

Smartphones als Schwingungsmesser – Anwendungstauglichkeit für Brücken

Maximilian Garsch

WETZEL & von SEHT, beratende Ingenieure Partnerschaft mbB

Zusammenfassung: Smartphones sind aus dem modernen Leben nicht mehr wegzudenken. Immer mehr Entwicklungen nutzen die zahlreichen Sensoren, die in den Geräten verbaut sind, um damit Informationen über Nutzer und deren Umwelt zu generieren. Können diese Geräte aber auch für die Bauwerksüberwachung und -prüfung verwendet werden? Die vorliegende Studie präsentiert Ergebnisse bezüglich der Anwendungstauglichkeit von Smartphones für Schwingungsmessungen. Durch mehrere Versuchsreihen wurde nachgewiesen, dass Smartphones in der Lage sind, ausreichend präzise und zuverlässige Schwingungsdaten zu erfassen. Dies ermöglicht eine kostengünstige und zugängliche Alternative zu herkömmlichen Messgeräten. Die Validierung erfolgte durch den Vergleich mit etablierten Messtechniken, wobei eine bemerkenswerte Übereinstimmung festgestellt wurde. Diese Erkenntnisse unterstreichen das enorme Potenzial von Smartphones im Bereich der Schwingungsmessungen und eröffnen neue Perspektiven für die Überwachung und Analyse von Strukturen in verschiedenen Anwendungsbereichen.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die stetige Digitalisierung und Entwicklung der Bauwerksplanung und des Bauwerksmanagements eröffnen neue Möglichkeiten für das lebenszyklusbegleitende Bauwerksmanagement. Die rund 40.000 Brücken, die sich im deutschen Bundesfernstraßennetz befinden, müssen überwacht und überprüft werden. Die Grundlage des Qualitätsmanagements der Bauwerkserhaltung von Ingenieurbauwerken ist DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung“ [1].

Eine Entscheidung über die Ertüchtigung eines Bauwerkes wird unter anderem auf Basis einer Zustandsnote getroffen. Diese Zustandsnote ist das Ergebnis einer wiederkehrenden Bauwerksprüfung nach DIN 1076 und unter Berücksichtigung der „Richtlinie zur

einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksüberprüfung nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF [2]).

Seit 2020 wird neben der Zustandsnote wird durch einen Vergleich der Soll- und der Ist-Tragfähigkeit ein sogenannter Traglastindex (TLI) bestimmt. Der TLI ist ein Indikator der Dringlichkeit einer Instandsetzung und ergänzt die Zustandsnote, um Bauwerke zur Instandsetzung zu priorisieren.

Die Instandsetzung von Ingenieurbauwerken ist ein fester Bestandteil des lebenszyklusbegleitendem Bauwerksmanagements und erforderlich, um die geplante Lebensdauer eines Bauwerks zu erreichen.

Sofern Brückenprüfende in die Lage versetzt werden, regelmäßig Daten über ein Bauwerk mit Hilfe von Monitoring zu sammeln, ist es möglich, eine (digitale) Referenzdatenbank für Ingenieurbauwerke (beispielsweise in Form eines BIM-Modelles) anzulegen. Durch den regelmäßigen Vergleich aktuell gemessener Daten, beispielsweise während der wiederkehrenden Bauwerksprüfung, mit Referenzdaten, ist eine Indikation von Änderungen der Tragstruktur und damit von Schäden möglich. Mit dem Nachweis der Anwendungstauglichkeit von Smartphones zur Schwingungsmessung an Brücken ist ein erster Schritt zur Erhebung von Monitoring-Daten über Ingenieurbauwerke getan.

2 Sensorik

Zum Nachweis der Anwendungstauglichkeit wurden verschiedene Smartphones und Tablets (SPT) als Sensorsysteme eingesetzt. Die Smartphones und Tablets wurden mit einem klassischen Schwingungsmesssystem (engl. vibration measurement system, VMS) verglichen. Die Ergebnisse der Signalauswertung wurden zusätzlich mit den Ergebnissen einer numerischen Modalanalyse eines Finite Elemente Modelles verglichen.

2.1 Klassisches Schwingungsmesssystem (VMS)

Das VMS besteht aus mehreren Komponenten.

- Sensor (Geophon)
- Messverstärker und A/D-Wandler
- Messrechner

Ein analoges, kontinuierliches Signal (hier die Bauwerksschwingung) wird von den Sensoren aufgenommen und an den Messverstärker weitergeleitet. Das Signal wird verstärkt (Messverstärker) und durch den A/D-Wandler abgetastet und in ein digitales Signal überführt. Die Abtastung beim hier vorliegenden System beträgt ca. 2048 Hz. Das digitale Signal wird an den Messrechner zur Aufzeichnung und weiteren Verarbeitung weitergeleitet.

Die Sensoren, die beim vorliegenden Messsystem zum Einsatz kommen, sind sog. Geophone, die die Geschwindigkeit aufnehmen.

2.2 Smartphones und Tablets (SPT)

SPT beinhalten unter anderem alle der oben genannten Komponenten in einem Gerät auf kleinem Raum. Neben dem Messrechner in Form eines internen Speichers und einer Recheneinheit (CPU) besitzen SPT neben einer Vielzahl anderer Sensoren Bewegungssensoren in Form sogenannter Micro Electro Mecanical Systems (MEMS). Diese MEMS messen in der Regel die Beschleunigung (Accelerometer).

Die Akzelerometer, die in einem SPT verbaut sind, messen einachsig die Beschleunigung des Sensors, da sich durch das Verschieben einer Masse im Sensor die angelegte Spannung ändert. Die Spannungsänderung ist proportional zur Beschleunigung. Um Beschleunigungsinformationen in den Raumrichtungen eines orthogonalen Koordinatensystems zu erhalten, werden drei dieser MEMS-Sensoren orthogonal zueinander verbaut.

Die Eigenschaften des Messsystems SPT sind abhängig von den technischen Spezifikationen des verbauten Sensors, aber auch von dessen Energieversorgung. So können sich, auch während einer Messung, die Spezifikationen wie Rauschband, Sensitivität oder Abtastrate ändern. Die Energieversorgung wird dabei durch das Betriebssystem anhand des vorgegebenen Energiemanagements gesteuert und ist für einen Nutzer und einen Entwickler nicht beeinflussbar.

Abb. 1 zeigt die einzelzeitschritte, die bis zur nächsten Abtastung des Sensors vergehen. Dargestellt sind jeweils 230.000 Abtastungen für verschiedene SPT. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Abtastung nicht in einem konstanten Zeitabstand erfolgt, sondern während einer Messung variiert. Ein maßgebliches Kriterium für die Auswertbarkeit von Messsignalen ist die Konstanz der Zeitschritte zwischen den einzelnen Abtastungen (Samples). Hier zeigen sich große Unterschiede bei den dargestellten SPT.

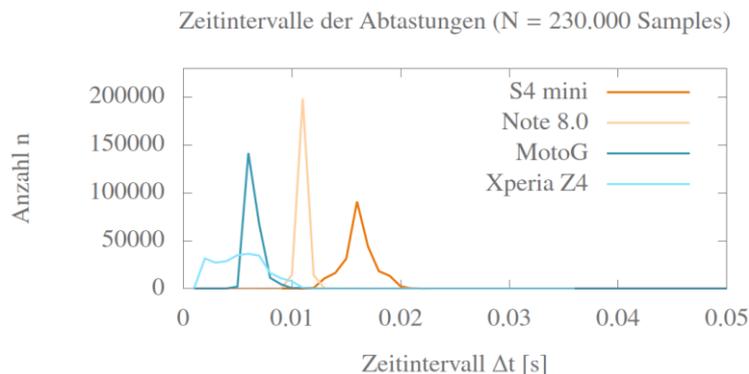


Abbildung 1: Anzahl der Zeitintervalle der Abtastungen von Signalen mit N=230.000 Samples ausgewählter SPT

Da es sich bei SPT durch nicht beeinflussbare Prozesse um eine Art Blackbox handelt, ist es erforderlich, die Geräte als Ganzes und nicht nur deren Sensoren zu betrachten. Im Folgenden

wird ein Auszug aus den Versuchen gezeigt, die angestellt wurden, um die Anwendungstauglichkeit von SPT zur Schwingungsmessung zu untersuchen.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die Praxistauglichkeit von Smartphones und Tablets wurde durch mehrere Versuche und ihre Auswertung analysiert. Einerseits wurden Experimente an einem Einfeldträger (EFT) durchgeführt, um die grundlegende Eignung von Smartphones zu überprüfen. Andererseits wurden Versuche an einer Testbrücke auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr durchgeführt, die realen Brückenabmessungen entspricht. Nach dem erfolgreichen Nachweis der prinzipiellen Anwendungstauglichkeit, wurden Versuche an einem Realen Bauwerk, einer Straßenbrücke über die Lesum in Bremen durchgeführt, die im Folgenden kurz erläutert werden.

3.1 Lesumbrücke

Die Lesumbrücke (siehe Abb. 2) ist eine einfeldrige Stahl-Bogenbrücke mit einer abgehängten orthotropen Fahrbahnplatte. Der Überbau erstreckt sich zwischen den Geländern auf eine Breite von 17,20 m und spannt über ein Feld von 70,15 m von Auflager zu Auflager. Die Bögen, die als Hohlkästen ausgeführt sind, haben variable Querschnitte in ihrer Höhe. Am Scheitel beträgt die Höhe 1,00 m, am Fußpunkt 1,64 m. In der Achse der Bögen sind Versteifungsträger in der Fahrbahn integriert. Diese weisen Doppel-T-Querschnitte mit einer Höhe von 1,64 m auf. Abstände von jeweils 6,70 m sind die Versteifungsträger mit Rundstahlhängern abgehängt. In regelmäßigen Abständen von 3,35 m befinden sich rechtwinklig zu den Versteifungsträgern Querträger, die 4,20 m über die Versteifungsträger auskragen.



Abbildung 2: Straßenbrücke über die Lesum in Bremen

3.2 Finite-Elemente-Modell

Vor der Durchführung der Messung wurde ein Finite-Elemente-Modell der Brücke mithilfe der Software SOFiSTiK [3] erstellt, basierend auf den Dokumenten der statischen Berechnung und den dazugehörigen Plänen, die vom Amt für Straßen und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen bereitgestellt wurden. Durch eine dynamische Analyse des Modells wurden die Eigenfrequenzen und Eigenmoden berechnet. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnung wurden verwendet, um geeignete Messpunkte auszuwählen, Vergleichswerte der Eigenfrequenzen zu bestimmen und Eigenfrequenzen ihren entsprechenden Eigenmoden zuzuordnen.

Auf eine Beschreibung der Modellierung wird an dieser Stelle verzichtet.

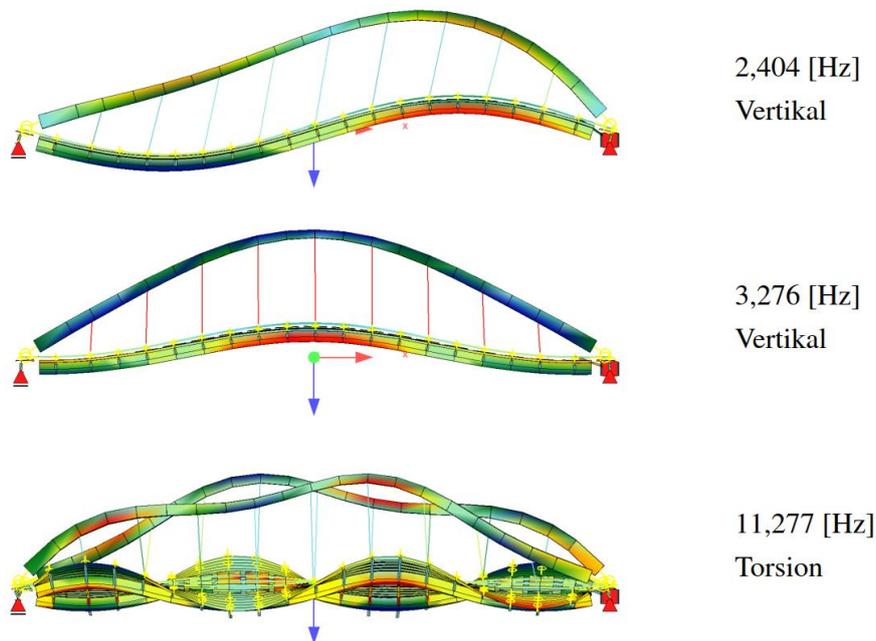


Abbildung 3: Auswahl von Eigenfrequenzen und deren zugehörige Eigenmoden des FE-Modelles der Lesumbrücke

Abb. 3 zeigt eine Auswahl von berechneten Eigenfrequenzen und deren zugehörige Eigenmoden des Gesamttragwerkes, sowie deren maßgebliche Richtung der Schwingung.

3.3 Messungen an der Lesumbrücke

Die Messungen erfolgten an zwei ausgewählten Positionen. Die Wahl der Messpunkte basierte auf den Eigenmoden, die mit dem Finite-Elemente-Modell berechnet wurden. Dabei wurden die Messpunkte so positioniert, dass keine Nulldurchgänge in der Eigenmode der ersten Eigenfrequenz auftreten. Position 1 befand sich entlang der Längsrichtung der Brücke

im ersten Drittelpunkt bei $l = 23,5$ m, während Position 2 in Längsrichtung der Brücke im zweiten Drittelpunkt bei $l = 47$ m lag. Beide Messpunkte befanden sich jeweils neben einem Versteifungsträger.

Für die Messungen kamen ein VMS sowie die SPT Samsung Galaxy A3 und Motorola MotoG zum Einsatz. Eine besondere Vorgehensweise bei dieser Messung bestand darin, ein SPT in einer 3D-gedruckten Hülle auf der Brücke zu platzieren. Um sicherzustellen, dass die Hülle das Signal nicht dämpfte, wurde vor den eigentlichen Brückenmessungen eine Testmessung sowohl mit als auch ohne Hülle durchgeführt. Die Hülle führte zu keiner Dämpfung des Signals. Es wurde festgestellt, dass das SPT in der Hülle etwas sensitiver war im Vergleich zur Testmessung ohne Hülle. Dieses Ergebnis lässt sich auf die Abstandhalter (Schrauben) an der Unterseite der Hülle zurückführen. Die Abstandhalter gewährleisteten eine bessere Verbindung der Hülle bzw. des SPT mit der Oberfläche des Brückenoberbaus. Dadurch werden minimale Bewegungen durch das Rutschen des SPT während einer Vibration reduziert.

Die Brücke wurde durch den laufenden Straßenverkehr angeregt. Die ambiente Anregung durch die Fahrt von Fahrzeugen ermöglicht die Durchführung von Schwingungsmessungen und die Bestimmung von Eigenfrequenzen [4, 5].

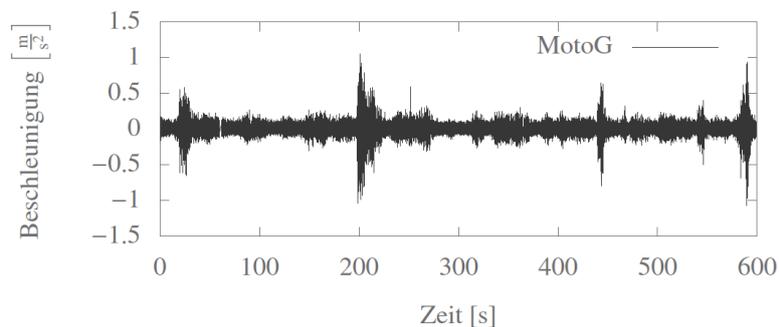


Abbildung 4: Schwingung der Brücke über die Lesum unter laufendem Straßenverkehr, aufgenommen durch das SPT MotoG

Abb. 4 ist zu entnehmen, dass die ambiente Anregung durch Straßenverkehr für ausreichend große Amplituden des Tragwerkes ausreichend war, um die Bauwerksschwingung durch das SPT aufzuzeichnen.

Einzelne Signalausschnitte, die eine Anregung und den darauffolgenden Ausschwingvorgang beinhalten, wurden einer Fast-Fourier-Transformation unterzogen und so in ihr Frequenzspektrum überführt. Das resultierende Frequenzspektrum zeigt die im Signal vorhandenen Frequenzen sowie deren Amplitudenanteile an der Gesamtschwingung.

Die Frequenzspektren der SPT und des VMS zeigen eine gute Übereinstimmung in den gemessenen Frequenzen. Dies ist in Abb. 5 ersichtlich. Die Amplitudenanteile der Haupt-/Eigenfrequenzen im Signal des VMS zeigen höhere Werte als die Amplitudenanteile der Haupt-/Eigenfrequenzen des dargestellten SPT (Samsung Galaxy A3). Dies ist unter anderem auf einen erhöhten Anteil an Rauschen im Signal des SPT zurückzuführen.

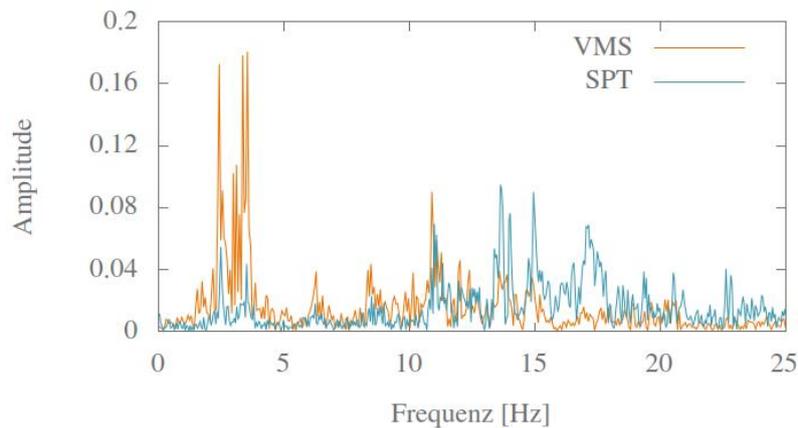


Abbildung 5: Vergleich der Frequenzspektren der Signale des VMS und des SPT Samsung Galaxy A3

In Abb. 5 sind die eindeutigen lokalen Maxima im Frequenzspektrum des SPT zu erkennen. Eine Auswertung der Signale der SPT zur Ermittlung von Eigenfrequenzen ist damit möglich.

Die Eigenfrequenzen, die mithilfe der Signale der SPT erfasst wurden, stimmen gut mit den Eigenfrequenzen überein, die durch das VMS und die FEM-Berechnung ermittelt wurden. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung der Hülle einen positiven Einfluss auf die Messungen hat. Das SPT in der Hülle erweist sich als etwas sensitiver im Vergleich zur Messung ohne Hülle. Die ermittelten Eigenfrequenzen des SPT mit Hülle weichen, abgesehen von einigen Ausnahmen, geringfügig weniger von den durch das VMS ermittelten Eigenfrequenzen ab als die Eigenfrequenzen, die mit dem SPT ohne Hülle erfasst wurden.

Da das FE-Modell auf Informationen aus der statischen Berechnung und den Konstruktionsplänen basiert, kann es als zuverlässiges Mittel zur Ermittlung von Eigenfrequenzen betrachtet werden. Die berechneten Eigenfrequenzen sind jedoch aufgrund der Modellierung mit Unsicherheiten verbunden. Trotz der Fehler, die durch die Abstraktion des realen Objekts im Modell entstehen, kann aufgrund der Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen davon ausgegangen werden, dass sich das Objekt annähernd im gleichen Zustand wie nach der Errichtung befindet. Die Anwendbarkeit von SPT zur Messung von Schwingungen an Brücken kann aufgrund des vorgestellten Versuchs an der Brücke über die Lesum unter laufendem Verkehr als gegeben betrachtet werden.

4 Zusammenfassung

Im dargestellten Feldversuch wurde die Eignung von Smartphones zur Schwingungsmessung an einer Straßenbrücke unter laufendem Verkehr untersucht. Die ermittelten Eigenfrequenzen aus den Signalen von Smartphones zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen eines klassischen Schwingungsmesssystems und eines Finite Elemente Modells. Zudem wurde der Einfluss einer Hülle auf ein Smartphone analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass durch die Verwendung einer stabilen Hülle und einer punktuellen Auflagerung auf der Fahrbahn eine höhere Sensitivität erreicht wurde, was zu verbesserten Ergebnissen mit dem Smartphone führte.

Die durchgeführten Messreihen und deren Analyse verdeutlichen, dass Smartphones grundsätzlich gut für Schwingungsmessungen an Brücken geeignet sind. Obwohl es bestimmte Anwendungsgrenzen gibt, wie zum Beispiel die Amplitude des Bauwerks, die auch durch das Verhältnis der Brückensteifigkeit zur Anregungsintensität beeinflusst wird, ermöglichen die gezeigten Geräte dennoch zuverlässige Messungen. Es wurde beobachtet, dass neuere Smartphones und Tablets besser geeignet sind als ältere Modelle, und es ist zu erwarten, dass die kontinuierliche Leistungsverbesserung von Geräten und Sensoren in Zukunft die Ergebnisse von Schwingungsmessungen weiter optimieren wird.

Literatur

- [1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 1076 - Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung. Beuth, Berlin, 1999
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG. Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, RI-EBW-PRÜF. Verkehrsbl.-Verl., Dortmund, 2017
- [3] SOFiSTiK AG. SOFiSTiK. Online: <https://www.sofistik.de/>, 2018
- [4] FARRAR, C.R; JAMES III, G. H. System Identification from ambient vibration measurements on a bridge. Journal of Sound and Vibration, 205 (1997), S. 1-18
- [5] PETERSEN, C.; WERKLE, H. Dynamik der Baukonstruktionen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017