

Anwendung der Kurzzeit-Fourier-Analyse auf SMD-Schwingungsmessungen an und in historischen Bauwerken

UWE KÖSTER, M. ENG., PHILIPP ENGEL, M. ENG. & PROF. KARL FOPPE

Ein neu entwickelter Low-Cost-Beschleunigungssensor wurde im Rahmen ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen eingesetzt, um das Schwingungsverhalten des Turms der Marienkirche Neubrandenburg während des Läutens zu detektieren. Der Sensor konnte in das bestehende Monitoring-System eingebunden werden. Die Auswertung erfolgte mit Analysemethoden der Signaltheorie. Bisher kam zur Frequenzanalyse meist nur die konventionelle Fourier-Transformation zur Anwendung. Mit der Wavelet-Transformation und der Kurzzeit-Fourier-Transformation stehen aber Methoden zur Verfügung, die auch die zeitlichen Veränderungen der Schwingungsfrequenzen aufzeigen. Die berechneten Werte stimmen mit Dauer und Zeitpunkt der einzelnen Glockenschwingungen überein. Die Auswertung der Zeitreihen ergab für alle eingesetzten Sensortypen vergleichbare Amplituden und Frequenzen. Darüber hinaus wurden weitere Objekte messtechnische untersucht.

Schlüsselwörter – Fourier-Transformation, MEMS, Monitoring

1. Die Zeitreihe im Zeit- und Frequenzbereich

Bei der Betrachtung einer Zeitreihe wird zwischen Zeit- und Frequenzbereich unterschieden. Im Zeitbereich sind die Frequenzen nicht verfügbar, dem Frequenzbereich fehlen hingegen die Zeitinformationen. So kann nicht festgestellt werden, welche Frequenz zu welchem Zeitpunkt auftritt. Damit ist es zunächst nicht möglich, einzelne Schwingungen ihrem zeitlichen Auftreten zuzuordnen. Dies ist aber eine wichtige Aufgabe, die sich nur mit einer Zeitinformation lösen lässt, da die auftretenden Schwingungen bei Monitoring-Aufgaben ihrer Ursache zugeordnet werden müssen. Es soll daher eine Möglichkeit aufgezeigt werden, die eine kombinierte Analyse im Zeit- und Frequenzbereich erlaubt.

1.1. Kurzzeit-Fourier-Transformation

Bei der *Short-Time-Fourier-Transformation* (STFT) wird ein gegebenes Signal in Zeitintervalle unterteilt und die Transformation für jedes Segment separat durchgeführt. Dafür wird das Signal mit einer sogenannten Fensterfunktion multipliziert, wobei die Fensterfunktion nur einen begrenzten Zeitbereich abdeckt und über einen Verschiebungsparameter entlang der Zeitachse verschoben werden kann:

$$\hat{f}(F, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g(t - \tau) e^{-2\pi i F t} dt. \quad (1)$$

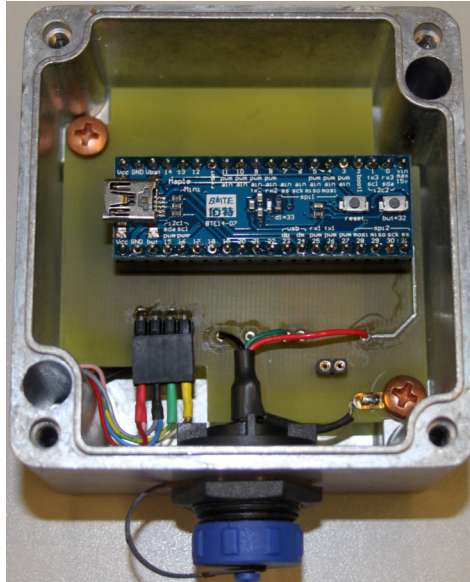


Abbildung 1: Sensorgehäuse mit Mikrocontroller, Anschlüssen und MEMS-Sensor (verdeckt)

Bei zeitdiskreten Signalen muss anstelle des Integrals wieder auf eine Summe übergegangen werden. Bei der Auswertung mit MATLAB R2017a wurde jedoch die in der „Signal Processing Toolbox“ enthaltene *spectrogram*-Funktion benutzt.

Es existieren verschiedene Fensterfunktionen zur Anwendung auf eine Zeitreihe innerhalb eines bestimmten Zeitbereichs. Maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis hat neben $g(t)$ die Breite des Fensters τ . Die STFT unterliegt der Heisenberg'schen Unschärferelation, die besagt, dass zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar sind (MERTINS 2003).

2. Messung mit SMD-Sensoren

Im Rahmen einer Master-Arbeit (KÖSTER 2017) ist der Entwurf, die Umsetzung und der Einsatz eines auf Mikrosystemen (MEMS) basierenden Low-Cost-Sensors realisiert worden (Abb. 1). Um die Einsatzfähigkeit des Sensors zu validieren, mussten dessen erfasste Messdaten mit denen anderer Messsysteme verglichen werden.

Zeitgleich zu den Messungen mit dem neu entwickelten Sensor sind ebenfalls Messungen mit geodätischen Messgeräten durchgeführt worden, darunter GNSS-Receiver, Tachymeter, Neigungssensor und Beschleunigungsmesser (Abb. 2). Mit ihnen sollten zunächst Deformationen am Turm der Marienkirche Neubrandenburg bestimmt werden. Die Auswertung erfolgte anschließend mittels Schwingungsanalyse durch Fourier-Transformation, um eine Frequenzdarstellung zu erhalten. Zwei Mess- oder Rechengrößen sind in diesem Zusammenhang besonders wichtig: Die Frequenzen und Amplituden der Schwingung waren mit allen Sensoren zu erfassen. Größere Beachtung wurde den Amplituden der Schwingungen geschenkt, da die Standsicherheit des Kirchturms in besonderem Maße von der



Abbildung 2: Sensoraufbau innerhalb der Marienkirche Neubrandenburg (v.l.n.r.: SBG IG-500E, Leica Nivel210 und Low-Cost-MEMS)

Größe der Auslenkung abhängt. Es zeigt sich, dass von der Frequenzdarstellung auf die Amplituden geschlossen werden kann.

Die Frequenzen und Amplituden entsprechen den Werten, welche mit Tachymeter, GNSS-Empfänger und Neigungssensor erfasst wurden (Abb. 3). Damit konnte die Einsatzfähigkeit des Low-Cost-Sensors validiert werden.

Neben der Testmessung an der Marienkirche Neubrandenburg zur Validierung der Sensordaten ENGEL ET AL. 2017 sind Daten von drei weiteren Objekten gemessen und ausgewertet worden. An der St.-Peter-Kirche in Altentreptow wurde ähnlich der Messung an der Marienkirche in Neubrandenburg ein historisches Gebäude überwacht. Im Gebäude 2 der Hochschule Neubrandenburg fand ein Monitoring einer freitragenden Treppe statt. In Waren/Müritz wurden Informationen zum Bewegungsverhalten eines Mehrfamilienhauses in direkter Nähe zu einer Eisenbahnstrecke ermittelt (Tab. 1).

3. Anwendung der Kurzzeit-Fourier-Transformation

Mit Datenanalysemethoden aus der Signaltheorie kann der Auswertungsspielraum der Ingenieurgeodäsie erheblich erweitert werden. Bisher wird zur Frequenzanalyse meist nur die konventionelle Fourier-Transformation verwendet. Die Kurzzeit-Fourier-Transformation bietet darüber hinaus Vorteile, da auch die zeitlichen Veränderungen der Schwingungsfrequenzen aufgezeigt werden können. Bei den Messdaten des Kirchturms der Marienkirche in Neubrandenburg sind die zeitlichen Änderungen bekannt, d. h. die Dauer und die Zeitpunkte des Glockenläutens. Deshalb wurde untersucht, ob diese

Tabelle 1: Messobjekte und Auswertemethoden

Messobjekt	Marienkirche, Neubrandenburg	St.-Peter-Kirche, Altentreptow	Treppe, Neubrandenburg	Wohnhaus, Warren/Müritz
Ansicht				
Ursache der Deformation	Glockenspiel	Glockenspiel	Zyklische Belastung	Bahnverkehr
Messdauer	Dauermessung	30 min	eine Woche	vier Wochen
Auswertung	Fourier-Transformation, Kurzzeit-Fourier-Transformation			

zeitlichen Variationen auch nachgewiesen werden können. Die Zeitreihen, die durch den Neigungssensor Leica Nivel210 und den Low-Cost-Beschleunigungssensor erfasst wurden, konnten in vollem Umfang ausgewertet werden. Hierbei bestätigten sich die Zeitpunkte der zeitlichen Änderungen.

Die Glockenfrequenzen sowie der zeitliche Beginn und das Ende der Schwingungen können eindeutig sichtbar gemacht werden. Bei der St.-Peter-Kirche Altentreptow war das Verhalten des Turms und der Läuteplan vorab nicht bekannt. Dort erwies sich der neu entwickelte Sensor in Verbindung mit der Kurzzeit-Fourier-Transformation als besonders effektiv. Nach nur einer Messung mit einer Dauer von ca. 30 min konnte das Schwingverhalten sowohl zeitlich als auch in der Amplitude bestimmt werden (Abb. 5).

Bei der Kurzzeit-Fourier-Transformation ist immer ein Kompromiss zwischen der Zeitauflösung und der Frequenzauflösung zu suchen, da beide Auflösungen nicht beliebig gesteigert werden können. In Abb. 5 sind für die Darstellung der Frequenzauflösung die Zeitabschnitte recht grob gewählt worden. Eine exakte Zuordnung der Zeitpunkte der einzelnen Schwingungsereignisse ist nur bedingt möglich. Die einzelnen Frequenzen können aber gut von einander getrennt werden. In Abb. 6 liegt der Fokus auf der Zeitauflösung. Dabei ist erkennbar, dass die Zeitabschnitte sehr kurz sind, also eine gute zeitliche Zuordnung zu den Ereignissen gegeben ist. Die Frequenzen hingegen werden nur sehr grob abgebildet. Hier ist eine Verschmelzung der drei Frequenzen von 0,37 Hz, 0,40 Hz und 0,47 Hz zu einer Frequenz bei etwa 0,4 Hz zu erkennen.

4. Sensoransteuerung

Der Low-Cost-Sensor ist mit einer seriellen Schnittstelle für die digitale Übertragung der erfassten Messwerte ausgestattet. Von einem Host-Computer aus ist lediglich eine RS-232-Datenverbindung (230.400 Baud) zum Sensor aufzubauen. Es kann ein USB-basierter Adapter verwendet werden, sollte der Computer keine RS-232-Schnittstelle aufweisen. Der Datenaustausch erfolgt dabei ohne ein spezifisches Protokoll. Der Sensor überträgt nach dem Einschalten die Messwerte im ASCII-Format (Zeitstempel, Beschleunigungen in X, Y, Z, sowie Temperatur). Für den Verbindungsaufbau und den Datenabruf ist ein einfacher Terminal-Emulator, wie HyperTerminal, HTerm oder Minicom, ausreichend.

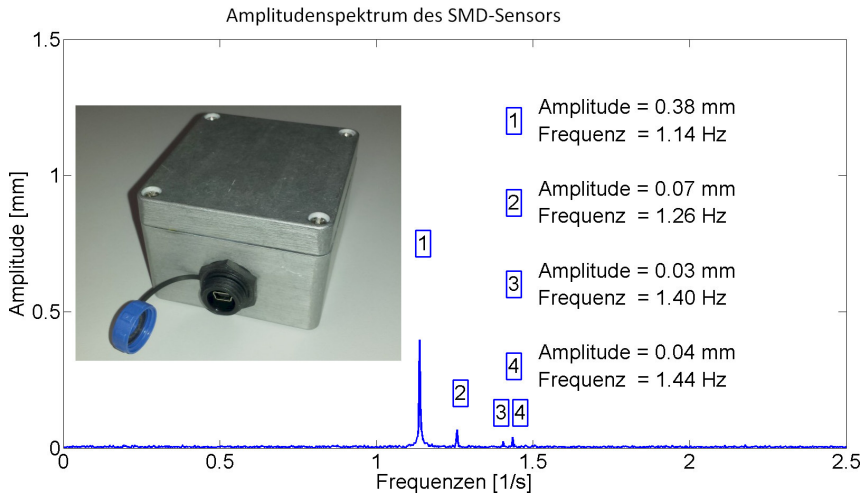


Abbildung 3: Amplitudenspektrum der mittels Low-Cost-MEMS-Sensor an der Marienkirche Neubrandenburg aufgezeichneten Zeitreihe

Darüber hinaus kann der Sensor auch in ein bestehendes Monitoring-System eingebunden werden. Das an der Hochschule Neubrandenburg entwickelte Software-Paket OpenADMS dient der messtechnischen Überwachung beliebiger Objekte mit Hilfe geodätischer und geotechnischer Sensoren. Zusätzliche Sensoren lassen sich ohne Programmieraufwand integrieren. Die Ein- und Ausgabe eines Sensor ist dazu lediglich deskriptiv innerhalb der Konfigurationsdatei festzulegen. Da der Low-Cost-Sensor keine Befehle erwartet und Messdaten sofort nach dem Einschalten über die serielle Schnittstelle ausgibt, muss lediglich das Ausgabeformat durch einen regulären Ausdruck beschrieben werden (Listing .1). Dieser ermöglicht es, die einzelnen Messwerte aus den Rohdaten zu extrahieren (Listing .2).

Das Monitoring-System speichert die gruppierten Werte zusammen mit den Rohdaten und weiteren Meta-Informationen in einem JSON-Objekt. Jeder Datensatz einer Zeitreihe lässt sich anschließend in dokumentenorientierten NoSQL-Datenbanken persistieren, als CSV-Datei exportieren oder an andere Software-Applikationen über das MQTT-Protokoll weiterleiten (LAMPKIN ET AL. 2012).

5. Sensornetzwerk

Das Konzept zur Überwachung der Marienkirche in Neubrandenburg sieht den Einsatz von Multi-Sensorsystemen vor, die innerhalb des Bauwerkes zu einem Sensornetzwerk zusammengeschlossen sind. Die Sensoren sind an verschiedenen Orten im Kirchturm bzw. Kirchenschiff installiert und über eine Ethernet-Verbindung mit einem zentralen Unix-Rechner verbunden. Dieser steuert die Sensoren und speichert die erfassten Zeitreihen lokal ab. Über eine Richtfunkverbindung (5 GHz) zwischen Kirche und Hochschule ist eine Fernwartung des gesamten Systems möglich.

Auf dem Zentralrechner in der Kirche wird das Monitoring-System OpenADMS ausgeführt. Die Ansteuerung der Sensoren erfolgt über die serielle Schnittstelle (RS-232). Das Datensignal von und zu den Sensoren wird durch serielle Geräteserver auf Ethernet umgesetzt, per TCP/IP übertragen und am Rechner auf einen virtuellen COM-Port abgebildet. Dadurch lassen sich beliebig viele Sensoren über ein einzelnes Ethernet-Kabel zu einem Datenbus zusammenfassen. Durch die geringen Kosten

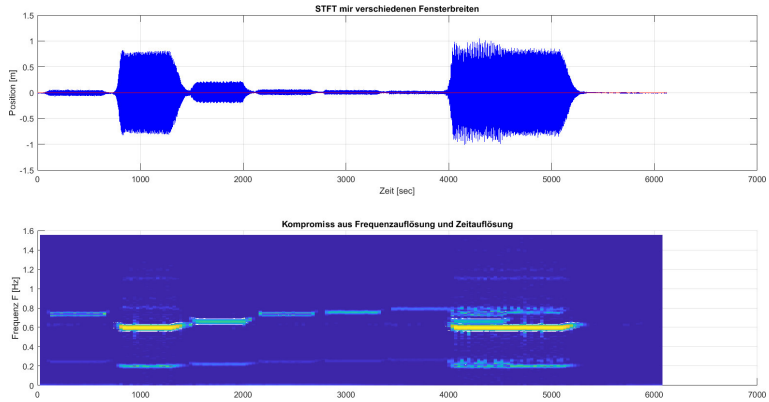


Abbildung 4: Kurzzeit-Fourier-Transformation des Glockenspiels der Marienkirche Neubrandenburg

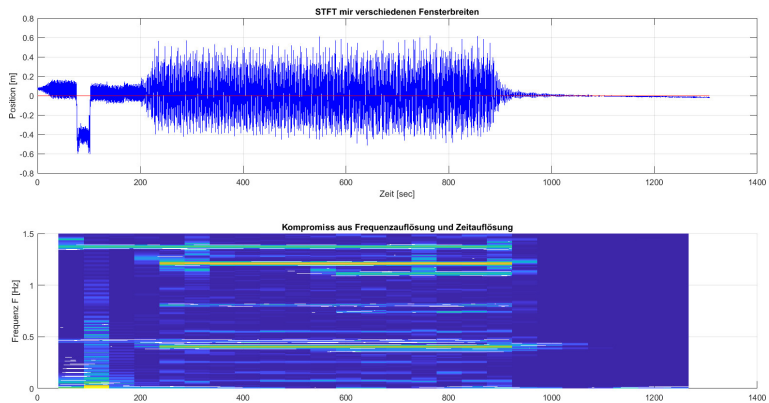


Abbildung 5: Frequenzauflösung der Turmschwingungen der St.-Peter-Kirche

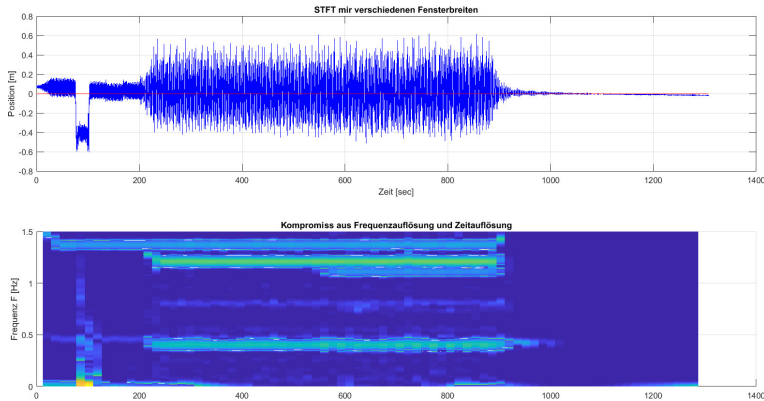


Abbildung 6: Zeitauflösung der Turmschwingungen der St.-Peter-Kirche

und den modularen Aufbau ist eine Erweiterung des Sensornetzwerks zu einem späteren Zeitpunkt möglich.

Listing .1: Regulärer Ausdruck, der die Ausgabe des Low-Cost-Sensors beschreibt

```
(?P<timestamp>\d+)\s(?:P<x>-\d*\.\?\d+)\s(?:P<y>-\d*\.\?\d+)\s(?:P<z>-\d*\.\?\d+)\s(?:P<temperature>-\d*\.\?\d+)
```

Listing .2: Die vom Low-Cost-Sensor ausgegebenen Rohdaten, mit Zeitstempel, Beschleunigungen in X, Y, Z, sowie Temperatur

2954	0.3717	-0.2867	-11.1027	24.9
2995	0.2566	0.0412	-11.0080	24.7
3036	0.1877	-0.0787	-10.0953	24.9
3077	0.1458	0.0289	-9.7126	24.9
3118	0.2037	-0.0517	-9.6473	24.6

6. Fazit

Die Anwendung der Kurzzeit-Fourier-Transformation ermöglicht ein erweitertes Anwendungsspektrum, da beim ingenieurgeodätischen Monitoring üblicherweise nicht klar ist, wann Schwingungseinwirkungen eintreten und wie lange diese anhalten. Somit kann die Ursache der Schwingungen untersucht und diese in einen kausalen Zusammenhang mit den Schwingungen gebracht werden. Die Auswertung trägt in vielfältiger Weise zur Standsicherheit von Gebäuden bei.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der entwickelte Low-Cost-Sensor vergleichbare Genauigkeiten wie kommerzielle Sensoren aufweist und bei den untersuchten Messobjekten hinreichende Ergebnisse liefern konnte. Die Idee, einen sehr kostengünstigen Sensor zu entwickeln, ist umgesetzt worden. Um diesen Sensor im realen Umfeld testen zu können, ist unter anderem die Integration in das Monitoring-System der Marienkirche Neubrandenburg erfolgt. Im Rahmen der Master-Arbeit sind drei verschiedene Objekte überwacht worden. Ein Einsatz des Sensors an Brücken oder anderen Ingenieurbauwerken erscheint daher möglich.

Literatur

- ENGEL, P., FOPPE, K. & KÖSTER U. (2017): Ingenieurgeodätisches Monitoring an der Marienkirche Neubrandenburg. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. 4/2017; p. 239 – 244, doi:10.12902/zfv-0177-2017.
- KÖSTER, U. (2017): Entwicklung eines MEMS-basierten Low-Cost-Sensors für geodätische Überwachungsmessungen. Hochschule Neubrandenburg. Master-Arbeit.
- LAMPKIN, V., LEONG, W. T., OLIVERA, L. ET AL. (2012): Building Smarter Planet Solutions with MQTT and IBM WebSphere MQ Telemetry. o. O. : IBM Redbooks.
- MERTINS, A. (2003): Signaltheorie. Grundlagen der Signalbeschreibung, Filterbänke, Wavelets, Zeit-Frequenz-Analyse, Parameter- und Signalschätzung. Wiesbaden : Springer. Bd. 3.