Hochfrequenz-Monitoring mit Low-Cost-GNSS als integraler Bestandteil multipler Sensorik

High-frequency Monitoring with Low-Cost GNSS as an Integral Component of Multiple Sensors Systems

Uwe Köster, Dennis Vollert, Albert Schnak

Dieser Beitrag evaluiert den Einsatz kostengünstiger GNSS sowie weiterer, multipler Sensorik, zum Teil auf Basis von Konsumelektronik, für den Einsatz im ingenieurgeodätischen Monitoring. Anhand von Laboruntersuchungen sowie dem Einsatz an einem ausgewählten Überwachungsobjekt werden diese Instrumente und Verfahren besonders in Hinblick auf eine Erfassung hochfrequenter Schwingungsvorgänge untersucht und mithilfe klassischer geodätischer Messverfahren validiert. Zum Einsatz kommen neue Messkonzepte auf Basis von kostengünstigen GNSS-Empfängern, die durch klassische, tachymetrische Methoden sowie Neigungs- und Beschleunigungssensoren verifiziert und gestützt werden. Für das ingenieurgeodätische Monitoring konnten kostengünstige GNSS-Messsysteme bisher nur zum Teil die hohen Genauigkeitsanforderungen im Submillimeterbereich erfüllen, wie sie zum Teil bei der Schwingungsanalyse kleinster Deformationen im Rahmen von Bauwerksüberwachungen notwendig sind. Diese Lücke kann durch den Einsatz von kostengünstigen GNSS-Mehrfrequenz-Empfängern in Verbindung mit der Erfassung, Speicherung und Vorauswertung der Messreihen mit dem Softwarepaket RTKLIB (Open Source Programmumgebung für GNSS-Positionierung), welches bisher in der Praxis wenig genutzt wird, geschlossen werden. Die Grundlage für die Auswertung der Messdaten liefern Werkzeuge der Zeitreihenanalyse, die es erlauben, periodische Schwingungsvorgänge in Amplitude und Frequenz aufzudecken. Anhand dieser Ergebnisse können Rückschlüsse auf das metrische Bewegungsverhalten des Bauwerks geschlossen werden. Die Aufdeckung und Analyse hochfrequenter Deformationen spielen beim Bauwerksmonitoring zunehmend eine wichtige Rolle. Hier sind beispielsweise Eigen- und Resonanzfrequenzen von Bauteilen und die dabei auftretenden Schwingungen die Zielgrößen. Mit diesen zumeist kontinuierlich durchgeführten Zustandsüberüberwachungen können schon frühzeitig mögliche Veränderungen vom Normalzustand erfasst und den daraus resultierenden Schäden entgegengesteuert werden.

Schlüsselwörter: Monitoring, GNSS, Tachymeter, Zeitreihenanalyse, Low-Cost, FOSS, Open Source, Structural Health Monitoring, Ingenieurgeodäsie, Fast-Fourier-Transformation

This article evaluates the deployment of low-cost GNSS and further multiple sensors, some of which are based on consumer electronics, for use in engineering geodetic monitoring. Based on laboratory tests and an exemplary monitoring object, these instruments and methods are investigated, particularly with regard to the recording of high-frequency vibration processes, and validated using classic geodetic measurement methods. New measurement concepts based on low-cost GNSS receivers are applied, which are verified and supported by classical tachymetric methods as well as inclination and acceleration sensors. For engineering geodetic monitoring, low-cost GNSS have so far only been able to partially fulfil the high accuracy requirements in the sub-millimetre range, which are sometimes necessary for vibration analysis of the

DOI: 10.14627/avn.2025.4.3

smallest deformations in the context of structural monitoring. This gap can be closed by using low-cost GNSS multi-frequency receivers in conjunction with the acquisition, storage and pre-evaluation of the measurement series using the RTKLIB software package (open source programme environment for GNSS positioning), which has been little used in practice to date. The basis for analysing the measurement data is provided by time series analysis tools, which make it possible to detect periodic oscillation processes in amplitude and frequency. Based on these results, conclusions can be drawn about the metric movement behaviour of the structure. Detecting and analysing high-frequency deformations is playing an increasingly important role in structural monitoring. Here, for example, the natural and resonant frequencies of components and the resulting vibrations are the target variables. With these usually continuous condition monitoring procedures, possible changes to the normal condition can be detected at an early stage and the resulting damage can be counteracted.

Keywords: Monitoring, GNSS, tachymeter, time-series analysis, low-cost, FOSS, open source, structural health monitoring, engineering geodesy, Fast-Fourier Transformation

1 EINLEITUNG

Aktuelle technologische Entwicklungen erlauben es, die Herstellung moderner GNSS-Sensoren immer kostengünstiger zu realisieren. Spannend ist dieser Umstand kombiniert mit der Nutzung von Software, welche den Endnutzern urheberrechtsfrei durch eine große Entwicklergemeinde zur Verfügung gestellt wird, um weitere Kosten einzusparen. Im Bereich der GNSS wird dieser Trend bereits seit Längerem für Aufgaben der Navigation genutzt.

Parallel dazu wächst der Bedarf an geodätischen Überwachungsmessungen. Diese beschäftigen sich mit der Erfassung geometrischer Veränderungen eines Messobjekts, die durch physikalische Einflüsse hervorgerufen werden. Nicht selten sind jene physikalischen Einflüsse selbst Zielgröße und Gegenstand der Überwachungsmaßnahmen /Welsch et al. 2013/. Das Ziel der Bauwerksüberwachung ist in erster Linie der Schutz von Menschenleben. An zweiter Stelle steht die Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs mit dem Schutz vor wirtschaftlichen Schäden durch die Gewährleistung der Funktions- und Standsicherheit des Bauwerks.

Die Wichtigkeit der Überwachung von Bauwerken wird besonders durch Tragödien wie der Einsturz des Kölner Stadtarchivs 2009 oder der Einsturz der Bad Reichenhaller Eissporthalle 2006 mit dem tragischen Verlust von Menschenleben deutlich. Auch in jüngster Vergangenheit kam es in Deutschland zu Versagen kritischer Infrastruktur, zu nennen sind an dieser Stelle der Einsturz der Carolabrücke in Dresden im September 2024 sowie der Einsturz eines im Bau befindlichen Tunnels in Rastatt 2017. Die Ansprüche an eine messtechnische Überwachung solcher Bauwerke sind zumeist eine dauerhafte Überwachung mit angebundener Echtzeitalarmierung. Dies stellt besondere Anforderungen an das Monitoring-System hinsichtlich der Datenkommunikation der Sensoren untereinander sowie der zentralen Speicherung und Auswertung der Daten mit Anschluss an das Internet für eine Echtzeitalarmierung. Solche Monitoring-Konzepte, sofern sie Genauigkeiten weniger Millimeter bis Submillimeter erfordern, sind oftmals kostenintensiv, Messtechnik und Instrumente teuer, sowie komplex in Aufbau und Unterhaltung. Diese Umstände führen dazu, dass nur eine geringe Anzahl von ausgewählten Bauwerken dauerhaft überwacht wird.

Diese Lücke kann durch redundante Sensorik aus dem Low-Cost-Bereich in Verbindung mit auf diese ausgerichtete Auswerteverfahren und Zusatzsensoren, wie Temperatursensoren und Neigungssensoren, geschlossen werden.

Von besonderem Interesse sind hierbei kostengünstige GNSS-Empfänger. Als integraler Bestandteil multipler Sensorik in Monitoring-Konzepten sind diese neben MEMS-Beschleunigungssensoren aus dem Consumer-Bereich auf ihre Tauglichkeit gegenüber konventioneller Messtechnik zu prüfen. Beiträge wie /Morgenthal et al. 2019/ liefern zum Teil bereits Ergebnisse mit dem Einsatz von Low-Cost-Sensorik im Vergleich zu proprietärer Messtechnik. Auch in /Willemsen et al. 2022/ wird ein Konzept für den Einsatz von Low-Cost-MEMS für die Bauwerksüberwachung vorgestellt. Beiträge wie /Stempfhuber 2022/, /Xue & Psimoulis 2023/ und /Xue et al. 2023/ stellen erste Ergebnisse in Bezug auf die Verwendung von kostengünstigen GNSS-Empfängern vor. Dennoch bestehen bei Low-Cost-Sensoren, besonders Beschleunigungssensoren auf MEMS-Basis, Herausforderungen bei der Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Langzeitstabilität, hoher Driften und Maßstabsfehler, starker Temperaturabhängigkeit und weiterer Eigenschaften. Dies wird in künftigen Untersuchungen erörtert werden müssen, wenn eine Vergleichbarkeit zu proprietärer Messtechnik hergestellt werden soll.

GNSS-Positionierungssysteme und damit verbundene Dienste sind eine global schnell wachsende Branche. 2021 beträgt das globale Marktvolumen von GNSS-Lösungen und deren Diensten 198,9 Milliarden Euro. Es wird prognostiziert, dass das Marktvolumen bis 2031 auf 492,2 Milliarden Euro steigt /European Union Agency for the Space Programme 2022/. Aktuelle Entwicklungen in der Branche erlauben eine immer kompaktere und preiswertere Produktion von Antennen und Empfängern. Dieser Umstand ist für die geodätische Bauwerksüberwachung von besonderer Bedeutung. Low-Cost-GNSS-Empfänger und dazugehörige Antennen sind um den Faktor 10 bis 50 kostengünstiger in der Anschaffung als geodätische Empfänger und Antennen der führenden Hersteller für Präzisionsanwendungen. Untersuchungen von kostengünstigen GNSS-Empfängern in Hinblick auf das Rauschverhalten und die

Tauglichkeit zur Integration in Multi-Sensor-Systeme sind in /Kersten & Paffenholz 2020/ vorgenommen worden. Hier wurde die grundsätzliche Eignung dieser Low-Cost-Empfänger bestätigt. Es bleibt zu untersuchen, ob diese kostengünstigen Systeme die Hochleistungsempfänger hinsichtlich der Qualität der Daten und der Genauigkeit vollständig ersetzen können.

Im Rahmen dieses Beitrags wird der Einsatz von kostengünstigen GNSS-Empfängern, als Bestandteil multipler Sensorik, für die geodätische Bauwerksüberwachung, spezieller zur Detektion hochfrequenter Schwingungen bis 10 Hz, evaluiert. Als Basis hierfür dient ein zweistufiger Versuchsaufbau. Zuerst werden Voruntersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt und ausgewertet, dann wird die Messtechnik an einem Realobjekt getestet. Hierfür dient die Marienkirche in Neubrandenburg, deren Glockengeläut hochfrequente Schwingungen in das Bauwerk überträgt. Ziel ist die Detektion der vom Glockengeläut hervorgerufenen Schwingungen in Amplitude und Frequenz, welche eine interdisziplinäre Bewertung der Auswirkungen auf die Bausubstanz erlauben.

2 ZEITREIHENANALYSE

Rechnergestützte Auswertungen gesammelter Messdaten von Vermessungsinstrumenten, wie GNSS, Tachymetern u. Ä., können autonom und in Echtzeit erfolgen. Als Ergebnis der automatisierten Messungen entsteht zu jeder Messgröße eine geordnete Folge von Realisierungen *N*. Diese Folge wird Zeitreihe genannt. Jede Realisierung ist durch den Abstand Δt zwischen zwei Messungen von der nächsten getrennt. Wird daraus folgend eine Messgröße als zeitlich veränderlich betrachtet, so handelt es sich um einen kontinuierlichen, zeitabhängigen Prozess ξ_t. Dabei stellt die Zeitreihe x_t die Realisierung des Prozesses ξ_t zu diskreten Zeitpunkten dar /Heunecke et al. 2013/. Wird der zeitliche Abstand Δt als konstant angenommen, kann die Realisierung auch als y_n geschrieben werden. Die Zeitreihenanalyse ist ein Werkzeug aus der Signalanalyse und dient der Untersuchung von zeitlich geordneten Folgen von Messwerten. Voraussetzungen für korrekte Auswertung einer Zeitreihe sind nach /Neuner & Foppe 2009/:

- die Einhaltung des Nyqvist-Shannon-Abtasttheorems;
- eine einheitliche zeitliche Äquidistanz;
- Stationarität der Zeitreihe;
- Zentrierung der Messdaten (der Mittelwert der Zeitreihe ist im Fourier-Koeffizienten Y_0 enthalten);
- Beseitigung von Trenderscheinungen;
- korrekter Umgang mit Datenlücken und Datensprüngen.

Das wichtigste mathematische Hilfsmittel zur Auswertung von Zeitreihen ist die Fourier-Transformation. Hier wird der Übergang vom Zeitbereich auf den Frequenzbereich mittels Fourier-Transformation (FT) vorgenommen. In der Praxis wird die diskrete Fourier-Transformation (DFT) genutzt, da die Werte einer Zeitreihe normalerweise an diskreten Zeitpunkten und in endlicher Anzahl zur Verfügung stehen. Der Frequenzbereich eines zeitdiskreten Signals kann über eine diskrete Fourier-Transformation numerisch in ein Frequenzspektrum umgerechnet werden. Der Frequenzbereich wird auch diskretisiert, das heißt, die Fourier-Transformation wird nur bei bestimmten Frequenzen ausgewertet. Die diskrete Fourier-Transformation von dem Signal y_n zur diskreten Fourier-Transformierten Y_{k+1}, bei *N* zeitäquidistanten Werten und die Rücktransformation zu den Abtastpunkten ist in Gl. (*1*) veranschaulicht:

$$Y_k = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} y_n \, e^{-2\pi i \frac{k}{N}}, \text{ für k=0, } \ldots n-1. \tag{1}$$

Es ist zu beachten, dass *N* sowohl die Anzahl der Abtastwerte pro Signalperiode im Zeitbereich als auch die Zahl der Spektrallinien pro Spektralperiode im Frequenzbereich ist (siehe /Hoffmann 2014/).

Eine besonders wichtige Eigenschaft der Fourier-Transformation ist, dass sie eine orthogonale Transformation ist. Der Energiegehalt des Signals wird nicht verändert. Das bedeutet in der Praxis, dass die Beträge der Fourier-Koeffizienten die exakten Beträge der Amplituden der Messwerte anzeigen. Diese Eigenschaft erlaubt es, nach Berücksichtigung der Voraussetzungen für korrekte Auswertung von Zeitreihen, direkt eine Fourier-Transformation des Signals durchzuführen.

Als Ergebnisse der DFT werden Amplitudenspektren erhalten (*Abb. 1*). Somit ist die Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich abgeschlossen. Als beschleunigte Variante arbeitet in den meisten Auswertealgorithmen jeweils die Fast-Fourier-Transformation (FFT). Diese hat den Vorteil der verkürzten Rechenzeit von N^2 zu $N \cdot \log_2 N$ Rechenoperationen. Dieser Algorithmus ist schon im Jahr 1805 von Carl Friedrich Gauß entwickelt worden /Heideman et al. 1985/. In der Regel wird das Verfahren von Cooley und Tukey verwendet /Cooley & Tukey 1965/. Beispielsweise reduziert sich der Rechenaufwand bei einer Zeitreihe von 65 536 Messwerten, was einer GNSS-Messung von einer Stunde bei einer Abtastfrequenz von 20 Hz entspricht, von ca. $4 \cdot 10^9$ auf ca. $1 \cdot 10^6$ Rechenoperationen. Zu beachten ist jedoch, dass die Zeitreihe eine Länge von 2^n Messwerten besitzen muss, um diese schnelle Auswertung zu ermöglichen.

Grundlage für die Anwendung der Fourier-Transformation ist die Nutzung des Modells der harmonischen Schwingung für die Bauwerksbewegung, wie es in Gl. (*2*) zu sehen ist:

$$A_t = y_n = A_B \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_0). \tag{2}$$

Die Rekonstruktion einer Bauwerksschwingung erfolgt über die Messungen der momentanen Auslenkung *A* oder y_n, welche abhängig von der Zeit *t* ist, und der Berechnung der drei unbekannten Größen des Anfangsphasenwinkels φ_0, der Frequenz *f* und der Amplitude A_B. Aufgrund der Unbekanntenanzahl von drei sind mehr als zwei Abtastpunkte pro Schwingung nötig, was wiederum dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem /Nyquist 1928/ entspricht. Somit kann jeweils eine Bauwerksschwingung mehrdeutigkeitsfrei festgestellt werden, die maximal der halben Abtastfrequenz der verwendeten Sensoren entspricht.

3 VERWENDETE SENSOREN

3.1 Low-Cost-GNSS-Messsystem

Zum Einsatz kommen kostengünstige GNSS-Empfänger ZED-F9P der Marke u-blox. Der Schweizer Hersteller entwickelt und produziert

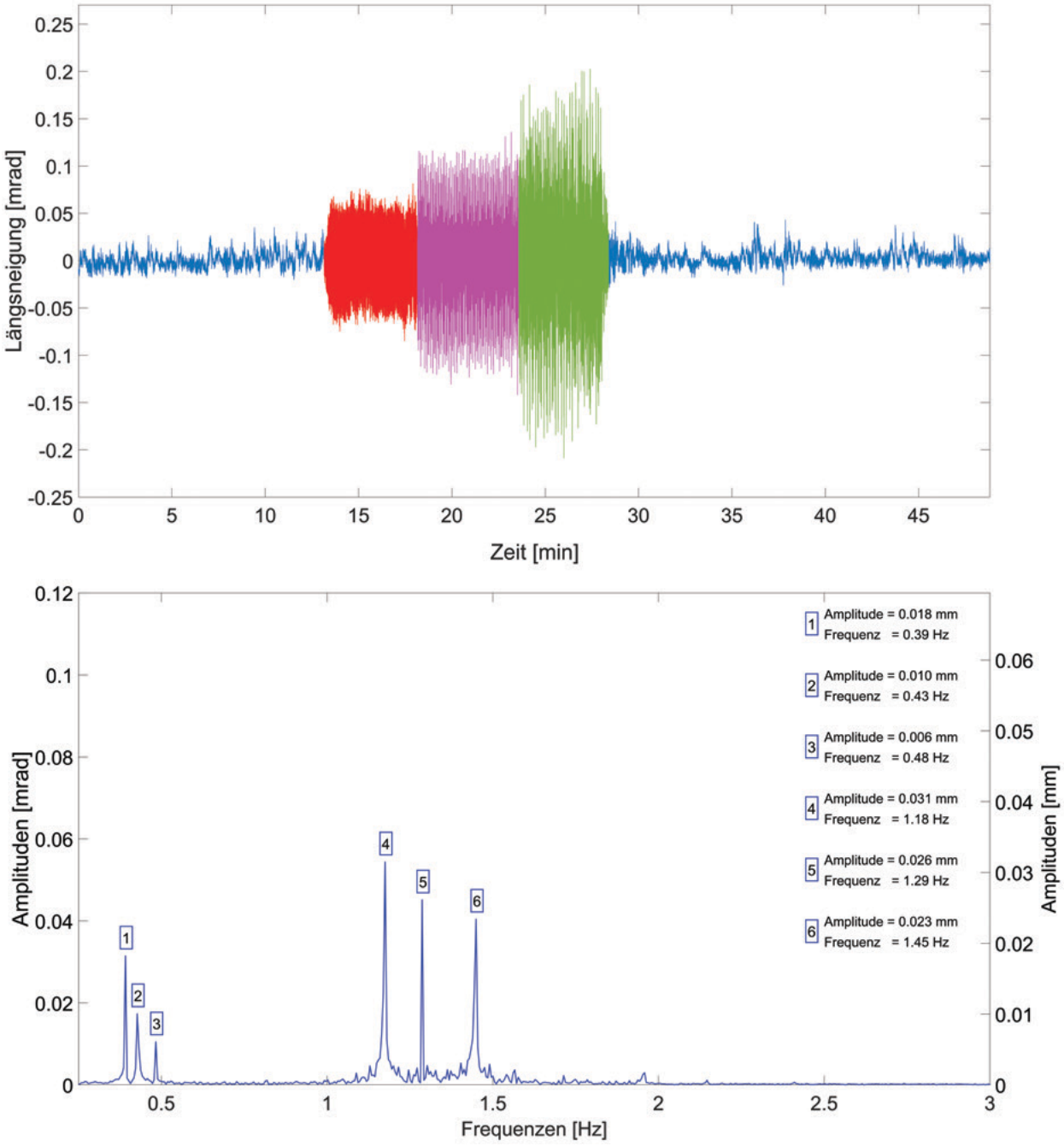


Abb. 1 | Darstellung einer Zeitreihe im Zeitbereich und im Frequenzbereich

Module für Mobilfunk, Bluetooth, Wi-Fi und GNSS. Durch Weiterverarbeitung dieser Produkte finden sie Verwendung im industriellen Umfeld, bei Automotive-Anwendungen oder in anderen Bereichen. Neben Einfrequenzempfängern sind seit Ende 2018 kostengünstige GNSS-Mehrfrequenzempfängermodule mit integriertem RTK-Modus erhältlich. Der Nachfolger, die X20-Plattform von u-blox /u-blox AG 2024a/ mit Empfangsfunktionen aller verfügbaren Systeme und Frequenzbänder sowie erhöhter PPP-Verwendbarkeit ist bereits angekündigt. Besonders die Rohdatenausgabe über vielfältige Schnittstellen ist für die Anwendung in der Bauwerksüberwachung interessant, da oftmals auf unprozessierte Rohdaten zurückgegriffen wird, um diese im Verbund des Sensornetzwerks zusammen zu prozessieren, beispielsweise durch Ansätze der Ausgleichungsrechnung oder Spektralanalyse. Der im Rahmen dieses Beitrags verwendete Mehrfrequenzchip u-blox ZED-F9P /u-blox AG 2024b/ ist auf einem Evaluation-Board der Firma Ardusimple als Empfangsmodul simpleRTK2B Pro /ardusimple 2024/ integriert und ist für unter 150 Euro verfügbar (*Abb. 2*).

Dieser Preis stellt einen höchst kompetitiven Ersatz zu geodätischen GNSS-Empfängern für mehrere Tausend Euro dar, sollten vergleichbare Ergebnisse möglich sein. Die Eigenschaften des ZED-F9P von u-blox auf dem ArduSimple simpleRTK2B Pro Board sind aus *Tab. 1* zu entnehmen.

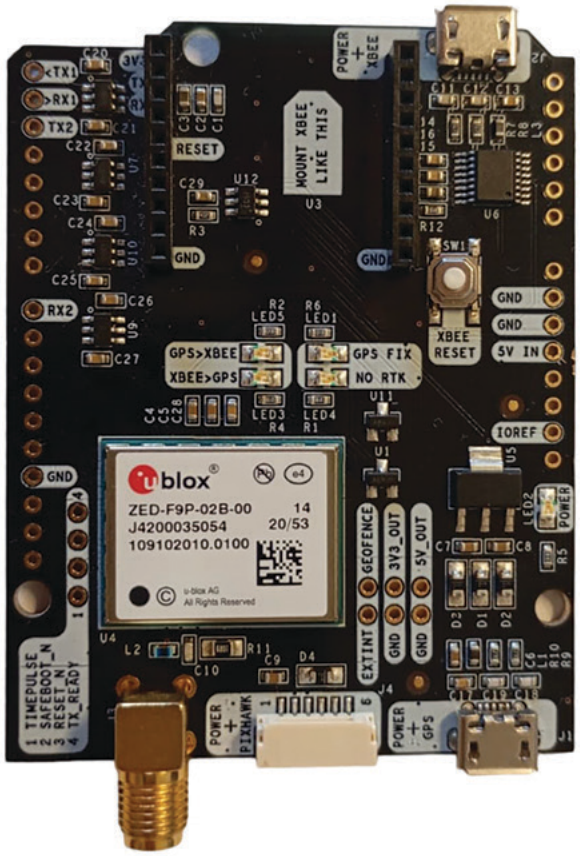


Abb. 2 | ArduSimple simpleRTK2B Evaluation-Board mit u-blox ZED-F9P

Auch bei den für den Signalempfang benötigten Antennen lassen sich für zumindest für Relativanwendungen kostengünstige Modelle sinnvoll nutzen. Die Eigenschaften der verwendeten ArduSimple-Antenne ist aus *Tab. 2* zu entnehmen.

Für die Auswertung der erfassten Rohdaten wird RTKPOST aus dem RTKLIB-Projekt /RTKLIB 2024/ verwendet. Die Open-Source-Softwareumgebung, entwickelt ab 2006 durch den Japaner Tomoji Takasu, ist eine leistungsstarke Programmumgebung zur Aufnahme, Prozessierung und Darstellung von GNSS-Daten, sowohl im Postprocessing als auch in Echtzeit. Die Software ist fähig, Daten verschiedenster Formate und Schnittstellen zu konvertieren und zu prozessieren. Durch den Umstand des freien Quellcodes wurde die Bibliothek bereits umfassend durch die Nutzergemeinde für verschiedenste Zwecke angepasst, erweitert und modifiziert. Ein Beispiel hierfür sind die Modifikationen am Quellcode durch den US-Amerikaner Tim Everett, der eine speziell für kostengünstige Mehrfrequenzempfänger verbesserte Version (demo5 b35k) bereitstellt, welche auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen verwendet wurde. Dem interessierten Leser wird an dieser Stelle die Webseite /Everett 2024/ empfohlen, welche von Tim Everett betrieben wird.

Vorteilhaft ist, dass es sich bei RTKLIB um portable Software handelt, welche keine Arbeitsplatzinstallation bei der Hardware benötigt. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts soll die Programmumgebung RTKLIB und ihre wichtigsten Module kurz vorgestellt werden. Die Konfigurationsparameter, welche zur Prozessierung der GNSS-Rohdaten im Rahmen der Messungen dieses Projekts verwendet wurden, werden in den entsprechenden Abschnitten zu den Messungen und Auswertungen erläutert. Ferner ist anzumerken, dass einige Funktionen als Kommandozeilen-basierte Lösungen Möglichkeiten zur Entwicklung eigener Skripte bieten. Aus den beschriebenen Hard- und Softwarekomponenten lässt sich sehr modular ein kostengünstiges GNSS-Messsystem aufbauen.

Das für die Messung mit Low-Cost-GNSS-Empfängern wichtigste Modul aus der RTKLIB Programmumgebung ist RTKNAVI. In RTKNAVI werden Datenströme verschiedenster Quellen zusammengeführt. Die Software erlaubt die Rohdatenaufzeichnung und Speicherung mehrerer Empfänger. Auch ist es möglich, Korrekturdatenstreams via NTRIP oder TCP-Clients einzubinden, was die Software und die Datenerfassung echtzeitfähig macht. Die Datenströme in RTKNAVI sind in *Abb. 3* schematisch zu entnehmen.

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass es mittlerweile neue Entwicklungen mit verbesserten (On-board-)Algorithmen im Bereich der GNSS-Datenerfassung gibt; beispielhaft sind hier die Lösungen von u-blox zu nennen, die leistungsstark und vor

u-blox ZED-F9P-04B	
Empfangskanäle	184
Unterstützte Systeme/Frequenzen	GPS: L1 C/A, L2C; GLONASS: L1OF, L2OF; Galileo: E1-B/C, E5b; Beidou: B1I, B2I
Rohdatenausgabe	Code-, Phasenmessung, Doppler Ausgaberate: 15 – 25 Hz
Protokolle	NMEA, UBX binary, RTCM v. 3.3, SPARTN v. 2.0
Schnittstellen	2 × UART, 1 × USB, 1 × SPI, 1 × I²C

Tab. 1 | Die wichtigsten Eigenschaften des GNSS-Zweifrequenz-Empfängers ZED-F9P

ArduSimple simpleANT2B „Survey“	
Unterstützte Frequenzbänder	GPS: L1, L2; GLONASS: G1, G2; Galileo: E1, E2, E5b, E6; Beidou: B1, B2, B3
LNA-Gewinn	40 dB
PCV	maximal 3 mm
Betriebsbereich	–40 bis +85 °C; Schutzart IP66

Tab. 2 | Ausgewählte Eigenschaften der ArduSimple simpleANT2B „Survey“-Antenne

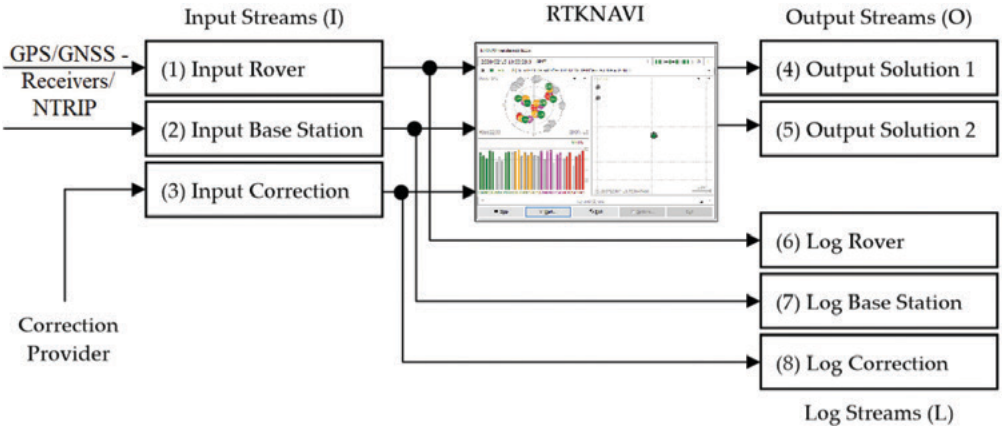


Abb. 3 | Schematische Darstellung der Eingänge und Ausgänge der Software RTKNAVI /Takasu 2013/

allem bei schlechteren Signalen sehr robust sind. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde dennoch RTKLIB verwendet, da es sich um erprobte Software handelt und der inhaltliche Fokus dieses Beitrags auf der Auswertung der GNSS-Positionsdaten von kostengünstigen Empfängern mithilfe der Fourier-Analyse zur Detektion von Amplituden im Submillimeterbereich liegt.

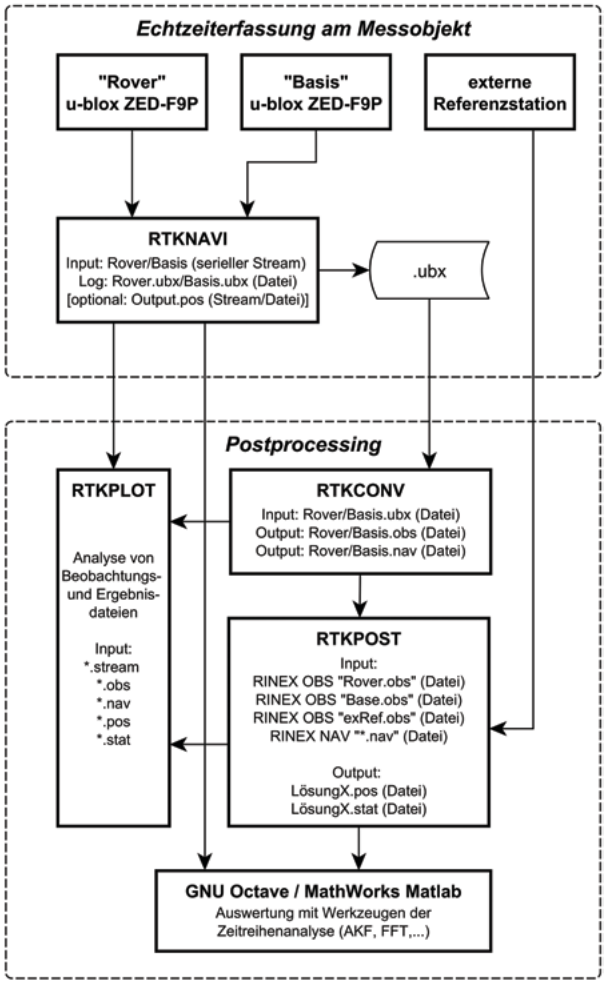


Abb. 4 | Beispielhaftes Konfigurationsschema eines kostengünstigen GNSS-Messsystems mit RTKLIB für Echtzeitauswertung und Postprocessing

Interessant sind neben RTKNAVI noch eine Zahl an Programmmodulen innerhalb von RTKLIB, welche an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Unter den Namen kann die jeweilige GUI unter Windows geöffnet werden. In RTKCONV werden Beobachtungsdateien verschiedenster Formate, wie u-blox .ubx in gängige Formate wie RINEX oder RTCM konvertiert. RTKPOST ist das leistungsstarke Modul zum Postprocessing von RINEX-Beobachtungsdaten mit der Möglichkeit komplexer Einstellungen zu Kalman-Filterung, Elevationsmasken, Manipulation von Zeitstempeln, Auswahl der auszuwertenden Frequenzen und vielem mehr. RTKPLOT bietet eine Möglichkeit zur Darstellung von Beobachtungsdateien und Lösungen (Skyplots, Positionsveränderungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen etc.) und veranschaulicht diese grafisch. Ein mögliches Konfigurationsschema der Echtzeiterfassung und Prozessierung von GNSS-Daten mit den beschriebenen Modulen aus RTKLIB ist in *Abb. 4* schematisch dargestellt.

Dieses System lässt sich je nach Bedarf durch die Integration weiterer Rover extendieren und für unterschiedliche Schnittstellen modifizieren. Da die wesentlichen Softwarekomponenten ebenfalls unter Linux betrieben werden können, ist zudem die Einbindung in bestehende kostengünstige Sensornetzwerke mithilfe preiswerter Hardware, wie beispielsweise dem Raspberry Pi, möglich.

3.2 Beschleunigungssensoren aus der Konsumelektronik

Neuzeitliche Entwicklungen in der Fertigung von mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) für verschiedenste Anwendungen erlauben eine immer kleinere Bauform sowie eine kostengünstigere Produktion. Diese Systeme sind zumeist dem Consumer-Bereich zuzuordnen; ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Sensoren zur Beschleunigungs-, Temperatur- und Luftdruckmessung in Smartphones, Automobilen oder unbemannten Flugsystemen. Der Markt für Consumer-Elektronik gewinnt mit einem stark steigenden Trend fortwährend Marktanteile.

Eine Anwendungsmöglichkeit dieser MEMS-Sensoren für den ingenieurgeodätischen Bereich soll hier dargestellt werden. Für die Rohdatenerfassung mit Smartphones wird lediglich eine Anwendung zur Rohdatenerfassung wie z. B. Phyphox® von der RWTH Aachen

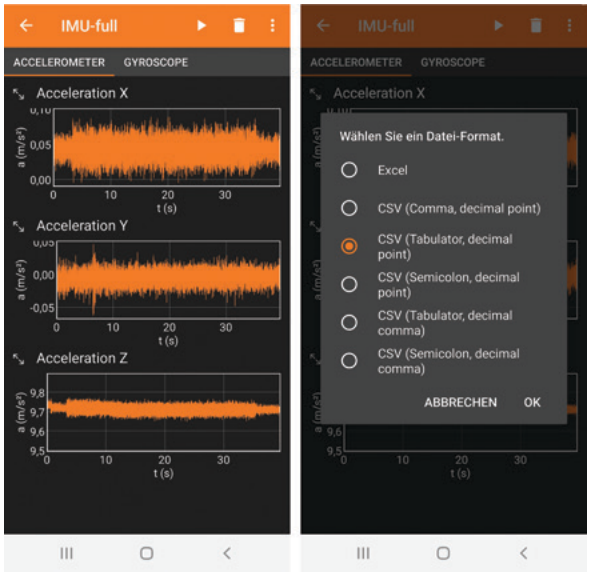


Abb. 5 | Rohdatenerfassung mit Phyphox®

/RWTH Aachen University 2024/ benötigt (*Abb. 5*). Nach erfolgreicher Installation und der Ausrichtung des Smartphones entsprechend den erwarteten Bewegungsrichtungen lassen sich die Beschleunigungen und Drehraten in drei Achsen jeweils mit Zeitstempeln erfassen und für weitere Auswertungen nach freier Formatvorgabe exportieren.

Je nach verwendetem Endgerät und Betriebssystem ist eine Abtastrate von bis zu 500 Hz möglich. Für die Synchronisation von mehreren Smartphones oder zu weiteren Sensoren im Sensornetzwerk ist ein ereignisbasierter Ansatz unter Verwendung der Kreuzkorrelation möglich.

Anders als bei Navigationsanwendungen ist für den vorgestellten Anwendungsbereich eine Berücksichtigung des klassischen Kalibrierparameters „Offset" nicht notwendig, da dieser im Rahmen der für die Auswertung einer Zeitreihe notwendigen Zentrierung und Trendbeseitigung (siehe Abschnitt 2) eliminiert wird. Ein etwaiger Maßstabsfehler muss jedoch zuvor durch Kalibrierung des Sensors berücksichtigt werden.

3.3 Geodätische Referenzsensoren: Leica TM30 und Leica Nivel210

Zu Validierung am Realobjekt (siehe Abschnitt 4) bzw. als Referenz für die Messungen mit den Low-Cost-Sensoren wurden die Totalstation Leica TM30 und der Neigungssensor Leica Nivel210 eingesetzt.

Die Verwendung von Totalstationen im Bereich der kontinuierlichen Überwachungsmessungen und die Integration in Sensornetzwerke ist bereits seit geraumer Zeit ein gängiger Ansatz. Aufgrund der hohen Qualität und Zuverlässigkeit der verbauten Sensorik ist aber nicht nur der Einsatz als Gesamtsystem denkbar, sondern auch eine direkte Erfassung und Auswertung der Rohdaten.

Mit der Schnittstellenlösung GeoCOM bietet Leica über ein einfaches ASCII-Protokoll oder C++/VBA-Funktionen den Zugriff auf die Rohdaten der Richtungs-, Strecken- und Neigungsmessung mit zugehörigen Zeitstempeln bei einer Abtastrate von bis zu 20 Hz.

Leica TM30	
Winkelmessteil	0,5" / 0,15 mgon (Standard) 1" / 0,3 mgon (mit ATR)
Streckenmessteil	0,6 mm + 1 ppm
Kompensator	0,5" / 0,15 mgon
Abtastrate	maximal 20 Hz
Leica Nivel210	
Arbeitsbereich	5,2' / 1,5 mrad
Genauigkeit	0,2"
Abtastrate	maximal 6 Hz

Tab. 3 | Technische Daten des Leica TM30 und des Leica Nivel210

Die flüssigkeitsbasierten Neigungssensoren, wie das Leica Nivel210, werden insbesondere bei quasistatischen Überwachungsmessungen eingesetzt. In vorherigen Arbeiten /Engel et al. 2017/, /Engel et al. 2018/ konnten mit diesem Sensor – zumindest qualitativ – hervorragende Aussagen für die Periodizität bei Schwingungsmessungen getätigt werden. Daher dient dieses Messsystem auch in den Untersuchungen für den vorliegenden Beitrag als Referenzsensor.

Tab. 3 verdeutlicht die wichtigsten technischen Eigenschaften der verwendeten Totalstation und des verwendeten Präzisionsneigungsmessers.

3.4 Voruntersuchungen mit kostengünstigen GNSS-Empfängern

Da es sich bei den zuvor beschriebenen Verfahren um erprobte Verfahren handelt, soll der Fokus auf die neue Verwendung von kostengünstigen GNSS-Empfängern zur Detektion von hochfrequenten Bauwerksdeformationen gelegt werden. Um die Eignung der Empfänger für diese Anwendung zu verifizieren, sind umfangreiche Voruntersuchungen unter Laborbedingungen durchzuführen. Ziel dieser ist die Detektion von Schwingungen mit Amplituden im Submillimeter-Bereich, wie sie auch am realen Messobjekt vorkommen. Hierfür wird ein Schwingungserzeuger genutzt, dessen Hub (Amplitude) im Bereich unter einem Millimeter und Frequenz des Hubs durch ein Labornetzteil fein eingestellt werden können. Um die Schwingung nicht nur lediglich in der *Z*-Achse des GNSS-Referenzsystems beobachten zu können, sondern ebenfalls in der *X*- bzw. in der *Y*-Achse, wurde ein Adapterbauteil im 3D-Druckverfahren gefertigt (*Abb. 6*).

Für die Voruntersuchungen wurden GNSS-Zeitreihen mit 20 Hz in Konfiguration mit Bewegung des Schwingungserzeugers in *X*-Richtung erhoben (*Abb. 7*). Erfasst wurden die Daten im Versuchsaufbau mit eigener Basis und der Auswertung im Postprocessing. Als Rover kamen ein u-blox-ZED-F9P-Empfänger in Verbindung mit einer u-blox-ANN-MB-00-Antenne zum Einsatz, die Basis wurde durch einen u-blox-ZED-F9P-Empfänger in Verbindung mit einer „Ardu-Simple simpleANT2B Survey"-Antenne realisiert. Der gesamte Versuchsaufbau besteht somit aus kostengünstiger Messtechnik.

Für die ersten Tests des Versuchsaufbaus wurde ein Standard-Konfigurationsmodell innerhalb der Software RTKLIB, genauer dem Modul RTKNAVI, verwendet. Für den Positionierungsmodus wurde

„kinematisch“ gewählt mit Auswertung der Frequenzen L1 + L2 und einer Mindestelevation von 15°. Ionosphärenkorrektionen und Ephemeriden werden via Broadcast empfangen, als Troposphärenmodell wurde Saastamoinen gewählt. In die Versuchsmessungen wurden alle vier Systeme: GPS, GLONASS, Galileo und Beidou einbezogen, beobachtet wurde je circa eine Stunde. *Abb. 7* verdeutlicht die im

Abb. 6 | Referenz-Schwingungserzeuger

Postprocessing verarbeitete Basislinie (East, North, Up) mit Bewegung in *X*-Richtung, diese stellt den Nord-Süd-Anteil der Rohdaten dar.

Die Basislinie wies nach dem Postprocessing eine Lösung der Trägerphasenanfangsmehrdeutigkeiten von 97,1 % auf. Dieser Umstand spricht für eine verwertbare Zeitreihe ohne signifikante Datenlücken und -sprünge und grundsätzlich für eine Auswertbarkeit mithilfe der Zeitreihenanalyse. Hierfür wurde spezieller die Fast-Fourier-Transformation angewandt, um die Zeitreihe vom Zeitbereich in den Frequenzbereich zu transformieren und interpretierbare Ergebnisse hinsichtlich der Amplituden und Frequenzen der in der Zeitreihe detektierten Schwingungen zu erhalten. Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse sind in folgendem Amplitudenspektrum (*Abb. 8*) dargestellt.

In der Zeitreihe mit Bewegung durch den Schwingungserzeuger in *X*-Richtung sind signifikant periodische Schwingungen durch die Fast-Fourier-Transformation aufgedeckt worden. Diese sind in Amplitude und Frequenz im Amplitudenspektrum abzulesen.

Die Amplitude beläuft sich auf 0,73 mm bei 3,35 Hz. Dies entspricht den Einstellungsparametern des Referenz-Schwingungserzeugers. Ergebnisse mit Amplituden dieser Größenordnung bei

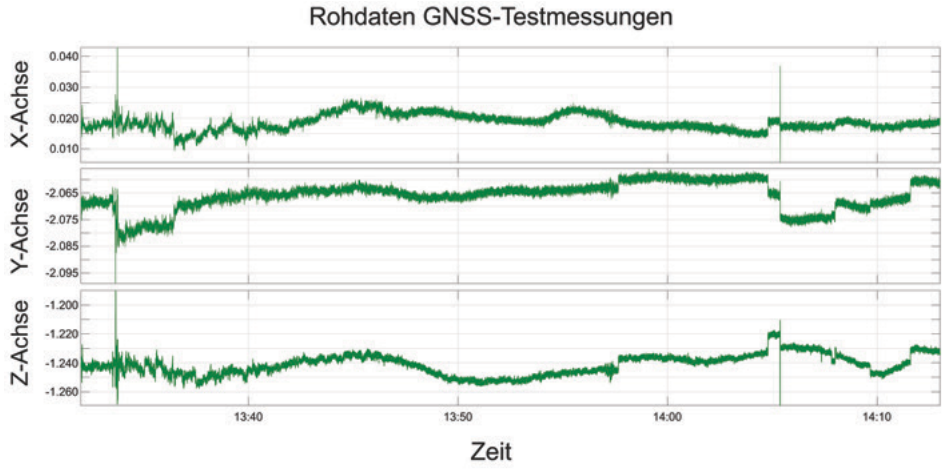


Abb. 7 | Darstellung der Rohdaten in *X*-, *Y*- und *Z*-Richtung bei Bewegung in *X*-Richtung

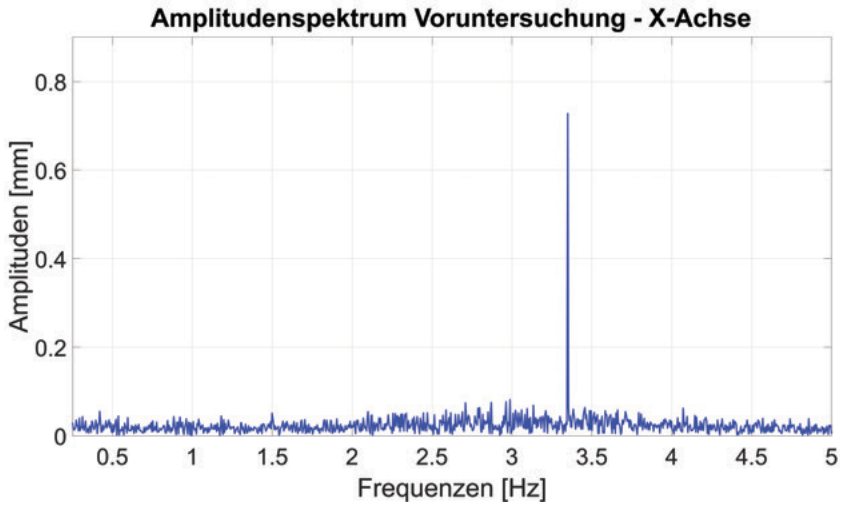


Abb. 8 | Darstellung des Amplitudenspektrums der GNSS-Messung bei Bewegung in X-Richtung

vorliegendem Signifikanzniveau (Verhältnis von Peak zu mittlerem Rauschen von ca. 0,023 mm) belegen, dass eine signifikante Aufdeckung von Schwingungen im Millimeter- bis Submillimeterbereich durch kostengünstige GNSS-Empfänger möglich ist. Hervorzuheben ist, dass dies nur in Verbindung mit einer Auswertung durch Werkzeuge der Zeitreihenanalyse erreichbar ist. Mit Blick auf das vorliegende Rauschniveau im Amplitudenspektrum sind Amplituden mit 0,2 mm signifikant aufdeckbar. Diese These wird durch Messungen an einem Überwachungsobjekt unter Realbedingungen weiterführend beleuchtet.

4 VALIDIERUNG DER SENSORERGEBNISSE AM REALOBJEKT

Als Mess- und Referenzobjekt konnte die Marienkirche in Neubrandenburg (*Abb. 9*) genutzt werden. Da dieses reale Untersuchungsobjekt im Rahmen einer seit 2014 andauernden Kooperation zwischen der Hochschule und der Stadt Neubrandenburg zur Verfügung steht, konnte im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten das Bewegungsverhalten der Kirche nachgewiesen werden.

Als Wahrzeichen der Stadt Neubrandenburg ist die Historie der Kirche bis zum Jahr 1248 zurückverfolgbar. Nach der Weihe im Jahr 1298 kann die Kirche eine Nutzung als Hauptpfarrkirche bis zum Jahr 2001 aufweisen. Im Jahr 1945 stark zerstört, wurde die Kirche schrittweise wieder aufgebaut. So ist eine Wiederherstellung des 90 Meter hohen Turms im Jahr 1983 abgeschlossen worden. Nach der Umwidmung zur Konzertkirche ist als letzte Wiederaufbaumaßnahme die Installation eines neuen Glockenstuhls mit fünf neuen Kirchenglocken im Jahr 2007 erfolgreich verlaufen (*Abb. 10*).

Aufgrund von deutlich spürbaren Turmbewegungen während des Glockenläutens, die vom subjektiven Eindruck der Besucher und des Betriebspersonals eine Auslenkung von ca. 10 Zentimetern ausmachen sollten, ist eine Untersuchung dieses Verhaltens als notwendig erachtet worden, da die Standsicherheit gefährdet schien. Diese Befürchtungen erwiesen sich allerdings als unbegründet; es stellten sich Bewegungsamplituden von maximal einem Millimeter heraus (siehe /Engel et al. 2017/). Eine Übersicht der Kirchenglocken in Neubrandenburg und deren Schwingverhalten findet sich in *Tab. 4*.

Abb. 9 | Die Marienkirche Neubrandenburg als Wahrzeichen der Stadt

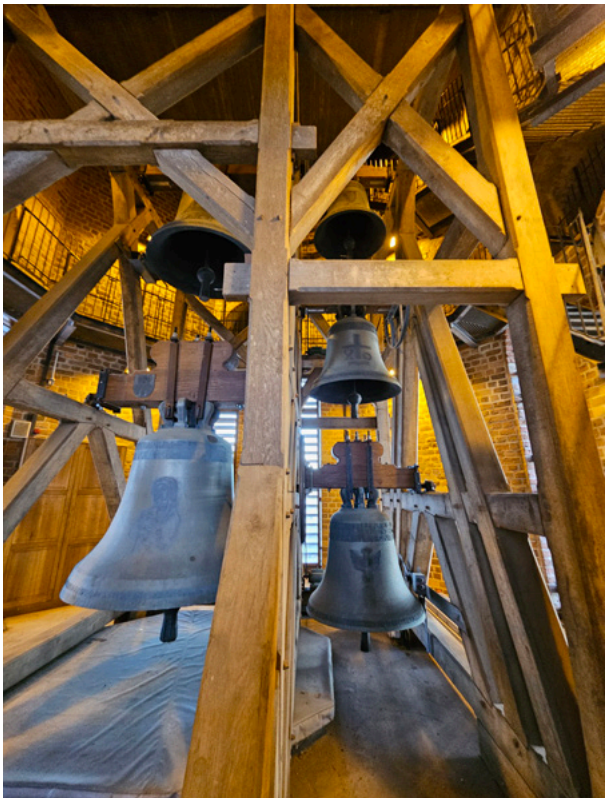


Abb. 10 | Der Glockenstuhl

Glocke	Glockenfrequenz	Gebäudefrequenz	Faktor
Marienglocke	0,38 Hz	1,14 Hz	3
Johannesglocke	0,42 Hz	1,26 Hz	3
Gebetsglocke	0,46 Hz	1,40 Hz	3
Sakramentsglocke	0,47 Hz	1,42 Hz	3
Lob- und Dankglocke	0,50 Hz	1,50 Hz	3

Tab. 4 | Zusammenstellung gemessener Glocken- und Gebäudefrequenzen

In der Kirche ist das Monitoring-System DABAMOS installiert worden (siehe /Engel & Schweimler 2016/), mit dem permanent das Bewegungsverhalten überwacht werden konnte.

Eine Veranschaulichung der Sensorverteilung vorheriger Messkonfigurationen findet sich in *Abb. 11*.

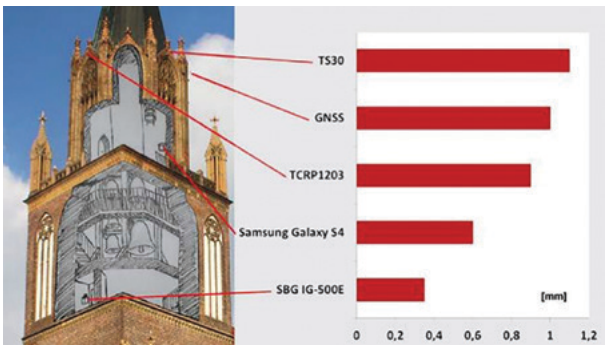


Abb. 11 | Darstellung der Amplituden der Kirchturmschwingung in den entsprechenden Höhen der Sensorinstallation /Engel et al. 2017/

Abb. 12 | GNSS-Antenne auf dem Hochschuldach mit Sicht zur Marienkirche

Abb. 13 | Antennenhalterung für zwei Antennen an der Marienkirche

Sensor	Messfrequenz	Anzahl
Leica GMX 902	20 Hz	2
u-blox ZED-F9P	20 Hz	2
Leica Nivel 210	6 Hz	2
Inertialsensoren	200 – 500 Hz	4
Tachymeter	20 Hz	3

Tab. 5 | Sensoren mit Abtastfrequenzen

Das Multisensornetzwerk erfasst mittels GNSS-, Inertial- und weiteren Sensoren den Bewegungszustand der Kirche. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in /Engel et al. 2018/ und in /Engel et al. 2020/. Durch sensorübergreifende Ergebnisse kann von einer gesicherten Datenlage zu den Turmschwingungen ausgegangen werden. Daher werden die Ergebnisse aus den früheren Untersuchungen als Referenzmaßstab für die Arbeiten dieses Beitrags herangezogen. Alle vorhandenen Sensoren wurden ebenfalls bei der aktuellen Messkampagne ausgewertet. Eine Erweiterung ist insbesondere durch das Low-Cost-GNSS vorgenommen worden (*Abb. 12* und *Abb. 13*). Hier konnte eine Installation jeweils zusätzlich zu den beiden Leica-GMX902-Sensoren (Referenz und Rover) von zwei u-blox ZED-F9P als zusätzliche Basis und Rover erfolgen. Somit kann ein direkter Vergleich der geodätischen Präzisions- und Low-Cost-Sensoren vorgenommen werden. In *Tab. 5* sind alle verwendeten Sensoren gezeigt.

Alle Messergebnisse der Sensoren sind für die spätere Zeitreihenanalyse aufbereitet worden. GNSS und Tachymeter erzeugen metrische Ergebnisse, die Messergebnisse der Inertialsensoren müssen hingegen über doppelte Integration von Beschleunigungswerten in metrische Amplituden umgerechnet werden. Die neigungsbasierten Amplituden des Leica Nivel210 können nicht ohne Weiteres in metrische Amplituden umgewandelt werden.

5 AUSWERTUNG DER MESSDATEN

Im Anschluss an die örtliche Datenerfassung wurden die vorhandenen GNSS-Messdaten vom Probeläuten am 13.02.2024 mit der Software RTKLIB prozessiert und anschließend in der Software Matlab durch Werkzeuge der Zeitreihenanalyse ausgewertet und visualisiert, um die Einsatzfähigkeit der kostengünstigen Hard- und Software zur Aufdeckung von Deformationen unter realen Messbedingungen zu überprüfen. Darüber hinaus werden erfasste Beschleunigungs- und Neigungsmessungen zur Plausibilitätsprüfung ausgewertet und vergleichend zu den Ergebnissen der GNSS-Messung betrachtet.

Ursächlich für die Deformationen am Kirchturm ist der Betrieb des Glockengeläuts. Dieses wird mithilfe einer elektrischen Glockenläuteanlage in Bewegung gebracht und schwingt dabei in Nord-Süd-Richtung. Im Ergebnis werden diese Schwingungen als Gebäudeantworten um den Faktor drei verstärkt wiedergegeben, wobei für den Besucher der Eindruck starker Schwingungen entsteht. Eine Zusammenstellung der empirisch ermittelten Schwingungen ist in *Tab. 4* gegeben; die in vorangegangenen Untersuchungen ermittelte maximale Amplitude liegt bei etwa einem Millimeter mit einer Frequenz von etwa 1,14 Hz /Köster et al. 2019/. Diese Ergebnisse dienen für die aktuellen Untersuchungen als Referenzmaßstab. Die Auswertungen aller Messungen betrifft nur die Nordkomponente. Der Nachweis der Deformationen erfolgt wie bei den Versuchsmessungen in Abschnitt 3.4 mithilfe einer Basislinienberechnung von dem Pfeiler auf dem Hochschuldach zu einer am Turm der Marienkirche angebrachten Antenne. Im weiteren Verlauf des Abschnitts liegt der Fokus auf der Auswertung der Daten der kostengünstigen GNSS-Empfänger. Als Rover an der Brüstung der Marienkirche kamen ein u-blox-ZED-F9P-Empfänger in Verbindung mit einer

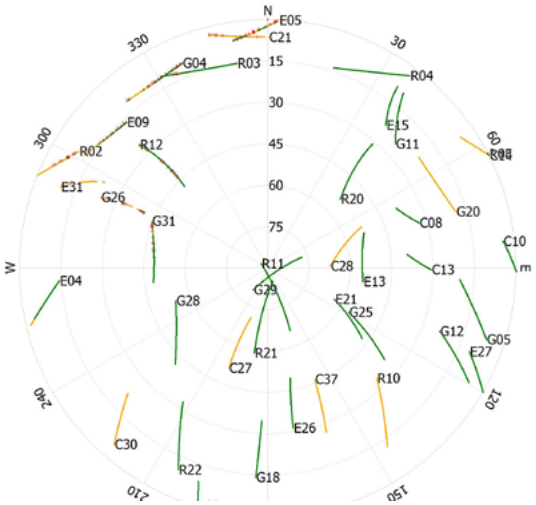


Abb. 14 | Erfasste Signale und Satellitenbahnen für den Zeitraum des Probeläutens

"ArduSimple simpleANT2B Survey"-Antenne zum Einsatz, als Basis auf einem Messpfeiler auf dem Dach der Hochschule Neubrandenburg wurde die gleiche Kombination als Basis verwendet. Die sich aus dem Messaufbau ergebende Basislinie weist eine Länge von circa einem Kilometer auf. Eine vorherige Sichtung der Rohdaten über das Modul RTKPLOT ist sinnvoll, um die Qualität der Mehrdeutigkeitslösung zu prüfen und eventuelle Datenlücken und Datensprünge auszuschließen. *Abb. 14* zeigt den Skyplot des Rover-Empfängers, *Abb. 15* zeigt den Plot der Rohdaten desselben Rovers über die Beobachtungszeit.

Als Ergebnis der örtlichen Messungen des Probeläutens am 13.02.2024 liegen in Bezug auf die Messung mit kostengünstigen GNSS-Empfängern Beobachtungsdaten der Satellitensysteme GPS, GLONASS, Galileo und Beidou zunächst im proprietären Beobachtungsformat .ubx der u-blox-Empfänger vor. Aufgrund kurzer Kabellängen konnten dabei entgegen den Angaben im Datenblatt Abtastraten von 20 Hz realisiert werden. Die Rohdaten von Rover und Basis müssen für die weitere Auswertung zunächst in das weiterverwendbare RINEX-Format konvertiert werden, hierfür bietet sich das in der Programmumgebung von RTKLIB integrierte Modul RTKCONV an. Liegen nun Beobachtungsdaten für Rover und Basis im RINEX-Format vor, so können diese zu einem Basislinienvektor im Postprocessing im Modul RTKPOST verarbeitet werden. Für die Prozessierung der Basislinie wird auf die bereits im Rahmen der Voruntersuchungen in RTKPOST verwendeten Parameter zurückgegriffen.

Es werden im Zeitraum des Probeläutens die Signale von 14 GPS-, zehn GLONASS-, zehn Galileo- und neun Beidou-Satelliten im Elevationsbereich über 15° auf mehreren Frequenzen empfangen. Dabei sind insbesondere eine große Anzahl an Signalunterbrechungen und ein gedämpftes Signal-Rausch-Verhältnis in nordwestlicher Richtung sichtbar (*Abb. 15*). Hierbei handelt es sich um Abschattungseinflüsse, welche durch den Turm der Marienkirche verursacht werden, da der Rover in südöstlicher Richtung angebracht ist. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse wird im Rahmen der Auswertung eine SNR-Maske erstellt und für den Rover angewendet.

Im Rahmen der Auswertung wird die Basislinie vom Rover an der Marienkirche zur Basis auf dem Dach der Hochschule Neubrandenburg (Länge Basislinie ca. 1 km) während Probeläutens und in

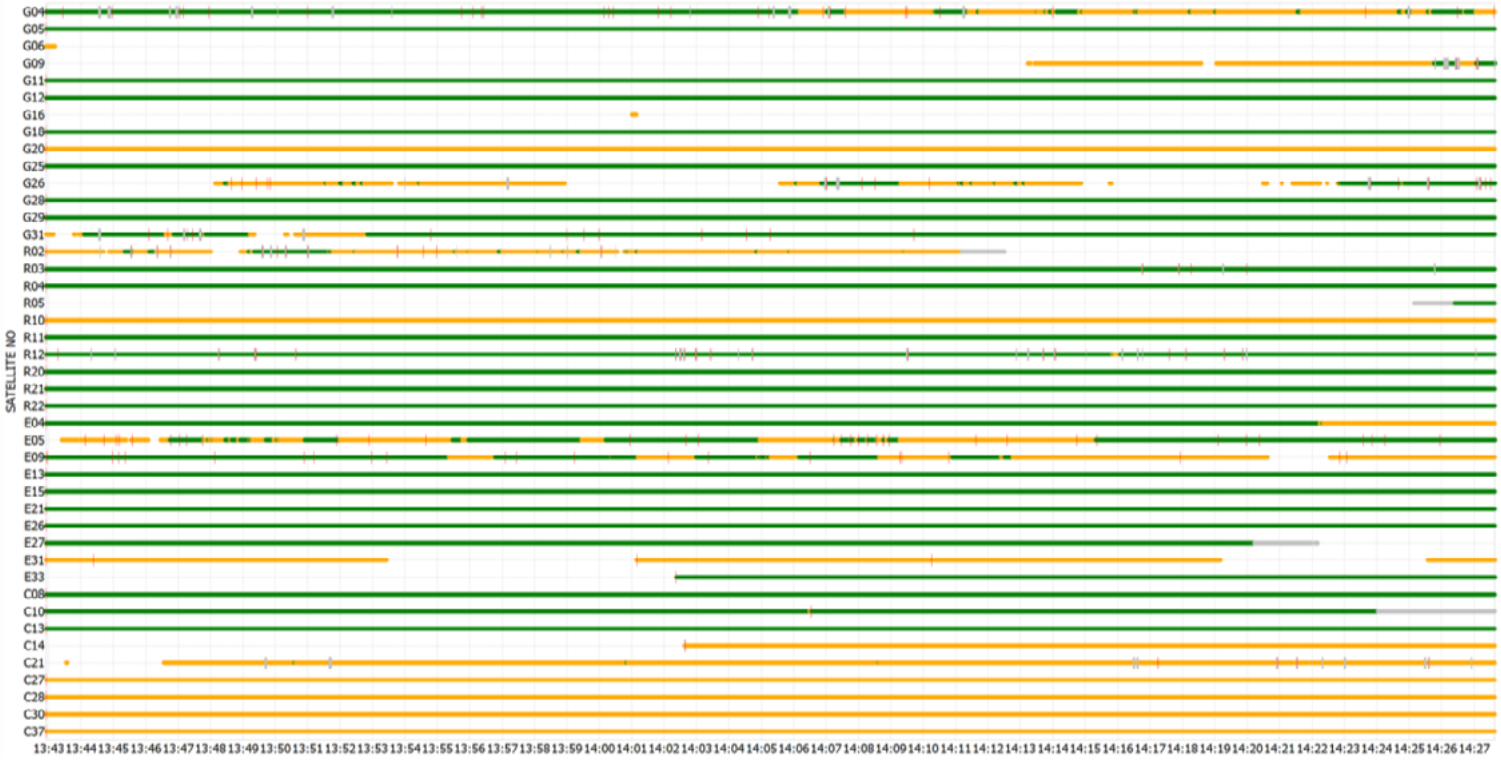


Abb. 15 | Verdeutlichung der Nutzung von vier verschiedenen Satellitensystemen. Zu sehen sind die erfassten Signale gelistet nach Satelliten im Zeitraum des Probeläutens.

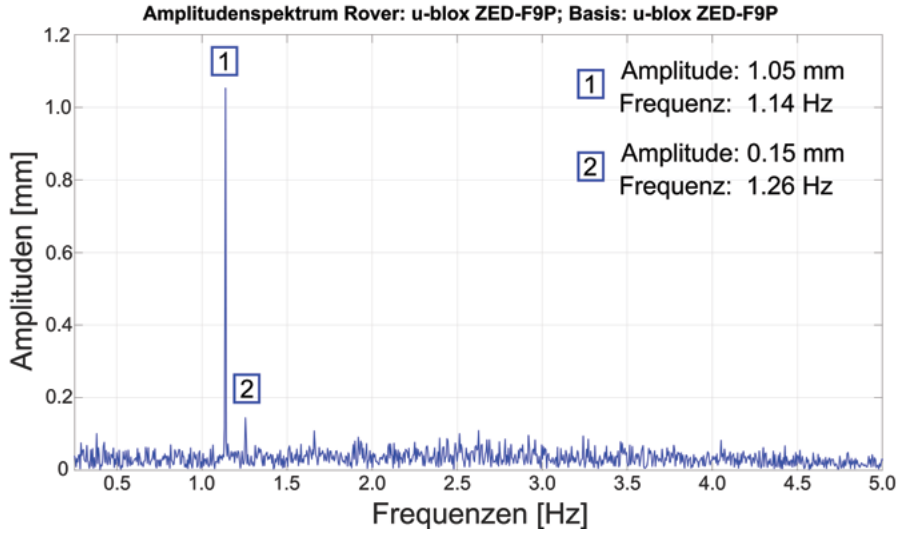


Abb. 16 | Auswertung der GNSS-Messung mit den Leica-Empfängern

Ruhemessung prozessiert. Die Ergebnisse sind in *Abb. 16* dargestellt. Mithilfe der Zeitreihenanalyse gelingt der Nachweis der erwarteten Gebäudeantworten bei 1,14 Hz und 1,26 Hz mit Amplituden von 1,05 mm und 0,15 mm.

Zur Bestimmung der Gebäudedeformation wurden weiterhin Beschleunigungs- und Neigungssensoren eingesetzt. Zur Validierung der GNSS-Ergebnisse sollen hier beispielhaft die Messdaten von einem Smartphone und einem Leica Nivel210 mit den Mitteln der Zeitreihenanalyse ausgewertet werden. An der Marienkirche konnten bereits bei früheren Messungen die Deformationen durch Erfassung von Beschleunigungen mit einem Smartphone nachgewiesen werden (siehe /Engel et al. 2020/). Im verwendeten Smartphone Samsung SM-G800F ist ein Beschleunigungssensor des Herstellers InvenSense® verbaut. Mithilfe einer geeigneten Sensorlogger-Anwendung können die Messwerte mit einer Abtastrate von 200 Hz aufgezeichnet und als Datei abgespeichert werden. Nach erfolgter Auswertung mithilfe der Zeitreihenanalyse können die als Beschleunigungen vorliegenden Amplituden durch doppelte Integration nach der Zeit in metrische Amplituden umgewandelt werden. Grundlage hierfür ist die Schwingungsgleichung für harmonische Schwingungen (Gl. (*2*)).

Aus den physikalischen Zusammenhängen kann durch doppelte Integration der Beschleunigung über die Zeit der zurückgelegte Weg ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist außerdem Grundlage für die Inertialnavigation. Es folgt zunächst die Geschwindigkeit durch Integration von Gl. (*3*):

$$\int A\,dt = \int A_B \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)\,dt$$
$$= \frac{-A_B}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) + C. \qquad (3)$$

Aus diesem Zusammenhang wird bereits deutlich, dass die Amplitude der Geschwindigkeit um den Faktor $2 \cdot \pi \cdot f$ kleiner ist als die Amplitude der Beschleunigung.

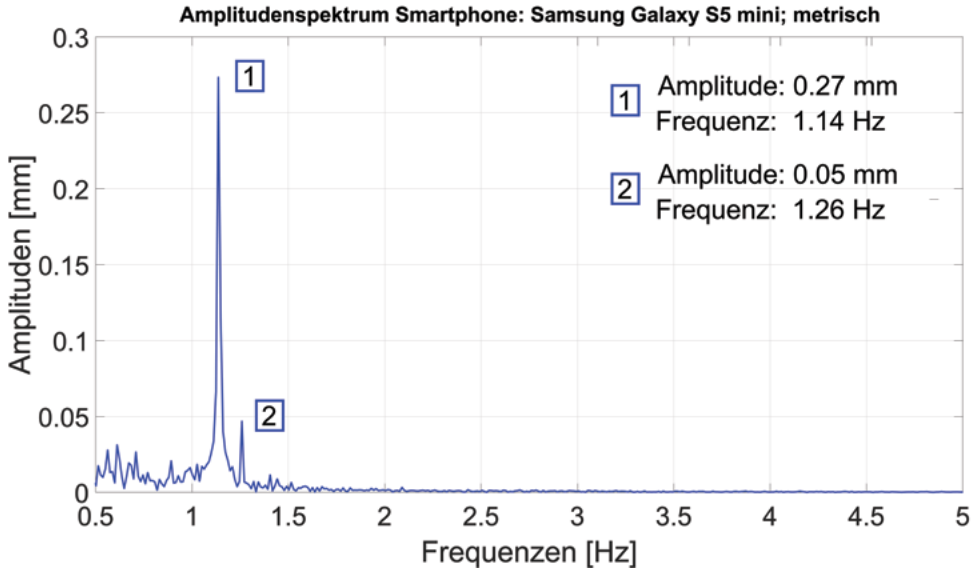


Abb. 17 | Auswertung der Beschleunigungsmessung während des Probeläutens

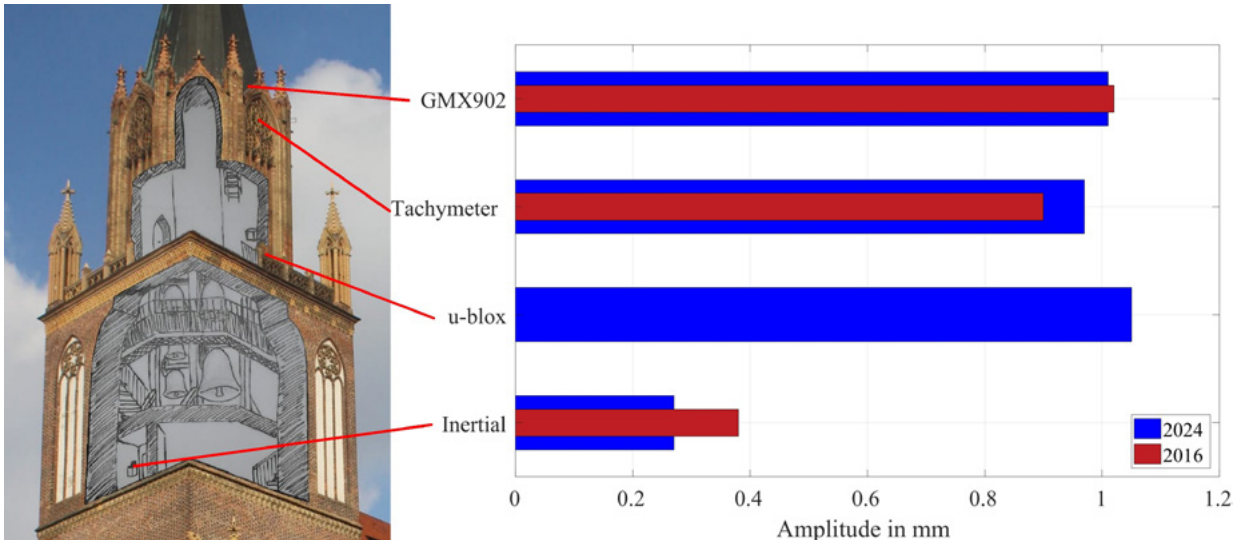


Abb. 18 | Ergebnisse der aktuellen Messkampagne mit Amplituden und Sensorstandort

Es folgt durch weitere Integration der Geschwindigkeit in Gl. (*4*) der Weg:

$$\begin{aligned}\iint A\,dt\,dt &= \iint A_B \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)\,dt\,dt \\ &= \int \frac{-A_B}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) + C\,dt \\ &= \frac{-A_B}{2\pi^2 f^2} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) + Ct + C. \end{aligned} \quad (4)$$

Aus Gl. (*4*) geht hervor, dass die Amplitude des Weges um den Faktor $4 \cdot \pi^2 \cdot f^2$ kleiner ist als die Amplitude der Beschleunigung. Somit kann eine metrische Amplitude bei Kenntnis der Parameter der Schwingungsgleichung direkt aus einer Beschleunigungsamplitude bestimmt werden.

Das Smartphone wurde für den Zeitraum der Messung im Serverraum des Kirchturms unterhalb der Glocken positioniert und entsprechend der erwarteten Deformationsrichtung ausgerichtet. Die stationäre Zeitreihe der Nordkomponente sowie das daraus berechnete Amplitudenspektrum für das gleiche Zeitfenster wie bei der GNSS-Auswertung sind in *Abb. 17* dargestellt. Die Gebäudeantworten von 1,14 Hz und 1,26 Hz können mit allen Verfahren nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der aktuell verwendeten Sensoren, welche in *Tab. 5* vorgestellt sind, werden bezüglich ihres Standorts in *Abb. 18* dargestellt. Im Vergleich mit Ergebnissen aus *Abb. 11* der vorherigen Messkampagne, die in Rot dargestellt ist, kann eine Übereinstimmung der aktuellen Ergebnisse, die in Blau dargestellt ist, leicht nachvollzogen werden. Durch diesen Umstand ist eine Validierung der durch die kostengünstigen GNSS-Empfänger ermittelten Amplituden und Frequenzen sichergestellt.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Überwachung von periodischen Schwingungsvorgängen an Bauwerken hat stark an Aktualität gewonnen. Die vorliegenden Ergebnisse beweisen die Nutzbarkeit von kostengünstigen GNSS-Empfängern zur Überwachung periodischer Schwingungen an Bauwerken. Hierbei können Frequenzen bis zu maximal 10 Hz und Amplituden bis zu minimal 0,2 mm signifikant aufgedeckt werden.

Diese Thesen werden durch einen zweistufigen Versuchsaufbau validiert:

- Ergebnisse der Voruntersuchungen unter Laborbedingungen mit fest eingestellter Frequenz und Amplitude am Schwingungserzeuger.
- Ergebnisse der mehrjährigen Untersuchungen am Überwachungsobjekt Marienkirche Neubrandenburg mit multipler Sensorik. Vergleich der Ergebnisse der Messungen durch kostengünstige GNSS-Empfänger mit den Ergebnissen der geodätischen Präzisionssensoren aus vorangegangenen Untersuchungen.

Als besonders praktikabel hat sich das Messsystem aus drei Komponenten erwiesen; kostengünstige GNSS-Empfänger konnten mit kostengünstigen GNSS-Antennen und kostenfreier Software kombiniert eingesetzt werden und liefern hierbei kompetitive und vergleichbare Ergebnisse zu den proprietären Präzisionsempfängern.

Besonders hervorzuheben ist der Umstand, dass das kostengünstige Messsystem einen vollen Funktionsumfang zu herkömmlicher Präzisionsmesstechnik bietet. Die Daten aller aktuellen Satellitensysteme können durch den Zweifrequenz-Empfänger genutzt werden. Auch softwareseitig ist eine Einbindung der kostenfreien Lösung in bestehende Monitoring-Systeme möglich. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit bietet das kostengünstige Messsystem einen Preisvorteil von bis zu Faktor 10–40 im Vergleich zu üblichen GNSS-Präzisionsempfängern, wie sie in der geodätischen Bauwerksüberwachung verwendet werden.

Methoden der Signalanalyse sind bei der Auswertung von Zeitreihen ein wichtiges Werkzeug. Eine effiziente Möglichkeit zur Transformation der Messdaten in eine Frequenzdarstellung bietet die Fourier-Transformation. Durch die Darstellung periodischer Schwingungsvorgänge in Amplitude und Frequenz wird ein enormer Erkenntnisgewinn hinsichtlich der auf das Bauwerk wirkenden Deformationen generiert. Somit kann eine Bewertung der Stand- und Funktionssicherheit des Bauwerks erfolgen und ein interdisziplinärer Austausch wird ermöglicht.

Einen Ausblick und Gegenstand zukünftiger Forschungen stellt die Erprobung weiterer, spezialisierter Auswerteverfahren wie der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) oder der Wavelet-Transformation dar. Außerdem ist eine Einbindung in bestehende Monitoring-Systeme denkbar. Darüber hinaus ist der Bau eines prototypischen, kostengünstigen GNSS-basierten Überwachungssensors in Planung.

LITERATUR

ArduSimple (2024): RTK-Empfänger: simpleRTK2B Serie. https://www.ardusimple.de/simplertk2b-receivers (25.01.2025).

Cooley, J.; Tukey, J. (1965): An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. In: Mathematics of Computation 19(1965)90, 297–301.

Engel, P.; Foppe, K.; Köster, U. (2017): Ingenieurgeodätisches Monitoring an der Marienkirche Neubrandenburg. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 142(2017)4, 239–244.

Engel, P.; Foppe, K.; Köster, U. (2018): Multisensorsystem zur Erfassung von Turmschwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg. In: DVW-Schriftenreihe 92. Wißner, Augsburg, 168–177.

Engel, P.; Foppe, K.; Köster, U. (2020): Ingenieurgeodätisches Monitoring im Internet of Things. Entwicklung und Erprobung autonomer Sensorsysteme. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Engel, P.; Schweimler, B. (2016): Design and Implementation of a Modern Automatic Deformation Monitoring System. In: Journal of Applied Geodesy 10(2016), 79–85.

Everett, T. (2024): rtkexplorer – Exploring high precision GPS/GNSS with low-cost hardware and software solutions. rtklibexplorer – Exploring precision GPS/GNSS with RTKLIB open source software and low-cost u-blox GNSS receivers (Webblog). https://rtklibexplorer.wordpress.com (03.11.2024).

European Union Agency for the Space Programme (2022): EUSPA EO and GNSS Market Report 2022(1). Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Heideman, M.; Johnson, D.; Burrus, S. (1985): Gauss and the history of the fast Fourier transform. In: Archive for History of Exact Sciences 34(1985), 265–277.

Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. Aufl. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Hoffmann, R.; Wolff, M. (2014): Intelligente Signalverarbeitung 1 – Signalanalyse. 2. Aufl. Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg.

Kersten, T.; Paffenholz, J.-A. (2020): Feasibility of Consumer Grade GNSS Receivers for the Integration in Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 20(2020).

Köster, U.; Engel, P.; Foppe, K. (2019): Anwendung der Kurzzeit-Fourier-Analyse auf SMD-Schwingungsmessungen an und in historischen Bauwerken. In: Tagungsband Geomonitoring (2019), 207–214.

Möser, M; Hoffmeister, H.; Müller, G.; Staiger, R.; Schlemmer, H. (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen. 4. Aufl. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Morgenthal, G.; Rau, S.; Nowack, M. (2019): Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (Abschlussbericht Forschungsprojekt). Fraunhofer IRB, Stuttgart.

Neuner, H.; Foppe, K. (2009): Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich. In: DVW-Schriftenreihe 74. Wißner, Augsburg, 35–64.

Nyquist, H. (1928): Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers 47(1928)2, 617–644.

RTKLIB (2024): RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. https://www.rtklib.com (25.01.2025).

RWTH Aachen University (2024): phyphox – Physical Phone Experiments. https://phyphox.org/de/home-de (25.01.2025).

Stempfhuber, W. (2022): Möglichkeiten und Grenzen von modularen Low-Cost-Komponenten für automatisierte Deformationsmessungen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 129(2022)4, 134–141.

Takasu, T. (2013): RTKLIB Manual. Version 2.4.2. 29.04.2013. https://www.rtklib.com/rtklib_document.htm (25.01.2025).

u-blox AG (2024a): u-blox unveils X20, its new revolutionary all-band high-precision GNSS platform. https://www.u-blox.com/en/u-blox-unveils-x20-new- revolutionary-all-band-high-precision-gnss-platform (25.01.2025).

u-blox AG (2024b): ZED-F9P Module. https://www.u- blox.com/en/product/zed-f9p-module (25.01.2025).

Willemsen, T.; Engenhorst, M.; Schmitz, A.; Dankmeyer, U. (2022): Konzept einer Multi-MEMS für die Bauwerksüberwachung. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 129(2022)1-2, 11–27.

Xue, C.; Psimoulis, P. (2023): Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers. In: Engineering Structures 284(2023).

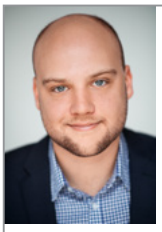
Xue, C.; Psimoulis, P.; Horsfall, A.; Zhang, Q.; Meng X. (2023): Assessment of the accuracy of low-cost multi-GNSS receivers in monitoring dynamic response of structures. In: Applied Geomatics 15(2023), 315–326.

AUTOREN

M. Eng. Uwe Köster

CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL
GEOGRAPHISCHES INSTITUT

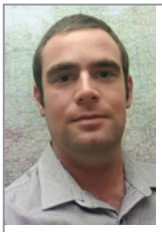
Ludewig-Meyn-Straße 8 | 24118 Kiel | Deutschland
koester@geographie.uni-kiel.de | ORCID: 0009-0001-5338-2220



B. Eng. Dennis Vollert

HOCHSCHULE NEUBRANDENBURG

Brodaer Straße 2 | 17033 Neubrandenburg | Deutschland
vollert@hs-nb.de



M. Eng. Albert Schnak

HOCHSCHULE NEUBRANDENBURG

Brodaer Straße 2 | 17033 Neubrandenburg | Deutschland

Manuskript eingereicht: 23.11.2024 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet