

Ingenieurgeodätisches Monitoring an der Marienkirche Neubrandenburg

Philipp Engel, Karl Foppe und Uwe Köster

Zusammenfassung

Im Rahmen der hochschulinternen Forschung wurde in mehreren studentischen Arbeiten das Bewegungsverhalten des Kirchturms der Marienkirche Neubrandenburg unter der Last der läutenden Glocken messtechnisch erfasst und analysiert. Dabei kamen neben verschiedenen Sensortypen auch Hardware- und Software-Lösungen für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen zum Einsatz, die an der Hochschule Neubrandenburg entwickelt wurden, wie etwa ein freies Monitoring-System. Mit den verwendeten Sensoren des umgesetzten Messaufbaus ließen sich die Frequenzen und Amplituden der durch die einzelnen Glocken verursachten Gebäudeschwingungen bestimmen.

Summary

In the context of university research, the church tower of the St. Mary's Church Neubrandenburg was automatically observed by sensors, to determine the building's movement caused by the church bells. In addition to the usage of various sensor types, hardware and software solutions for geodetic monitoring developed at Neubrandenburg University were used, such as a free and open-source monitoring system. As a result, the frequencies and amplitudes of the movements caused by each of the bells could be identified.

Schlüsselwörter: Ingenieurgeodäsie, Bauwerksmonitoring, Zeitreihenanalyse, Monitoring-Software

1 Einleitung

Die wechselvolle Geschichte der Marienkirche reicht bis zur Gründung der Stadt Neubrandenburg im Jahr 1248 zurück. Die ursprünglich neunjochige und dreischiffige Hallenkirche diente bis zu ihrer Profanisierung im Jahr 2001 als Hauptpfarrkirche Neubrandenburgs (Abb. 1). Sie gilt nicht nur – insbesondere wegen ihres Ostgiebels – als herausragendes Beispiel für die norddeutsche Backsteingotik, sondern seit ihrem Umbau 2001 zur Konzertkirche als Konzertsaal von internationalem Rang. Nach den Zerstörungen des Zweiten Weltkriegs erfolgte die Wiederherstellung des 90 m hohen Kirchturms im Jahr 1983 und wurde letztendlich im Jahr 2007 durch die Installation eines neuen Glockenstuhls mit fünf Glocken endgültig abgeschlossen (Abb. 2).

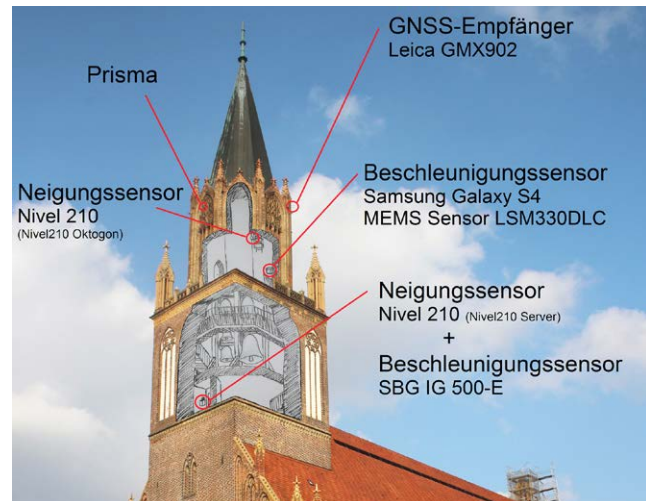


Abb. 1: Sensorenverteilung an der Marienkirche

Das sehr imposante gleichzeitige Läuten der fünf neuen Glocken kann von Besuchern und Betriebspersonal gleichermaßen als deutlich spürbare Gebäudeschwingungen auf dem Turm wahrgenommen werden, was die Frage nach der Standsicherheit des Kirchturms aufwarf. Professionelle Industriekletterer sprachen aufgrund ihres subjektiven Eindrucks im und am Turm von vermeintlich »gefühlten« Bewegungsraten von 10 cm und mehr an der Turmspitze.

Im Jahr 2014 wurde eine Kooperation zwischen der Hochschule und der Stadt Neubrandenburg vereinbart. Seitdem steht die Konzertkirche den Studierenden der Hochschule als reales Untersuchungsobjekt für Forschungsarbeiten zu ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen zur Verfügung, um moderne Technologien zu untersuchen und die an der Hochschule entwickelte Monitoring-Plattform DABAMOS zu optimieren.



Abb. 2: Die Kirchenglocken der Marienkirche

2 Methodik der Überwachungsmessungen

Zur Erfassung von Schwingungen sind sicherlich inertielle Sensoren die erste Wahl, um Längs- und Querbeschleunigungen hochfrequent zu erfassen. Durch die zunehmende Verbreitung von Smartphones kann untersucht werden, inwieweit sich die auftretenden Schwingungen auch mit diesen Geräten aufzeichnen lassen. Als klassische Verfahren zur Messung von absoluten Auslenkungen bieten sich moderne Tachymeter und GNSS-Systeme an. Um in der ingenieurgeodätischen Ausbildung Messverfahren kritisch zu betrachten, die aufgrund des Abgriffsystems eigentlich nicht zur Erfassung dynamischer Schwingungen geeignet sind, wurden auch Neigungssensoren mit Flüssigkeitshorizont als Referenzfläche untersucht. Die in der Marienkirche verwendeten Sensoren sind in Abb. 1 dargestellt.

Die Auswertung erfolgte mittels Schwingungsanalyse durch eine Fourier-Transformation. Dadurch konnte von der Zeitdarstellung in die Frequenzdarstellung übergegangen werden. Ziel war es, die Frequenzen und Amplituden der Turmschwingung mit allen Sensoren mit möglichst ausreichender Genauigkeit zu erfassen (Foppe 2006).

Ein Augenmerk galt der Bestimmung der tatsächlichen Amplituden der Turmbewegung. Während die tachymetrischen Messungen und die mittels GNSS bestimmten Amplitudenspektren direkt die erfassten Amplituden metrisch wiedergeben, sind die gemessenen Beschleunigungen mittels zweifacher Integration in Längsmaße umzuwandeln. Mit den Neigungssensoren werden die Neigungsänderungen im Winkelmaß erfasst, sodass sich generell bei einer Modellierung als vertikaler Kragarm die Berechnung der Auslenkung nach der Bogenformel anbietet. Im vorliegenden Fall ist diese vereinfachte Modellannahme aufgrund der unterschiedlichen Bauphasen des Turms offensichtlich nicht zulässig. Eingezogene Betondecken, Treppenhäuser und andere eingebrachte Verstärkungen erlauben keine einfache Festlegung der Stabachse der Biegelinie und somit des Drehpunktes (Abb. 3). Eine exakte Modellierung mittels FEM oder anderen Methoden war nicht Gegenstand der hier beschriebenen Untersuchungen. Die Amplitudenwerte der Neigungssensoren lassen sich aber durchaus mit den Amplituden der Beschleunigungsmesser vergleichen, da beide Sensoren jeweils auf gleicher Höhe im Turm nebeneinander angebracht wurden.

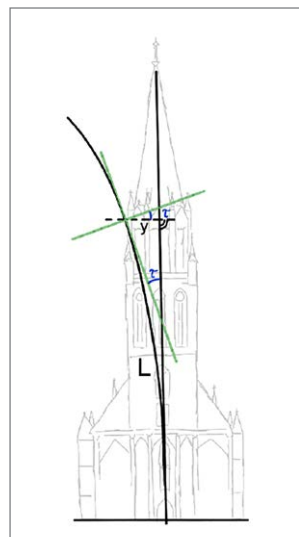


Abb. 3: Theoretische Biegelinie des Kirchturms

3 Praktische Umsetzung

Auch wenn die Marienkirche selbst mittlerweile nur mehr als reines Konzerthaus genutzt wird, gehören die Kirchenglocken der Ev.-Luth. Kirchengemeinde Neubrandenburg St. Johannis. Um Schäden an der Bausubstanz des Kirchturms von vornherein zu vermeiden, erfolgt ein Läuten aller fünf Glocken gleichzeitig nur noch an kirchlichen Hochfesten. Einmal pro Jahr führt die Stadt Neubrandenburg, in der Regel kurz vor Ostern, das sogenannte »Probeläuten« durch, bei dem verschiedene Kontrollmaßnahmen durchgeführt werden, darunter die Begutachtung des Turms durch Industriekletterer während des Läutens aller Glocken.

Das Probeläuten bietet auch eine ideale Gelegenheit für semesterübergreifende Messkampagnen mit den Studierenden der Hochschule. Die Betreibergesellschaft unterstützt diese Arbeiten, indem sie kontrollierte Bedingungen schafft und die Glocken einzeln und in Kombination nach Absprache mit den Verantwortlichen der Hochschule läutet.

Bei den bei der Auswertung detektierten Frequenzen war danach eindeutig zu unterscheiden, ob es sich um anregende Schwingungen (durch die Bewegungen der Glocken selbst im Glockenstuhl hervorgerufen) oder um dadurch angeregte Gebäudeschwingungen (Resonanz oder Oberschwingungen) handelte. Dazu wurden die Glocken während des Läutens mit einer Videokamera aufgezeichnet. Aus den Videoaufnahmen ließen sich die Frequenzen der Bewegungen im Glockenstuhl leicht abzählen. Diese finden sich in den Amplitudenspektren als »kleine Peaks« im Bereich von 0,50 Hz bis 0,38 Hz wieder (Ergebnisse in Abb. 7).

3.1 Monitoring-System

An der Hochschule Neubrandenburg wird unter der Projektbezeichnung »DABAMOS« seit einigen Jahren im Bereich automatisches Deformationsmonitoring geforscht (Engel et al. 2014). Aus diesen Arbeiten sind verschiedene Software-Lösungen für die messtechnische Überwachung von Bauwerken und Geländeabschnitten hervorgegangen. Mit dem *Open Automatic Deformation Monitoring System* (OpenADMS) wurde eine freie und plattformunabhängige Anwendung für die Umsetzung von geodätischen und geotechnischen Überwachungsmessungen entwickelt. Das in Python programmierte Monitoring-System ist kostenfrei, leicht zu erweitern, netzwerkfähig und benötigt nur geringe Hardware-Ressourcen. Dadurch kann die Software auch auf preisgünstigen Einplatinen-Computern, wie dem Raspberry Pi, ausgeführt werden, welche zunehmend für Mess- und Steueraufgaben Verwendung finden (Peci et al. 2014).

Die Architektur der Software basiert auf einzelnen Modulen, die im Rahmen der Überwachungsmessung bestimmte Aufgaben übernehmen, wie etwa Sensorkommu-

nikation oder Koordinatentransformation. Abgesehen von einigen Kernmodulen für die Verwaltung der Konfiguration und den Nachrichtenaustausch können alle anderen Programmteile nach den jeweiligen Anforderungen geladen und kombiniert werden. Auf Basis einer standardisierten Programmierschnittstelle ist es möglich, den Funktionsumfang der Software leicht zu erweitern (Engel und Schweimler 2016). Eine Einbindung beliebiger geodätischer, geotechnischer und meteorologischer Sensoren ist möglich, sofern diese eine offene Schnittstelle besitzen. In den meisten Fällen ist dafür, abgesehen von einer deskriptiven Definition der Sensoreigenschaften, kein weiterer Programmieraufwand notwendig.

Mit OpenADMS lassen sich neben einzelnen Sensor-Stationen auch Sensor-Netzwerke umsetzen. Die Installation und Fernwartung der Sensorknoten erfolgt über eine eigenständige Web-Applikation, die über das MQTT-Protokoll mit den einzelnen Instanzen kommuniziert (Light 2017). Als Datenaustauschformat ist JavaScript Object Notation (JSON) integriert. Das Format ist weit verbreitet, einfacher als XML und kann sowohl vom Menschen gelesen als auch von den meisten Programmiersprachen verarbeitet werden. In Verbindung mit dokumentenorientierten NoSQL-Datenbanken und dynamischen Web-Charts ergibt sich eine universelle Kapselung der erfassten Messdaten, die ohne Konvertierung auskommt.

Die Entwicklung der Monitoring-Software ist noch nicht abgeschlossen, trotzdem wird sie bereits produktiv eingesetzt. Die Überwachung der Kirche bietet dabei die Möglichkeit einer praktischen Untersuchung und fortlaufenden Erweiterung des Systems unter realen Bedingungen.

3.2 Sensornetzwerk

Das Monitoring-Konzept sieht vor, dass die einzelnen Sensor-Stationen zu einem Netzwerk zusammengeschlossen werden. Ein zentraler Rechner soll die Sensoren vor Ort ansteuern sowie die erfassten Messwerte lokal abspeichern (Engel 2013). Der Fernzugriff auf das Monitoring-System erfolgt über eine Richtfunkverbindung zur Hochschule, die sich in etwa einem Kilometer Entfernung in westlicher Richtung befindet. Der im Kirchturm verbaute Stahlbeton schloss aufgrund seiner abschirmenden Wirkung die Einrichtung eines WLAN-Netzes aus. Die einzelnen Sensor-Stationen wurden daher an ein konventionelles Ethernet-Netzwerk angeschlossen. Die Verlegung der Datenleitungen erfolgte zeitgleich mit der Installation einer eigenen Spannungsversorgung.

Ein kleiner Unix-Server führt die Monitoring-Software OpenADMS aus, die die Messdaten der einzelnen Sensoren über RS-232 erfasst (Abb. 6). Das Datensignal von und zu den Sensoren wird durch serielle Geräteserver auf Ethernet umgesetzt, per TCP/IP übertragen und am Server auf einen virtuellen COM-Port abgebildet. Dadurch lassen

sich beliebig viele Sensoren über ein einzelnes Ethernet-Kabel zu einem Datenbus verbinden.

Durch den modularen Aufbau kann das Netzwerk zu einem späteren Zeitpunkt leicht durch weitere Sensoren erweitert werden.

3.3 GNSS

Die Erfassung der Turmschwingungen mittels GNSS erfolgte mit zwei Zweifrequenzempfängern Leica GMX902 und passender Antenne AS10. Eine Antenne wurde über



Abb. 4: Antennenhalterung

eine Spezialkonstruktion auf der Südseite der Turmspitze installiert (Abb. 4). Die Referenzstation befand sich auf dem Messdach der Hochschule. Für die Datenübertragung zwischen Kirchturm und Referenzstation wurde die bestehende WLAN-Richtfunk-Verbindung genutzt. Die Empfänger arbeiteten mit einer Abtastfrequenz von 20 Hz. Die Software Leica GNSS Spider berechnet die Koordinaten in Echtzeit. Das Ergebnis der Schwingungsanalyse ergab mehrere Schwingfrequenzen. Der größte Peak lag bei einer Frequenz von 1,14 Hz mit einer Amplitude von einem Millimeter (Ergebnisse in Abb. 7).

3.4 Tachymeter

Die bereits erwähnten Industriekletterer halfen bei der Montage zweier Monitoring-Prismen Leica GPR112 außen am Kirchturm der Marienkirche, einmal in Längsrichtung und einmal quer zur Bewegungsrichtung der schwingenden Glocken. Diese Prismen wurden durch zwei Tachymeter (Leica TS30 und Leica TCRP1203) mit Abtastraten von ca. fünf Messungen pro Sekunde verfolgt (Aufbau siehe Abb. 5).

Die verwendeten Tachymeter sind prinzipiell in der Lage, die hohe Abtastrate von ca. 0,2 s einzuhalten. Im sogenannten »Lock«-Modus liefert das Tachymeter in diesem Takt je einen Winkel und einen Streckenwert (»tracking«). Jedoch erfolgt in diesem Modus im Abstand von ca. 12 s eine absolute Feinmessung der Strecke, welche mit etwa einer Sekunde wesentlich länger dauert. In jedem Fall ist die Äquidistanz der Zeitreihen nur für einen kurzen Zeitraum gegeben. Mit geeigneten

Interpolationsverfahren ließen sich zwar äquidistante Zeitreihen erzeugen, diese wären jedoch durch die Interpolation hypothesenbehaftet. Doch selbst die Auswertung dieses kurzen Zeitraums von 12 s bestätigt die Ergebnisse der GNSS-Messungen mit Amplituden von 0,9 mm und einer Frequenz von 1,16 Hz (Ergebnisse in Abb. 7).

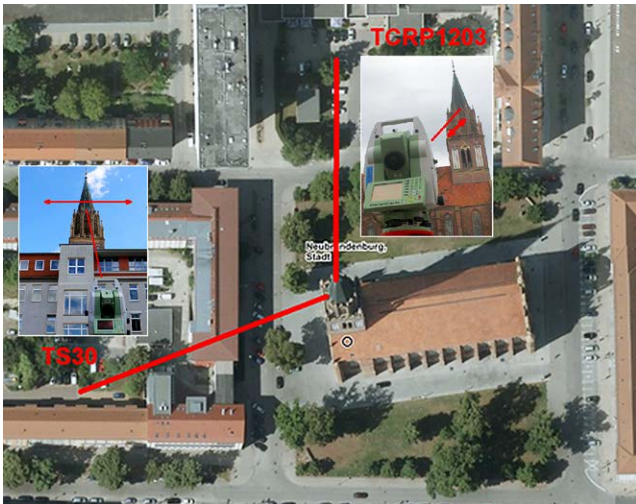


Abb. 5: Tachymeterstandpunkte

Um die Problematik der äquidistanten Abtastung aufgrund der Distanz-Fein-Messungen im »Lock«-Modus zu umgehen, wurden beim Tachymeter TS30, welches quer zur Hauptbewegungsrichtung aufgebaut war, nur die Richtungswerte ausgelesen. Mit Hilfe eines in Python geschriebenen Programms konnten die Horizontalrichtungen mit einer Frequenz von 20 Hz erfasst werden. Die so erhaltenen Werte waren auch über längere Beobachtungszeiträume zeitlich äquidistant. Nach der Frequenzanalyse lagen dadurch detaillierte Ergebnisse vor. Neben der Hauptamplitude von 1,1 mm bei 1,14 Hz ließen sich wie bei den GNSS-Messungen die sehr kleinen Amplituden von 0,1 mm bei 1,26 Hz und 0,38 Hz wiederfinden (Ergebnisse in Abb. 7).

3.5 Neigungsmesser

Mit zwei Präzisionsneigungsmessern Leica Nivel210 wurde die Neigung des Turms in verschiedenen Höhen mit einer Abtastrate von ca. 4,5 Hz gemessen. Obwohl das Messprinzip eines Flüssigkeitshorizonts für die Erfassung hochdynamischer Schwingungen eigentlich nicht geeignet ist, ergab die Auswertung hochauflösende und rauscharme Ergebnisse in den Amplitudenspektren.

Die hohe Auflösung ermöglicht die Detektion sämtlicher Eigenbewegungen der schwingenden Glocken, welche sich im Bereich von 0,4 bis 0,5 Hz befinden. Auch die Antworten des Turms in Form von Gebäudeschwingungen im Bereich von 1,16 bis 1,5 Hz wurden erkannt.

3.6 Beschleunigungssensor

Mit dem Sensor IG500E der Firma SBG Systems stand für die Messversuche eine *Inertial Measurement Unit* (IMU) auf Basis eines *Microelectromechanical System* (MEMS) zur Verfügung. Der IG500E liefert sehr genaue, relativ driftfreie Winkelinkremente und Beschleunigungen. Das System wurde vor den Messungen im geodätischen Prüflabor der Hochschule eingehend untersucht und kalibriert.



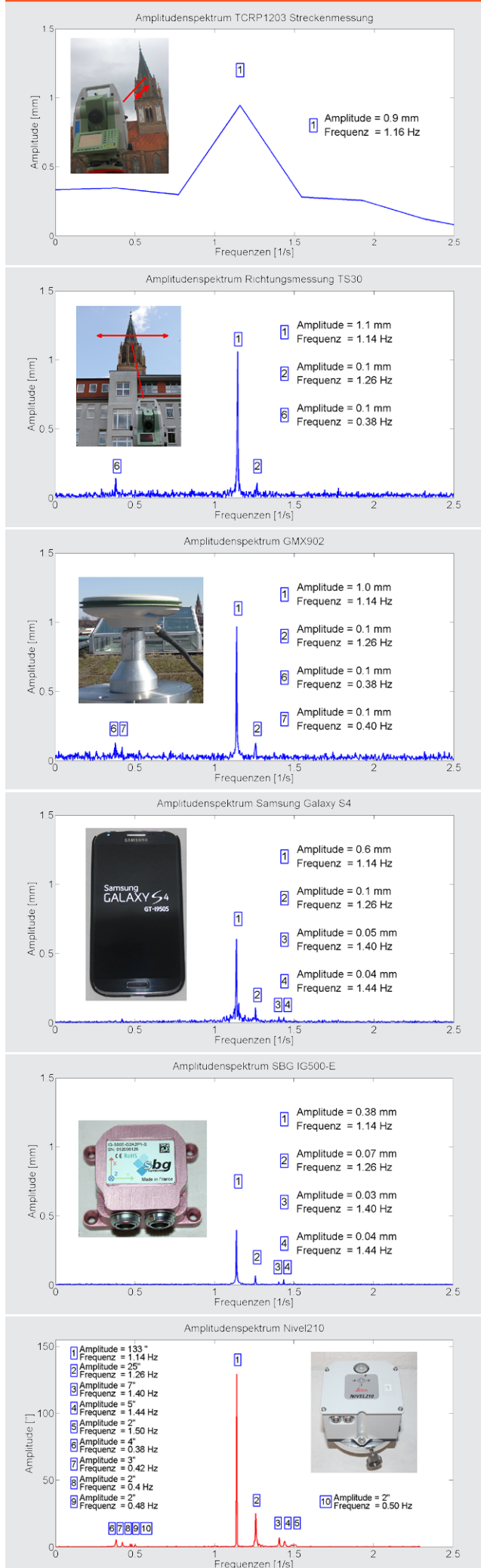
Abb. 6: FreeBSD-Server, Sensor-Steuerungseinheit und Leica Nivel210 auf einer Konsole im Kirchturm

Im Turm der Marienkirche ist dazu direkt unterhalb des Glockenstuhls in einem geschützten, für Besucher unzugänglichen Bereich eine Konsole montiert, die zur gleichzeitigen Aufnahme der Neigungssensoren Leica Nivel210, des Inertial-Sensors IG500E und weiterer Sensoren geeignet ist (Abb. 6). Mit dem IG500E wurden die Daten mit einer Rate von 50 Hz aufgezeichnet. Es konnten auch hier Peaks in gleichen Frequenzbereichen gefunden werden. Bei der Berechnung der Turmauslenkungen aus den Beschleunigungswerten wird eine maximale Amplitude von 0,6 mm erreicht, was sich mit den GNSS- und Tachymeterwerten deckt, da diese in größerer Höhe des Turmes ermittelt wurden und daher auch größere Auslenkungen anzeigen (Ergebnisse in Abb. 7).

3.7 Smartphone

Die meisten aktuellen Smartphones können grundsätzlich auch als MEMS-basierte Sensorsysteme dienen (Köster 2016). Die Eignung sollte im Rahmen der Messungen näher untersucht werden. Bei der letzten Messkampagne kam ein Samsung Galaxy S4 zum Einsatz, das für die Dauer der Messung auf einer Konsole fest mit dem Bauwerk verbunden wurde. Mit Hilfe einer App ließen sich die Beschleunigungen in drei Achsen mit einer Abtastrate von 50 Hz aufzeichnen und auslesen.

Die Frequenzanalyse der Smartphone-Daten ergab die Übereinstimmung mit den detektierten Frequenzen der anderen Verfahren, wobei die größte Amplitude



von 0,03 m/s² bei 1,14 Hz festgestellt wurde, woraus sich nach doppelter Integration (sowohl numerisch als auch analytisch) eine Auslenkung des Turms um 0,6 mm ergibt. Die Bewegungen des Gebäudes ließen sich auch mit dem Smartphone aufdecken.

4 Fazit

Die Untersuchungen zum Monitoring an der Konzertkirche haben gezeigt, dass sich mit allen verwendeten Messmethoden das Schwingverhalten des Turms mit ausreichender Genauigkeit nachweisen ließ.

Die TPS-Messungen erlaubten die Bestimmung sowohl der Amplituden als auch der Frequenzen mit handelsüblichen Tachymetern. Die Auswertungen der im »Lock«-Modus generierten Daten lieferte aus den genannten Gründen nur kurze Zeitreihen. Das Problem ließe sich mit Hilfe geeigneter Interpolationsalgorithmen lösen. Generelle Abhilfe schüfe hier das Versehen aller Messwerte mit einem hochgenauen Zeitstempel. Aber auch die hier aufgezeigte Alternative, nur die reine Horizontalwinkel-messung zu betrachten und dazu die Messwerte mittels eines einfachen Python-Programms auszulesen, liefert zeitlich äquidistante Daten und hervorragende Ergebnisse.

Die Langzeitqualität des GNSS-Messsystems zeigt Probleme verursacht durch Mehrwegeeffekte am Turm. Eine direkte Anbringung der GNSS-Antenne auf der Turmspitze wäre zwar ideal, war bei dieser Installation jedoch nicht möglich. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf und Stoff für studentische Abschlussarbeiten.

Die Eignung der flüssigkeitsbasierten Neigungssensoren für diese Messaufgabe überrascht. Aber die detektierten Frequenzen decken sich mit den anderen Messverfahren und auch mit separaten Schwingungsuntersuchungen aus den Vorjahren. Nach wie vor besteht das Problem, die Neigungswerte in metrische Auslenkungen umzurechnen, wenn keine Klarheit über die anzusetzenden Modellvorstellungen für das Untersuchungsobjekt vorliegt. Hier wird derzeit im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten untersucht, ob sich die Lage der »Drehgelenke« eines stabförmigen Bauwerks bei nicht vorliegenden Modellen wie FEM o. ä. auch über Video-Auswertungen nach der Methode der *Eulerian Video Magnification* nachweisen lässt, bei denen Videoaufnahmen derartig »frequenzverstärkt« werden, dass sich Bewegungen und Drehpunkte in den Bildern wiederfinden lassen (Wolff 2015, Wu et al. 2012).

Positiv überrascht hat die Tatsache, dass schon einfache Smartphones für die hier beschriebenen Schwingungsuntersuchungen geeignet sind. Nicht nur die Frequenz, sondern auch die Amplitude der Schwingungen

◀ Abb. 7: Amplitudenspektren

Tab. 1: Zusammenstellung gemessener Glocken- und Gebäudefrequenzen

Glocke	Glocken- frequenz [Hz]	Gebäude- frequenz [Hz]	Fak- tor
Marienglocke	0,38 6	1,14 1	3
Johannesglocke	0,42 7	1,26 2	3
Gebetsglocke	0,46 8	1,40 3	3
Sakramentsglocke	0,47 9	1,42 4	3
Lob- und Dankglocke	0,50 10	1,50 5	3

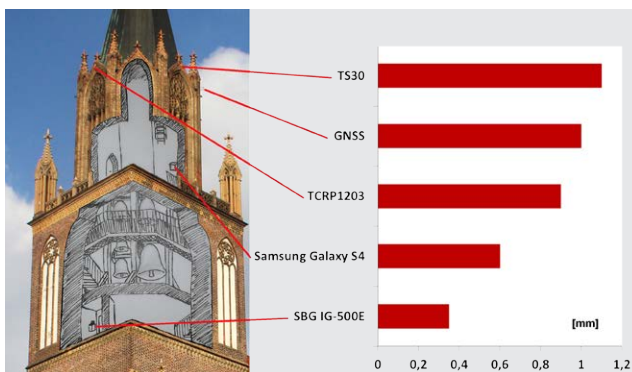


Abb. 8: Darstellung der Amplituden der Kirchturmschwingung in den entsprechenden Höhen der Sensorinstallation

konnte mit den integrierten MEMS-basierten Beschleunigungssensoren nachgewiesen werden. Dabei liegen die Ergebnisse im Bereich der Ergebnisse der anderen Sensoren (Abb. 7).

Das Gebäude schwingt mit einem konstanten Faktor von drei im Bezug zu den Glocken. Dies ist physikalisch gesehen die zweite Oberschwingung. Die Frequenz von 1,14 Hz liegt nahe der vermutlichen Eigenfrequenz des Kirchturmes (Tab. 1). Denn nur bei dieser Frequenz wird die eigentliche Glockenfrequenz der Marienglocke besonders verstärkt. Exakte statische Berechnungen liegen derzeit nicht vor.

Die Befürchtung, dass sich der Kirchturm um mehrere Zentimeter oder gar Dezimeter bewegt, ließ sich entkräften. Es treten zwar Schwingungen am Kirchturm auf, welche durch das Glockenspiel verursacht werden, aber diese weisen nur geringe Amplituden auf (siehe Abb. 8). Die detektierten Frequenzen haben laut den beteiligten Statikern derzeit keine Auswirkungen auf das Mauerwerk.

Die Marienkirche steht der Hochschule auch zukünftig für weitere Forschungsarbeiten zur Verfügung.

Literatur

- Engel, P., Schweimler, B. (2016): Design and Implementation of a Modern Automatic Deformation Monitoring System. Towards an Open Source Software Platform for Geodetical and Geotechnical Measurements. *Journal of Applied Geodesy*. 10(1), p. 79–86.
- Engel, P., Foppe, K. (2016): Open Source Deformation Monitoring: A Multi-Platform Approach For Automated Observations in Geodesy. Beitrag zu GeoTerrace 2016 International Conference in Lviv (Ukraine), 15.–16. Dezember 2016.
- Engel, P., Foppe, K., Schweimler, B. (2014): Geosensornetzwerke. In: Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder, DVW-Schriftenreihe Bd. 75/2014, Augsburg 2014.
- Engel, P., Foppe, K., Schweimler, B. (2014): DABAMOS. Open Source-Monitoring-System für geodätische und geotechnische Überwachungsmessungen. Beitrag zu »Geodäsie quo vadis – Möglichkeiten und Grenzen kostengünstiger Messverfahrens-Lösungen«, VDV-Seminar, Fulda, 10.–11. April 2014.
- Engel, P. (2013): Entwicklung eines autonomen Low-Cost-Messclients für geodätische Überwachungsmessungen. Master-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Foppe, K. (2006): Permanent Automatic Monitoring of Historical Ecclesiastical Architecture. Beiträge zum »3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering« bzw. »12th FIG Symposium on Deformation Measurements« in Baden bei Wien, 22.–24. Mai 2006.
- GeoPortal MV (2016): www.gaia-mv.de/gaia/gaia.php, letzter Zugriff 02/2016.
- Köster, U. (2016): Multisensor-Monitoring zur Erfassung hochfrequenter Deformationen an der Marienkirche Neubrandenburg. Bachelor-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Light, R.A. (2017): Mosquito: Server and client implementation of the MQTT protocol. *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 13, Mai 2017, DOI: 10.21105/joss.00265.
- Peci, L.M., Berrocoso, M., Fernández-Ros, A., García, A., Marrero, J.M., Ortiz, R. (2014): Embedded ARM System for Volcano Monitoring in Remote Areas: Application to the Active Volcano on Deception Island (Antarctica). *Sensors*. 2014, 14(1): 672–690.
- Wolff, C. (2015): Werkzeuge zum ingenieurgeodätischen Monitoring mittels Low-Cost-Kamerasystemen. Master-Arbeit, Hochschule Neubrandenburg.
- Wu, H.-Y., Rubinstein, M., Shih, E., Gutttag, J., Durand, F., Freeman, W.T. (2012): Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World. *ACM Transactions on Graphics*, Volume 31, Number 4 (Proc. SIGGRAPH).

Kontakt

Philipp Engel | Karl Foppe | Uwe Köster
 Hochschule Neubrandenburg
 Studiengänge Geoinformatik, Messtechnik, Geodäsie
pengel@hs-nb.de | foppe@hs-nb.de | lg12007@hs-nb.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.