

Neue Möglichkeiten in der Bauwerksüberwachung durch integrierte Analyse von Sensormessungen und 3D-Bauwerksmodell

THOMAS BECKER¹, SVEN WEISBRICH¹, FRIEDER EUTENEUER¹, CHENG-CHIEH WU²
& FRANK NEITZEL¹

Zusammenfassung: Die Verwendung offener Standards bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, gerade im Bereich des Datenaustausches, Datenlagerung, aber auch der Interoperabilität. GML und CityGML sind hervorragende Beispiele für die Beschreibung von Realweltobjekten mittels eines offenen Standards wohingegen SensorML dazu dient, Messungen, Sensoren und Messplattformen zu beschreiben. Die Verwendung solcher Standards eröffnet dem Nutzer nicht nur die Möglichkeiten der Verwendung einer gemeinsamen standardisierten Sprache, sondern auch die Nutzung von offenen Servicestandards, wie Web Feature Service (WFS), Web Map Service (WMS) oder von Sensor Observation Services (SOS).

Die Kombination von Geodaten- und Sensorstandards in einer Dienste- und Servicearchitektur geht über bisherige am Markt existierende Lösungen hinaus und schafft eine neuartige Plattform für die Bauwerksüberwachung, die weit mehr als ein simples Datenhaltungsmodell darstellt. Die in diesem Beitrag vorgestellte Plattform ermöglicht eine direkte Integration von Sensordaten sowie deren Bereitstellung durch eine offene Standardsprache. Dabei sind alle Zwischenschritte jederzeit über eine offene Diensteschnittstelle adressierbar und können so verschiedenen Akteuren zur Verfügung gestellt werden. Das große Potential und der Mehrwert eines derartigen Informationssystems liegt vor allem in der permanenten Verfügbarkeit von Mess- und Objektdaten und einer damit verbundenen integrierten Analyse der Sensormessdaten in Kombination mit einem Finite-Elemente-Modell (FEM), basierend auf den Objektdaten. Die automatische Ableitung eines FE-Modells aus dem 3D-Bauwerksmodell, die Visualisierung der FEM-Simulationsergebnisse anhand des Bauwerksmodells, die Bereitstellung von Messrohdaten und Sensorinformationen zu jedem Messzeitpunkt machen die Plattform zu einem universell einsetzbaren Werkzeug im Bereich der Bauwerksüberwachung. In diesem Beitrag werden die einzelnen Bausteine, die verwendeten Standards und die Interaktion der einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem vorgestellt.

1 Einleitung

Eine klassische Anwendung im Bereich der Geodäsie und eine der wichtigsten ingenieurgeodätischen Aufgaben ist die Überwachung von Bauwerken während und nach der Bauphase. Die Überwachung von Bauwerken mittels eines Netzwerkes aus verschiedenen Sensoren hilft, deren Sicherheit ohne den Einsatz großer bautechnischer Überprüfungen einschätzen zu können. Damit ist es möglich, Bauwerke auch weit über ihre geplante Lebensdauer hinweg zu erhalten.

- 1) Thomas Becker, Sven Weisbrich, Frieder Euteneuer, Frank Neitzel, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin; E-Mail: thomas.becker@tu-berlin.de
- 2) Cheng-Chieh Wu, Fachbereich 8.1- Sensorik, mess- und prüftechnische Verfahren Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87 12205 Berlin; E-Mail: cheng-chieh.wu@bam.de

Beispielsweise wird Bauunternehmen eine Gewährleistung für die Betriebsfähigkeit der erstellten Bauwerke abverlangt, die zu überwachen mithilfe von solchen Netzwerken möglich ist. Ohne den Einsatz von Sensornetzwerken können die zuständigen Gutachter bei Ablauf der geplanten Lebensdauer nicht darauf vertrauen, dass das Gebäude auch weiterhin den kontinuierlichen Belastungen gewachsen ist. Somit werden entweder umfangreiche Sanierungen erforderlich oder das Bauwerk muss geschlossen werden.

Die Überwachung basiert auf der Messung von Veränderungen verschiedener Parameter wie zum Beispiel Verformungen, Temperatur oder Feuchtigkeit von Bauteilen oder der Abweichungen von charakteristischen Bewegungsmustern von Bauteilen, gemessen durch Beschleunigungssensoren. Die Parameter werden sowohl punktuell verteilt über das gesamte Bauwerk, als auch ganzheitlich, die Struktur des Bauwerkes miteinbeziehend, erhoben. Besonders nach oder sogar während extremen Ereignissen kann mithilfe bereits installierter Sensornetzwerke der Zustand nahezu in Echtzeit kontrolliert werden. Für die Messungen werden zum einen automatisch kontinuierlich messende Systeme eingesetzt, zum anderen erfolgen manuelle Messungen, deren Ergebnisse manuell in das System eingegeben werden. Eine detailliertere Beschreibung von Gebäudeüberwachungen kann in den Publikationen (BOLLER & STASZEWSKI 2004), (FARRAR & WORDEN 2007), (WELSCH et al. 2000) und (WORDEN & DULIEU-BARTON 2004) gefunden werden.

Neben der Planung und der geodätischen Messung einer Bauwerksüberwachung nimmt die lückenlose Dokumentation sowie die Bereitstellung von Daten, Analysen und Ergebnissen eine zentrale Stellung in diesem Bereich ein. Oftmals müssen Daten konvertiert, umformatiert oder speziell aufbereitet werden, um allen Anforderungen der beteiligten Akteure des Bauvorhabens bzw. für die Überwachung des fertigen Bauwerkes gerecht zu werden. Die Verwendung offener Standards, gerade im Bereich von Webdiensten, stellt eine hervorragende Möglichkeit dar, allen beteiligten Akteuren ein einheitliches, standardisiertes maschinenlesbares Format zur Verfügung zu stellen. Mit den Sensor Web Enablement (SWE¹) Standards der OGC (Open Geospatial Consortium) sind alle Arten von Sensoren, Messumformer und Sensor-Daten-Repositories über das Web auffindbar, zugänglich und nutzbar. Die Verbindung von Sensortechnik, Computertechnik und Netzwerktechnik bietet damit neue Lösungen im Bereich der Anlagensicherheit, Industriesteuerungen, Meteorologie, der geophysikalischen Untersuchung, Hochwasserüberwachung, Risikobewertung, Tracking, Überwachung der Umwelt, Verteidigung, Logistik und vielen anderen Anwendungen.

Neben der Datenanalyse mittels Methoden der Ausgleichsrechnung und der Deformationsanalyse sowie der Simulation mit FEM (Finite-Elemente-Methode), soll eine Lösung zur Bauwerksüberwachung auch die Möglichkeit der visuellen Interpretation bieten. Die visuelle Interpretation gliedert sich hierbei in die Darstellung der Messdaten und die Darstellung der Analyseergebnisse. Während für die Darstellung der Messdaten eine Aufbereitung in Tabellen, Diagrammen oder Textform hinreichend ist, erfordert die Darstellung der Analyseergebnisse auch die Einbeziehung des Bauwerks selbst sowie die Darstellung der Auswirkungen auf das Bauwerk.

¹ <http://www.opengeospatial.org/standards/>

Der Austausch von Daten mit beteiligten Akteuren impliziert auch hier die Verwendung offener Standards. Die Heterogenität der zu kontrollierenden und überwachenden Bauwerke erfordert deshalb einen Standard, der die größtmögliche Modellierungsabdeckung an Bauwerken ermöglicht und gleichzeitig bei Ämtern und anderen Akteuren Verwendung findet. Der internationale Standard CityGML (GRÖGER et al. 2012) in seiner aktuellen Version 2.0.0 bietet sich hier hervorragend an. CityGML erlaubt die Modellierung von Gebäuden, Brücken und Tunneln (LÖWNER et al. 2012), (LÖWNER et al. 2013) und deckt damit einen Großteil der ingenieurgeodätisch zu überwachenden Bauwerke ab.

In diesem Beitrag wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die einzelnen Komponenten und Anforderungen, wie Sensormessungen, FEM und 3D-Bauwerksmodell, miteinander verzahnt werden und somit neue Möglichkeiten im Bereich der Bauwerksüberwachung schaffen.

2 CityGML - ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle

Die City Geography Markup Language (CityGML) (GRÖGER et al. 2012) als internationaler Standard für die Darstellung und den Austausch von semantischen 3D-Stadtmodelle gibt Klassen und Beziehungen für die wichtigsten Stadtobjekte in einem objektorientierten Weg vor. Zudem sind geometrische, topologische und semantische sowie Darstellungseigenschaften, Generalisierungs- und Aggregationshierarchien zwischen Objektklassen sowie thematische Beziehungen zwischen Stadtobjekten enthalten. Der Standard definiert ein gemeinsames Informationsmodell und Datenaustauschformat für 3D-Stadt- und Landschaftsmodelle. Die thematischen Informationen von CityGML gehen weit über die einfache 3D-Visualisierung hinaus und sind somit für anspruchsvolle Analyseaufgaben in unterschiedlichen Anwendungsdomänen wie Simulationen, Stadt-Datamining, Facility Management, und thematische Anfragen geeignet. Objekte, die nicht ausdrücklich im Spezifikationsdokument behandelt werden, können mit dem Konzept der generischen Objekte und Attribute oder durch die Definition einer Erweiterung für bestimmte Anwendungen über die so genannte Application Domain Extension (ADE) (LÖWNER et al. 2013) integriert werden.

CityGML erlaubt die Modellierung einer Vielzahl von Objekten des urbanen Raumes. Insbesondere interessant für die Bauwerksüberwachung sind die Module Building, Bridge und Tunnel. Diese drei Module sind in ihrer semantischen und ontologischen Modellierung sehr ähnlich strukturiert. Alle drei Module erlauben explizit die Modellierung von Objekten in den 4 Level of Detail (LOD) Ausprägungen und unterscheiden ebenfalls zwischen ganzen Objekten (z.B. *Building*) und zugehörigen Teilen (z.B. *BuildingPart*). Die Strukturierung der Objekte in einzelne Komponenten wie Außen- und Innenflächen bietet gerade im Bereich der Bauwerksüberwachung die Möglichkeit, nicht nur das gesamte Objekt zu betrachten und zu analysieren, sondern auch die Auswirkungen von Setzungen oder anderen Bewegungen auf einzelne Gebäudebestandteile zu beziehen und diese auch zu visualisieren.

Für die Speicherung und Verwaltung von Stadtobjekten stehen zwei verschiedene Encodings (Datenbanklösungen) zur Verfügung. Während die eine auf Oracle Spatial (NAGEL & STADLER 2008), (STADLER et al. 2008) beruht, wird die andere in PostGIS / PostgreSQL (KUNDE 2013) abgebildet. Beide Lösungen können über den Importer / Exporter Daten lesen oder schreiben und ermöglichen so den Import / Export von CityGML, KML und Shape-Files.

3 Sensornetzwerke und OGC SWE Framework

Im Englischen wird oft der Begriff des Sensor Web verwendet, dessen Bedeutung über die des Sensornetzwerkes hinausgeht. Um die beiden Begriffe eindeutig voneinander zu unterscheiden, wird im Folgenden von Sensornetzwerken und von einem Sensor-Web gesprochen. Das Sensor-Web besteht aus Sensoren, die ebenfalls miteinander verbunden sind, aber auch über das Internet erreichbar sind. Es stellt somit eine Erweiterung des bloßen Netzwerkes dar, weil über das Internet Sensoren verschiedener Netzwerke miteinander verbunden werden können. Die erfassten Daten der Sensoren werden über das Internet verfügbar gemacht und können über Standardprotokolle oder einer sogenannten API (Application Programming Interface) abgerufen werden (BRÖRING et al. 2011), (BOTTS et al. 2008), (GUINARD & TRIFA 2009).

In Bereichen, deren wissenschaftliche Ausrichtung die Überwachung von räumlich größeren Objekten ist, halten seit einigen Jahren verstärkt Sensornetzwerke Einzug. Für die Realisierung derartige Sensornetzwerke müssen teilweise neue Methoden entwickelt werden, um z.B. die Stromversorgung im Feld sowie die Datenübertragung über große Entfernungen hinweg sicherzustellen. Zudem muss die Funktionsfähigkeit des Sensornetzwerkes auch unter widrigsten Witterungsbedingungen gewährleistet werden. Anders als bei den bereits weit verbreiteten Sensortechniken, die der Überwachung von relativ kleinen technischen Objekten dienen, müssen bei der Überwachung von Gebäuden die Sensoren an teilweise sehr schwer zugänglichen und voneinander weit entfernten Positionen angebracht werden. Die Wahl einer Technologie, die für die Kommunikation die bereits bestehende Infrastruktur des Internets nutzen kann, umgeht das Problem komplizierter Verkabelung.

3.1 Sensornetzwerke

Sensornetzwerke sind räumlich verteilte Sensoren, die miteinander verbunden sind und über einen Computer gesteuert werden können (BOTTS et al. 2008). Der Vorteil eines derartigen Netzwerkes liegt darin, dass Datenströme gebündelt werden können, die Messdaten durch eine Homogenisierung der Datentypen vergleichbar gemacht werden und der Wartungsaufwand für das Komplettsystem verringert wird (RESCH 2012), (BERMUDEZ 2011).

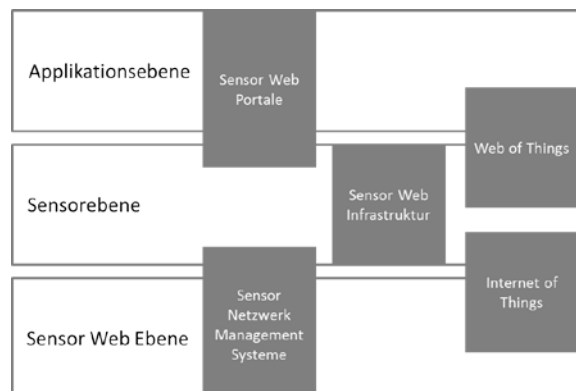


Abb. 1: Ebenen des Sensor Web und Einsortierung von relevanten Begriffen nach BRÖRING et al. 2011

Werden Sensoren in einem Netzwerk organisiert, können durch eine Software automatisch Messungen von den Sensoren durchgeführt werden. Klassischerweise gehört dazu das Messen selbst, das Speichern der Daten und gegebenenfalls die Auswertung der Daten und damit verbunden eine mögliche Ereigniserkennung (GOLATOWSKI et al. 2003). Das Sensor Web kann als Kommunikationsebene zwischen den Sensoren und der die Daten nutzenden Software gesehen werden. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Ebenen der Architektur und ordnet in dem Zusammenhang häufig genannte Begriffe ein. In der Sensorebene ist die eigentliche Sensorhardware organisiert und die Kommunikation mit den Nutzern der Systeme wird über die Applikationsebene realisiert.

3.2 OGC Sensor Web Enablement

Das Sensor Web Enablement (SWE) ist eine Initiative des OGC und beinhaltet die Beschreibung verschiedener Standards zur Vernetzung von Sensoren im Web (BOTTS et al. 2008), (BERMUDEZ, 2011). Das SWE dient nicht nur zur Verknüpfung von Sensoren und zum Aufbau eines Netzwerkes, sondern es ermöglicht, Sensoren in das Web zu integrieren. Die Architektur des SWE beinhaltet Lösungen, um Sensoren im Web zu finden und zu beschreiben, um die gemessenen Daten zu lesen und um die Sensoren zu steuern (BOTTS et al. 2008), (BRÖRING et al. 2011). Das OGC SWE bietet mit seinen einzelnen Bausteinen des Sensor Web folgende Funktionalitäten (BOTTS et al. 2008), (BRÖRING et al. 2011):

1. Discover - als Tätigkeit rund um das Suchen und Finden von Daten im Web. Diese Funktionalität soll das Finden der Messdaten und der Sensoren ermöglichen und vereinfachen.
2. Describe Sensor - diese Funktion liefert Metadaten zu den Sensoren, wie etwa deren generelle Eigenschaften, Arbeitsweise und Genauigkeit.
3. Get Data - üblicherweise enthalten Webservices die mit Daten arbeiten eine Funktion, die GetData benannt ist. Mit dieser Funktion werden die angebotenen Daten abgefragt.
4. Sensorplanning - um überhaupt Messergebnisse erhalten zu können, muss die Arbeit der Sensoren geplant, beziehungsweise angewiesen werden. Dies geschieht mit Hilfe dieser Funktion.
5. Sensor registration - diese Funktion ermöglicht es, passiv alle Ereignisse, die der jeweilige Sensor erfasst, abzufragen.

4 Architektur

Die Architektur des Systems soll die einzelnen Komponenten derart integrieren, dass ein Austausch von Daten zwischen den einzelnen Komponenten möglich wird, aber auch der Austausch zu externen Partnern über standardisierte Schnittstellen erfolgen kann, was gerade im Hinblick auf die INSPIRE²-Richtlinie und den Austausch von Geodaten zukünftig eine große Rolle spielen wird. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, können die Messdaten der Sensoren in einer auf PostGIS basierenden Datenbank gespeichert werden oder unter Verwendung des 52° north frameworks³ ebenfalls in einer PostGIS oder Oracle Datenbank. Das Softwaretool istSOS⁴ stellt

² <http://inspire.ec.europa.eu/>

³ <http://52north.org/communities/sensorweb/>

⁴ <http://istgeo.ist.supsi.ch/software/istsos/istsos.html>

ein Encoding des Sensor Observation Service Standards⁵ des OGC-SWE⁶ Frameworks dar. istSOS ist ein Python Encoding und erlaubt die Verwaltung und die Auslieferung von Sensormessungen entsprechend des Sensor-Observation Standards.

Das 52° north framework stellt ebenfalls ein Encoding einer Vielzahl von Standards des OGC-SWE Frameworks dar und implementiert neben SOS, den SAS (Sensor Alert Service), SES (Sensor Event Service), SPS (Sensor Planning Service) und WNS (Web Notification Service) (BRÖRING et al. 2011). Beide Encodings ermöglichen explizit die Integration von Sensorbeobachtungen mittels CSV oder XML-Dokument in die Datenbank und stellen die in der Datenbank zur Verfügung stehenden Messdaten dann in einem OGC-konformen Austauschformat zur Verfügung. Im Sinne einer Dokumentation sind bereits durch diese Lösung die Rohmessdaten für jeden beteiligten Akteur abrufbar und können für Prüfungen und Analysen verwendet werden.

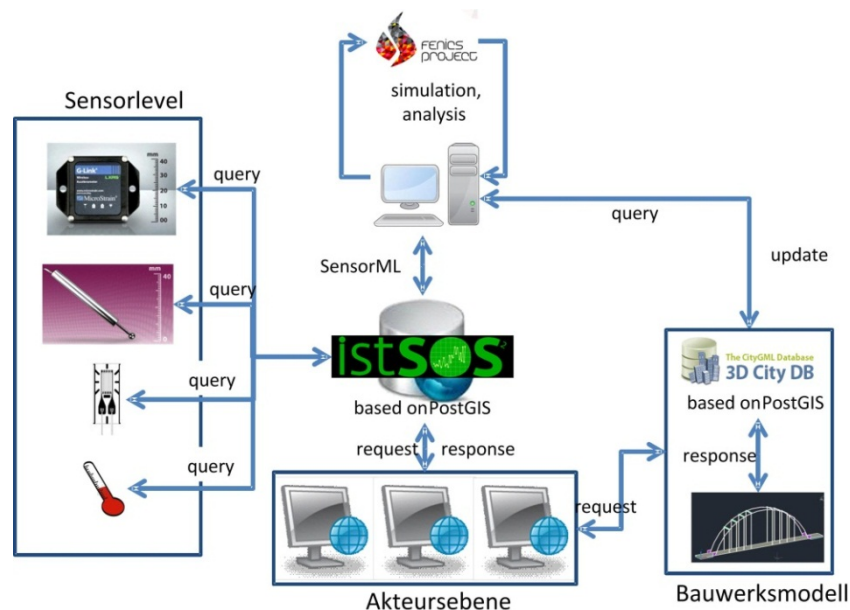


Abb. 2: Konzeption der Systemarchitektur (Abbildungen unterliegen dem Copyright von © microstrain.com, © istgeo.ist.supsi.ch/software/istsos/, © 3dcitydb.org, © fenicsproject.org)

Der Architekturansatz sieht darüber hinaus vor, dass eine zweite Datenbank für die Speicherung des 3D-Bauwerksmodells existiert, die dem CityGML-Schema folgt und als PostGIS oder Oracle Encoding⁷ frei zur Verfügung steht. Die Bauwerksmodelle können ebenfalls über die am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin entwickelte Importer / Exporter Software⁸ ein- oder ausgespielt werden. Die Dateien können als KML, CityGML oder Collada Dateien den einzelnen Akteuren zur Verfügung gestellt werden.

⁵ <http://www.opengeospatial.org/standards/sos>

⁶ <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>

⁷ <http://www.3dcitydb.org/3dcitydb/welcome/>

⁸ <http://www.3dcitydb.org/3dcitydb/3dimpexp/>

Darüber hinaus wird an Lösungen⁹ gearbeitet bzw. Lösungen sind bereits vorhanden¹⁰, die Bauwerksmodelle über OGC-konforme Schnittstellen bzw. Dienste abrufbar macht. Damit sind sowohl die Sensordaten und -beobachtungen standardisiert abrufbar und können in einem Integrationsprozess für die Finite-Elemente-Analyse aufbereitet werden, die im folgenden Kapitel beschrieben wird. Die Ergebnisse der Simulation können dann direkt browserbasiert in 3D dargestellt werden und mittels einer Update-Funktion auch als neuer Bauwerkszustand in die Bauwerksdatenbank zurückgeführt werden. Die Bereitstellung von einheitlichen Zeitstempeln erlaubt es jederzeit, die Bauwerkszustände mit den entsprechenden Sensormessungen in Relation zu setzen und somit eine lückenlose Dokumentation des Bauwerkszustandes zu erreichen.

5 Integrierte Analyse der Sensordaten auf Grundlage eines Finite-Elemente-Modells (FEM)

Heutzutage beruht in der Geodäsie die Auswertung von Überwachungsmessungen von Ingenieurbauwerken auf einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren, wie z.B. Tachymeter, GPS, Neigungssensoren, faseroptische Sensoren (FOS), Dehnmessstreifen (DMS) etc., deren Messstellen sich an unterschiedlichen Positionen am Bauwerk befinden. Eine gemeinsame Auswertung dieser räumlich und zeitlich verteilten hybriden Messungen kann nur auf Grundlage eines mechanischen Bauwerkmodells erfolgen, wie z.B. (TESKEY 1988), (JÄGER 1988) und (LIENHART 2007) aufzeigen. Die Grundlagen einer derartigen Analyse ist z.B. in (NEITZEL et al. 2014) zu finden und beruht auf der Lösung des mechanischen Bauwerkmodells durch die Methode der Finiten Elemente. Für das zu untersuchende Bauwerk muss dafür ein entsprechend detailliertes geometrisches Modell vorliegen.

In vielen Ingenieurwissenschaften, wie z.B. dem Bauingenieurwesen, beruht dabei die geometrische Modellierung vorwiegend auf Planungsunterlagen, die meist dem realen Bauwerk nicht entsprechen. Zum einem ist es fast unmöglich, ein Bauwerk exakt nach Plan zu errichten, was sich z.B. in Materialparametern zeigt, die nicht den Planungsvorgaben entsprechen. Zum anderen treten durch Alterungsprozesse und äußere Einflüsse immer wieder Deformationen während der Lebenszeit eines Bauwerks auf. Zusammen mit weiteren Einflüssen führen diese Deformationen in der Regel zu großen Unterschieden zwischen den Ergebnissen der FE-Modellrechnungen und den realen Messwerten. Dem wird zumeist durch einen iterativen Prozess begegnet, in dem das FE-Modell solange angepasst wird, bis der Unterschied zu den realen Messwerten möglichst klein wird.

Zudem müssen die Sensorpositionen bei der Erstellung des FE-Modells als Knotenpunkte berücksichtigt werden, da sonst kein direkter Vergleich der FE-Simulationen und den realen Messwerten durchgeführt werden kann. Eine integrierte Analyse hybrider Messdaten basierend auf den Methoden der FE-Analyse ist momentan schwer realisierbar und vor allem kaum automatisierbar, da kommerzielle Softwareprodukte in der Regel keinen Zugriff auf die interne Datenprozessierung gewähren, so ist z.B. die so genannte Steifigkeitsmatrix nicht verfügbar.

⁹ http://www.virtualcitysystems.de/fileadmin/pdf/events/2_konferenz-digitale-staedte-2013/03_3D-Geodateninfrastrukturen_auf_Basis_der_3DCityDB.pdf

¹⁰ <http://wiki.deegree.org/deegreeWiki/deegree3/deegree3D>

Das vorgestellte System zur Bauwerksüberwachung ermöglicht hingegen, aus dem vorhandenen 3D-Bauwerksmodell und den Sensorpositionen zusammen mit den Sensordaten zu bestimmten Zeitpunkten ein FE-Modell automatisch zu generieren, welches im Anschluss für eine integrierte Analyse der hybriden Messdaten verwendet werden kann. Aus dieser Analyse lässt sich für das gesamte Bauwerksmodell der Zustand bezüglich des gewählten Zeitpunktes ermitteln und direkt am Bauwerksmodell visualisieren. Das System ermöglicht, aus wenigen diskreten Messpunkten den Zustand des gesamten Bauwerks auf Grundlage des mechanischen Modells zu ermitteln und gegebenenfalls abzuspeichern, um es mit den Ergebnissen zu anderen Zeitpunkten zu vergleichen. Zudem ermöglicht das vorgestellte System auch den Export des Bauwerksmodells für eine FE-Analyse mit Open-Source-Software, wie z.B. (FENICS 2014) sowie anschließenden Import der Ergebnisse.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden neue Möglichkeiten der Bauwerksüberwachung, Analyse und Simulation aufgezeigt, die maßgeblich auf der Interoperabilität von Systemen / Komponenten basieren. Über die Interoperabilität zwischen Komponenten hinaus wurde bei der Konzeption des Systems die Interoperabilität zu externen Akteuren berücksichtigt, was gerade im Hinblick auf die INSPIRE-Richtlinie und den Austausch von Geodaten zukünftig eine große Rolle spielen wird. Die Kombination von Geodaten- und Sensorstandards in einer Dienste- und Servicearchitektur schafft eine neuartige vielseitige Plattform für die Bauwerksüberwachung, die weit über ein simples Datenhaltungsmodell hinausgeht. Die in diesem Beitrag vorgestellte Plattform ermöglicht eine direkte Integration von Sensordaten sowie deren Bereitstellung durch eine offene Standardsprache. Dabei sind alle Zwischenschritte jederzeit über eine offene Diensteschnittstelle adressierbar und können so verschiedenen Akteuren zur Verfügung gestellt werden. Das große Potential eines derartigen Informationssystems liegt vor allem, in einer integrierten Analyse der Sensordaten auf Grundlage eines Finite-Elemente-Modells (FEM). Die automatische Ableitung eines FE-Modells aus dem 3D-Bauwerksmodell, die Visualisierung der FEM-Simulationsergebnisse anhand des Bauwerksmodells, die Bereitstellung von Rohdaten und Sensorinformationen zu jedem Messzeitpunkt machen die Plattform zu einem universell einsetzbaren Werkzeug im Bereich der Bauwerksüberwachung.

7 Literaturverzeichnis

- BERMUDEZ, L., 2011: OGC sensor web enablement (SWE), September 2011, https://www.evernote.com/shard/s264/sh/06758c15-b4cc-44fc-8440-2d26bf858604/e9e84a61e167e53bd1bc76f339934cc2/res/996f9a2d-4b7d-4670-9b40-3ad1ff6013ae/2011_OGC_Sensor_Web_Enablement.pdf, letzter Zugriff am 30.01.2014
- BOTTS, M.; PERCIVALL, G.; REED, C. & DAVIDSON, J., 2006: OGC® sensor web enablement: Overview and high level architecture. In: Nittel, S.; Labrinidis, A. & Stefanidis, A. (Hrsg.), GeoSensor networks, 175-190. Springer Verlag.
- BOLLER, C. & STASZEWSKI, W. J., 2004: Structural health monitoring. In: Proceedings of the Second European Workshop on Structural Health Monitoring, München, 7-9.

- BRÖRING, A.; ECHTERHOFF, J.; JIRKA, S.; SIMONIS, I.; EVERDING, T.; STASCH, C.; LIANG, S. & LEMMENS, R., 2011: New generation sensor web enablement. *Sensors*, 11(3): 2652-2699.
- FARRAR, C. & WORDEN, K., 2007: An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):303-315.
- FENICS, 2014: <http://fenicsproject.org>, letzter Zugriff am 30.01.2014.
- GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; NAGEL, C. & HÄFELE, K.H., 2012: Open-GIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 2.0.0, OGC 08-007r2
- GUINARD, D. & TRIFA, V., 2009: Towards the web of things: Web mashups for embedded devices. In: *Workshop on Mashups, Enterprise Mashups and Lightweight composition on the Web (MEM2009)*, Madrid, Spain.
- GOLATOWSKI, F.; BLUMENTHAL, J.; HANDY, M.; HAASE, M.; BURCHARDT, H. & TIMMERMANN, D., 2003: Softwarearchitektur für Sensornetzwerke. Technischer Report, Universität Rostock., URL http://www.amd.e-technik.uni-Rostock.de/veroeff/Softwarearchitektur_fuer_Sensornetzwerke.pdf, letzter Zugriff am 30.01.2014.
- JÄGER, R., 1988: Analyse und Optimierung geodätischer Netze nach spektralen Kriterien und mechanischen Analogien, DGK, Reihe C, Nr. 342, München.
- KUNDE, F., 2013: CityGML in PostGIS : Portierung, Anwendung und Performanz-Analyse am Beispiel der 3D City Database von Berlin, Masterarbeit am Institut für Geographie, Universität Potsdam, unveröffentlicht.
- LIENHART, W., 2007: *Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data*, Shaker Verlag, Aachen.
- LÖWNER, M.-O.; BENNER, J.; GRÖGER, G.; GRUBER, U.; HÄFELE, K.-H. & SCHLÜTER, S., 2012: CityGML 2.0 – ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 1: Datenmodell. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 6/2012, 340 - 349.
- LÖWNER, M.-O.; CASPER, E.; BECKER, T.; BENNER, J.; GRÖGER, G.; GRUBER, U.; HÄFELE, K.-H., KADEN, R. & SCHLÜTER, S., 2013: CityGML 2.0 – ein internationaler Standard für 3D-Stadtmodelle, Teil 2: CityGML in der Praxis. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2/2013, 131-143.
- NAGEL, C. & STADLER, A., 2008: Die Oracle-Schnittstelle des Berliner 3D-Stadtmodells, In: Clemen, C. (Hrsg.), *Entwicklerforum Geoinformationstechnik 2008*, Shaker Verlag, 197-221.
- NEITZEL, F.; WEISBRICH, S. & WU, C.C., 2014: Integration der Finite-Elemente-Methode in die Ausgleichsrechnung zur Parameteridentifikation, In: Wieser, A. (Hrsg.), *Ingenieurvermessung 2014, Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich*, Herbert Wichmann Verlag, 301-310.
- RESCH, B., 2012: Standardisierte Geosensornetzwerke für Umweltbeobachtung in naher Echtzeit. 2012., http://www.berndresch.com/download/work/publications/resch_geosensornetzwerke_rt-gis_2013.pdf, letzter Zugriff am 30.01.2014.
- STADLER, A.; NAGEL, C.; KÖNIG, G. & KOLBE, T.H., 2008: Making interoperability persistent: A 3D geo database based on CityGML, In: Lee & Zlatanova (Hrsg.), *3D Geo-Information Sciences, Selected papers from the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information*, Seoul, Korea. LNG&C Series, Springer Verlag, 175-192.
- TESKEY, W.F., 1988: Integrierte Analyse geodätischer und geotechnischer Daten sowie physikalischer Modelldaten zur Beschreibung des Deformationsverhaltens großer Erddämme unter statischer Belastung, DGK, Reihe C, Nr. 341, München.

WELSCH, W.; HEUNECKE, O.; KUHLMANN, H. (2000): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H. (Hrsg.), Handbuch Ingenieurgeodäsie, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

WORDEN, K. & DULIEU-BARTON, J. M., 2004: An overview of intelligent fault detection in systems and structures. Structural Health Monitoring, 3(1), 85-98.