhomogenous Structural Monitoring Data. Engineering Geodesy, TU Graz, Shaker Verlag.

Lienhart, W. ; Brunner, F.K. (2007): Integrierte Auswertung von inhomogenen Überwachungsdaten am Beispiel einer monolithischen Brücke. In: Brunner, F.K. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2007, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz. Wichmann Verlag: 295-309.

Niemeier, W. (2007): Monitoring – was ist der Beitrag der Geodäsie? In: Brunner, F.K. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2007, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz. Wichmann Verlag: 215-230.

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Verlag Walter de Gruyter, Berlin.

Oasys (2006): Final Technical Report, part: Instrumentation at Rheinbraun. GEODATA, TU Vienna.

Pelzer, H. (1985): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Wittwer-Verlag, Stuttgart.

Pelzer, H. (1988): Ingenieurvermessung: Deformationsmessungen, Massenberechnung. Ergebnisse des Arbeitskreises 6 des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) e.V. Wittwer Verlag, Stuttgart.

Reichsbrücke (2011): Homepage der Firma arsenal research. URL: <http://www.reichsbruecke.net/index.php>, Datum der Recherche: 05.09.2011.

Reiterer, A. (2007): The development of an online knowledge-based videoteodolite measurement system. *Journal of Knowledge-Based Systems*, Vol. 20, 73-85.

Rödelsperger, S. et al. (2010): Terrestrische Mikrowelleninterferometrie – Prinzip und Anwendungen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 10/2010: 324-333.

Schmalz, T. ; Buhl, V. ; Eichhorn, A. (2010): An adaptive Kalman-filtering approach for the calibration of finite difference models of mass movements. *Journal of Applied Geodesy (JAG)*, Vol. 4, No. 3, 127-135.

Stadtarchiv (2011): Homepage der Süddeutschen Zeitung. URL: <http://www.sueddeutsche.de/panorama/einsturz-des-koelner-stadtarchivs-reuige-verkehrsbetriebe-1.18384>. Datum der Recherche: 05.09.2011.

Talsperrennet (2011): Datenbank von Talsperren in Deutschland. URL: <http://www.talsperren.net>. Datum der Recherche: 06.09.2011.

Welsch, W. ; Heunecke, O. ; Kuhlmann, H. (2000): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser, M. u. a. (Hrsg.): *Handbuch der Ingenieurgeodäsie*. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Wikipedia (2011a): Definition des Begriffs „Monitoring“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Monitoring>, Datum der Recherche: 05.09.2011.

Wikipedia (2011b): Liste von Talsperrenunglücken. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Talsperren-Katastrophen>. Datum der Recherche: 05.09.2011.

Wunderlich, T. (2006): Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, VGI, Heft 1+2/2006, 50-62.

AUTOR

Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Petersenstraße 13 | 64287 Darmstadt
eichhorn@geod.tu-darmstadt.de



Manuskript eingereicht: 14.09.2011 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet