



*13. Jenaer GeoMessdiskurs –
Sensorsysteme in der Praxis*

Ingenieurgeodätisches Monitoring
mit Multipler Sensorik

Inhalt



1. Motivation
2. Zeitreihenanalyse
3. Verwendete Sensoren
4. Voruntersuchungen
5. Messung vor Ort
6. Auswertung der Messdaten
7. Ergebnisse
8. Ausblick

1. Motivation



- *Warum Bauwerksüberwachung?* -

- Funktions- und Standsicherheit
- Störungsfreier Betrieb
- Schutz von Menschenleben
- Schutz vor wirtschaftlichen Schäden



Bild 1: Einsturzstelle Kölner Stadtarchiv [Morgenthal, et al., 2019]

1. Motivation



Anforderungen an die moderne Bauwerksüberwachung:

- ✓ Dauerhafte Überwachung
- ✓ Kostengünstig
- ✓ Einfach zu Installieren und zu betreuen
- ✓ Echtzeitalarmierung



2. Zeitreihenanalyse

Was ist Zeitreihenanalyse?

- Werkzeug aus der Signaltechnik
- Untersuchung von zeitlich geordneten Folgen von Messwerten

Was ist eine Zeitreihe?

- Zeitlich geordnete Folge von Realisierungen N einer jeden Messgröße

2. Zeitreihenanalyse



Voraussetzungen für korrekte Auswertung einer Zeitreihe:

- Nyqvist-Shannon-Abtasttheorem
- Zeitliche Äquidistanz
- Stationarität
- Zentrierung und Trendercheinungen
- Datenlücken
- Datensprünge

2. Zeitreihenanalyse



Fouriertransformation

- Übergang auf den Frequenzbereich mittels *(FT)* Fouriertransformation

$$\hat{f}(F) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-2\pi i F t} dt$$

- In der Praxis Nutzung der diskreten *(DFT)* Fouriertransformation

$$Y_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-2\pi i n \frac{k}{N}}, \text{ für } k = 0, 1, \dots, N - 1$$

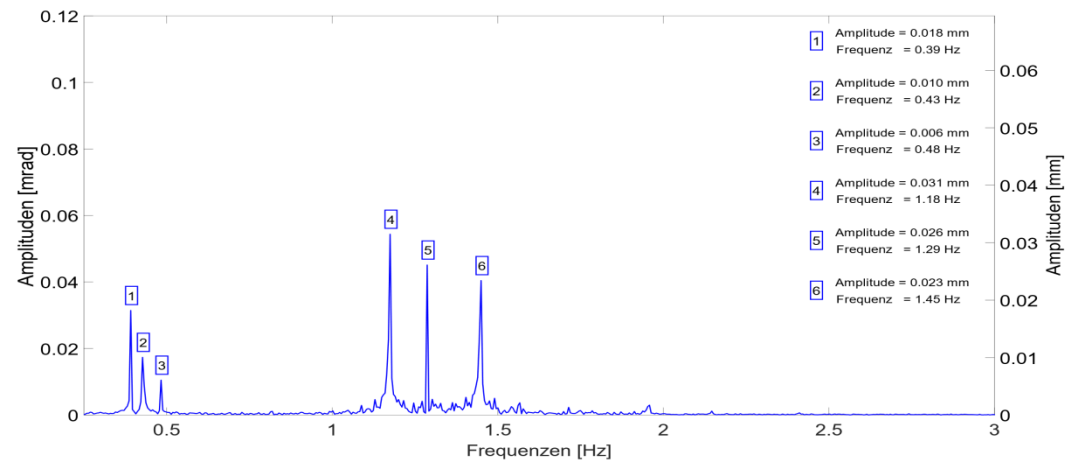
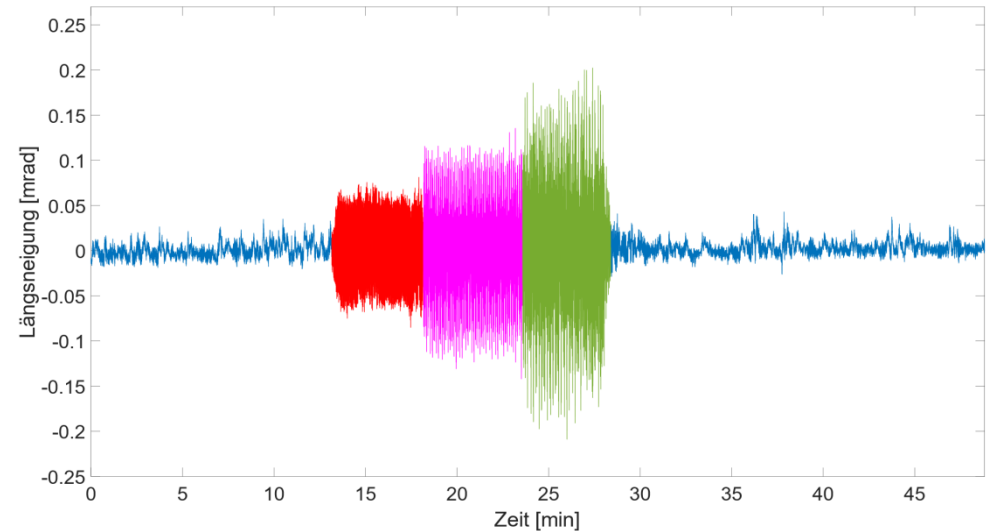


Bild 2: Zeitreihe im Zeitbereich und Fouriertransformation

3. Verwendete Sensoren



1. Nivel210 Präzisionsneigungsmesser
2. Leica Tachymeter
3. Leica GNSS und Low-Cost GNSS
4. Smartphone als Beschleunigungsmesser auf MEMS-Basis

3. Verwendete Sensoren



Leica Nivel210

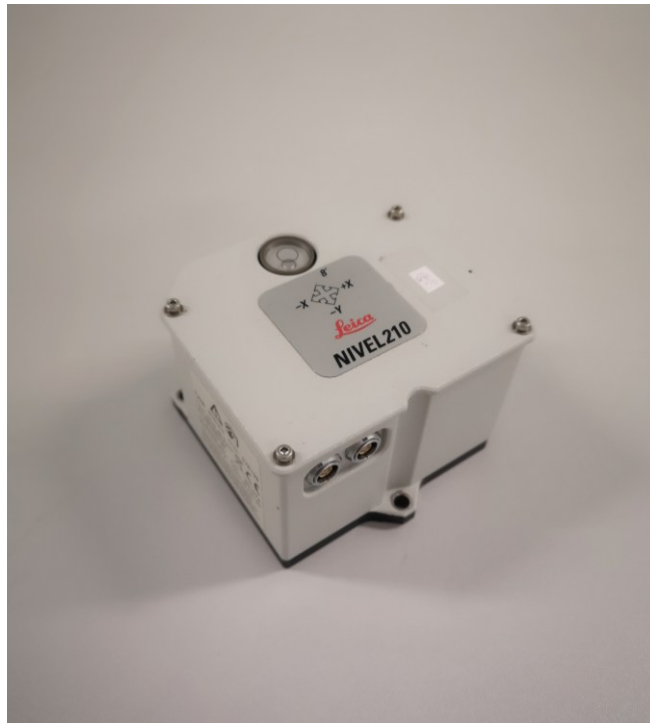


Bild 3: Nivel210

Tabelle 1:
Technische Daten Leica Nivel210 [Leica Geosystems, 2005]

Sensor:	Leica Geosystems Nivel210
Messbereich:	-1,51 mrad bis +1,51 mrad
Auflösung:	0,001 mrad
Nullpunktstabilität:	0,0047 mrad
Genauigkeit:	$\pm 0,0047$ mrad (0,3 mgon)
Spannung:	9 – 15 V
Leistungsaufnahme:	50 mA
Messfrequenz über GeoCOM:	6 Hz

3. Verwendete Sensoren



Leica TM30



Bild 4: Leica TM30

Tabelle 2:
Technische Daten Leica TM30 [Leica Geosystems, 2009]

Sensor:	Leica Geosystems TM30
Genauigkeit Hz, V:	0,5" (0,15 mgon), 1" (0,3 mgon)
ATR-Winkelgenauigkeit:	1" (0,3 mgon)
Kompensator Einspielbereich:	4' (0,07 gon)
Einspielgenauigkeit:	0,5" (0,15 mgon)
Genauigkeit Strecke (Prisma):	Precise-Mode 0,6 mm + 1 ppm
Genauigkeit Strecke (RL):	Standard Modus 2 mm + 2 ppm
Maximale Reichweite EDM:	5400 m (Standard Modus)
	12000 m (Long Range Modus)
Messfrequenz über GeoCOM:	20 Hz

3. Verwendete Sensoren



Leica GMX-902 GG



Bild 5: Leica GMX902 GG

u-blox ZED-F9P-04B

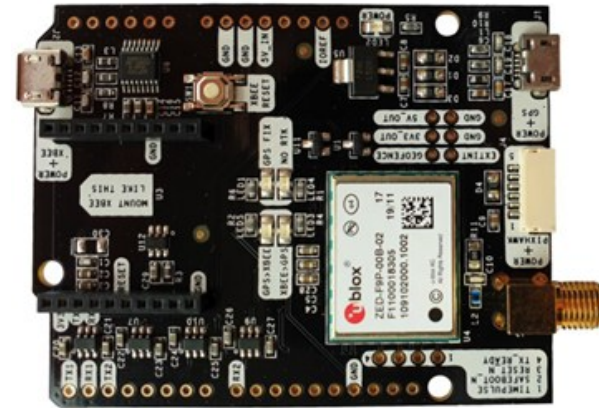


Bild 6: u-blox ZED-F9P-04B

Tabelle 3:

Technische Daten Leica GMX-902 [Leica Geosystems, 2010]; u-blox ZED-F9P-04B, [u-blox AG, 2021]

Sensor	Leica GMX-902 GG	u-blox ZED-F9P-04B
Kanäle	72	184
Satellitensysteme	GPS; GLONASS	GPS; GLONASS, Galileo, Beidou
Abtastrate	20 Hz	20 Hz
Frequenzen	L1, L2	L1, L2, (E1-B/C, E5b), (B1I,B2I)

3. Verwendete Sensoren



Smartphones:

- Samsung Galaxy S9 (SM-G960F)
- Samsung Galaxy S10 (SM-G973F)
- Samsung Galaxy S4
- **Auswertung der Beschleunigungsdaten**

3. Verwendete Sensoren



Grundsatz zur Umwandlung:

- Es wurden Beschleunigungen mit gemessen.
- Diese müssen durch doppelte Integration in metrische Amplituden umgewandelt werden

$$A(t) = A_B \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)$$

Schwingungsgleichung einer Harmonischen Schwingung

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

Amplitude der Geschwindigkeit nach Integration der Beschleunigung nach der Zeit

$$\iint A dt dt = \int \frac{-A_B}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) + C dt = \frac{-A_B}{4\pi^2 f^2} \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) + Ct + \tilde{C}$$

Amplitude des Weges nach Integration der Geschwindigkeit nach der Zeit

4. Voruntersuchungen



Inhalte der Voruntersuchungen:

- Messung und Auswertung von Bewegungen mit festgestellter Frequenz und Amplitude
- Nutzung eines Schwingtisches mit einer festen Amplitude von 0,8 mm und einstellbaren Frequenzen



Bild 7: Schwingtisch mit GNSS-Antenne

4. Voruntersuchungen

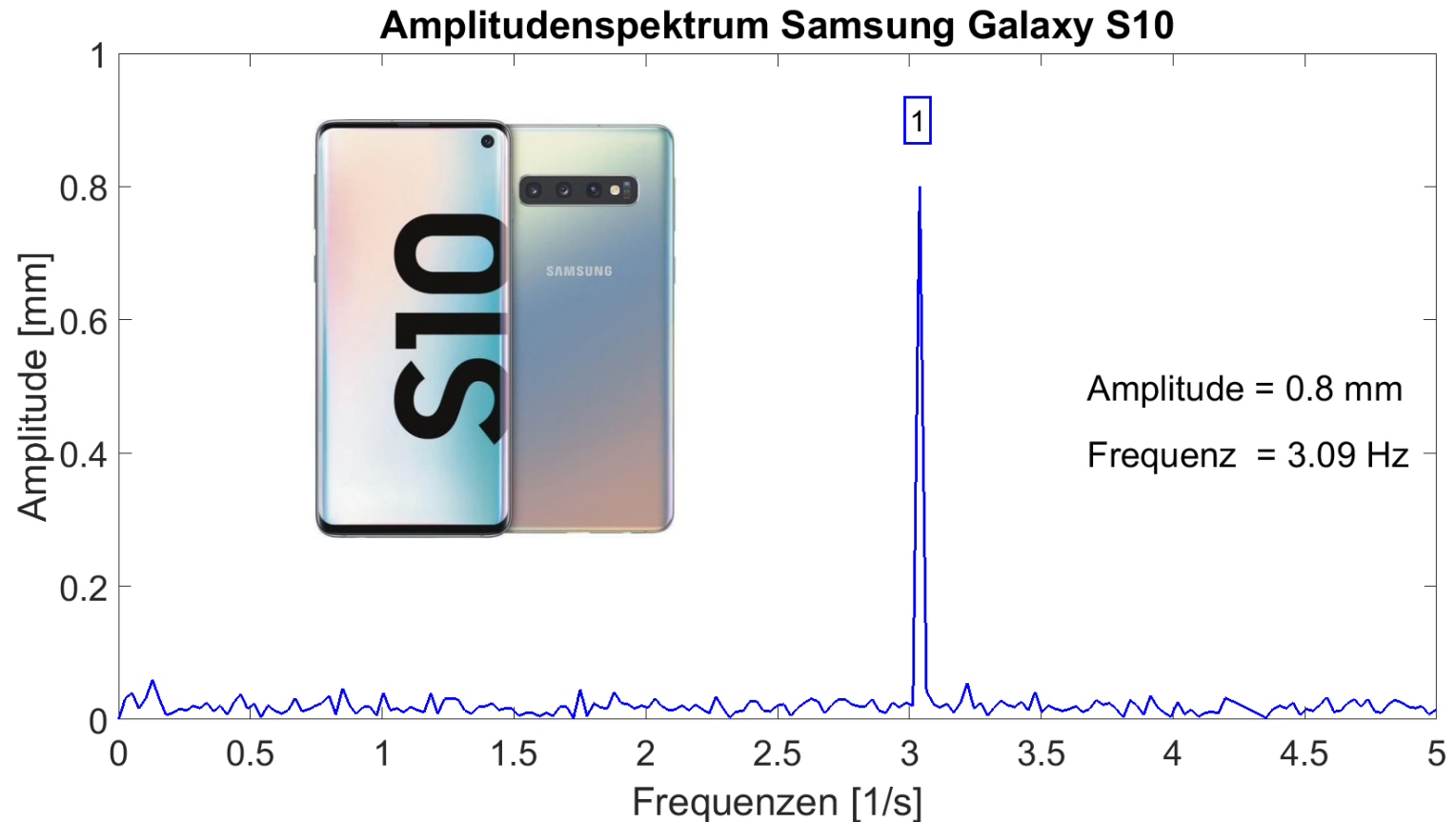


Bild 8: Amplitudenbestimmung des Schwingtisches mittels Smartphone

4. Voruntersuchungen



Amplitudenspektrum u-blox ZED-F9P-04B

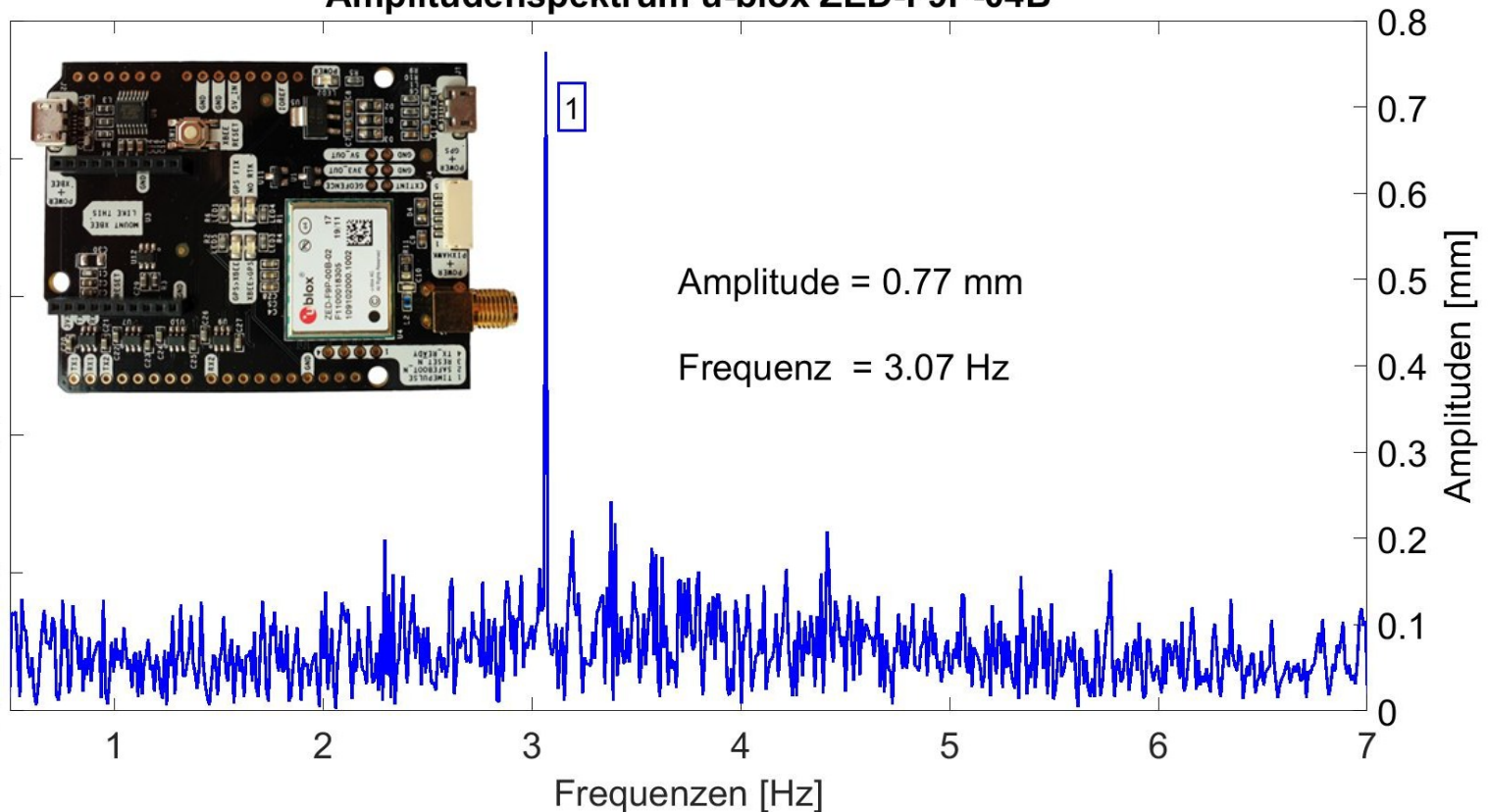


Bild 9: Amplitudenbestimmung des Schwingtisches mittels GNSS

5. Messung vor Ort

- Marienkirche Neubrandenburg
- Schäden aus den letzten Kriegstagen des 2. Weltkrieges
- 2007 Installation des neuen Glockenstuhls und der fünf neuen Glocken
- Berichte von starken Turmschwingungen aufgrund des Glockenläutens



Bild 10: Glockenstuhl



Bild 11: Marienkirche Neubrandenburg

5. Messung vor Ort

Frequenzbestimmung des Bewegungsverhaltens Glocken ist notwendig zur Verifikation der verschiedenen Einwirkfrequenzen auf den Kirchturm.

Fünf verschiedene Glocken ergeben fünf verschiedene Einwirkungen auf die Gebäudestruktur.



Bild 12: Glockenstuhl beim Läuten

Tabelle 4:
technische Daten der Kirchenglocken der Marienkirche

Glocke	Frequenz in Hz	Durchmesser in m	Gewicht in kg	Schlagton
Marienglocke	0,38	1710	3363	h°
Johannesglocke	0,42	1322	1695	e'
Gebetsglocke	0,47	1045	828	gis'
Sakramentsglocke	0,48	984	702	a'
Lob- und Dankglocke	0,50	894	538	h'



5. Messung vor Ort

Prisma

GNSS-Empfänger
Leica GMX902

Beschleunigungssensor
Samsung Galaxy S4
MEMS Sensor LSM330DLC

Neigungssensor
Nivel 210
(Nivel210 Oktogon)

Neigungssensor
Nivel 210 (Nivel210 Server)
+
Beschleunigungssensor
SBG IG 500-E

Bild 13: Verteilung der Multiplen Sensorik an und in der Kirche

6. Auswertung der Daten



- Auswertung in der Software Matlab oder Octave
- Durchführung einer Zeitreihenanalyse mittels Fast-Fourier-Transformation (*FFT*)
- Ergebnis: Amplitudenspektren aller Sensoren mit Amplituden und Frequenzen der Glockenschwingungen und der Mauerschwingungen
- Umwandlung von beschleunigungsbezogenen Amplituden in das metrische System

6. Auswertung der Daten



Amplitudenspektrum Nivel210

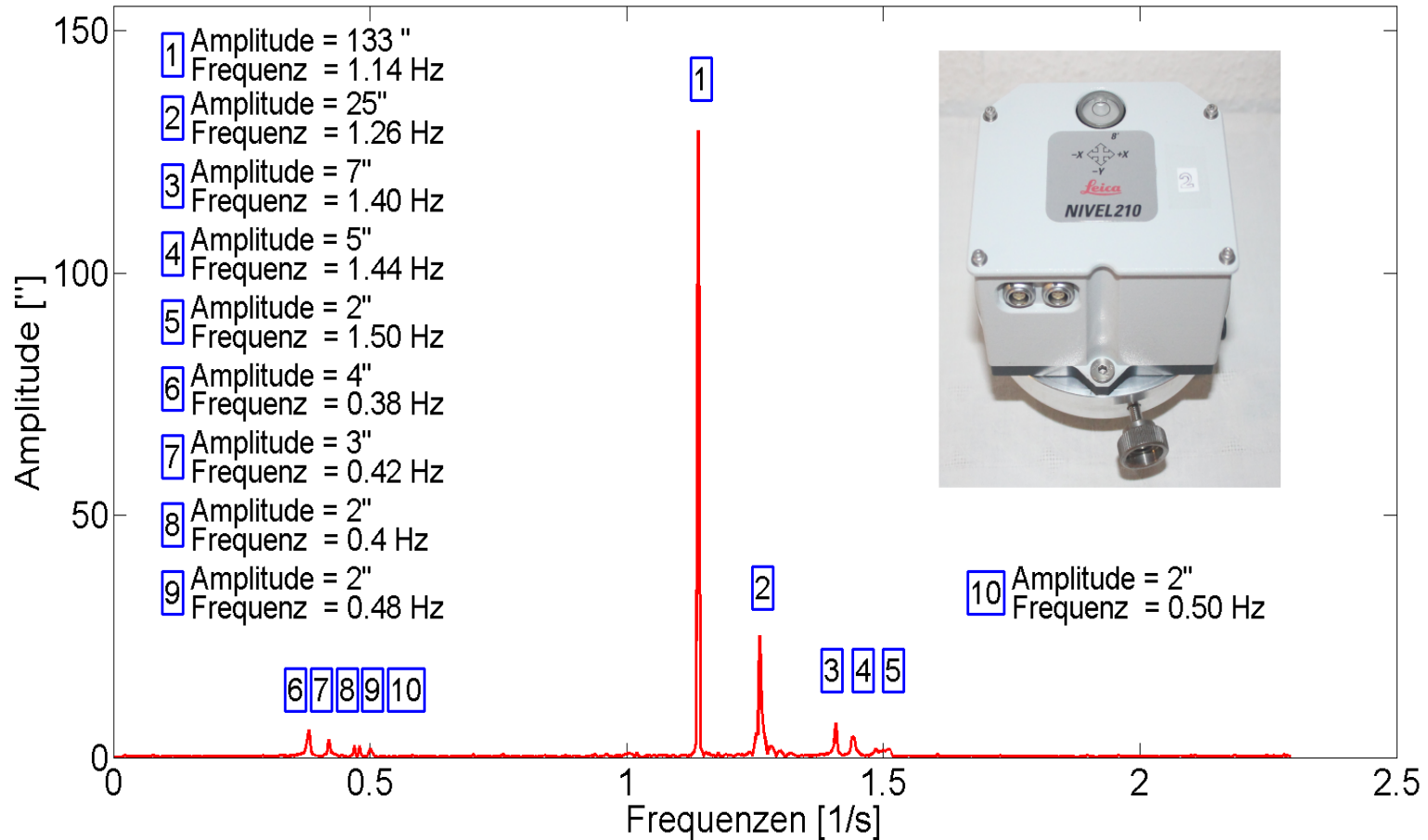


Bild 14: Neigungsmessung des Kirchturmes
alle 5 Glockenbewegungen und 5 Oberschwingungen sind sichtbar.

6. Auswertung der Daten

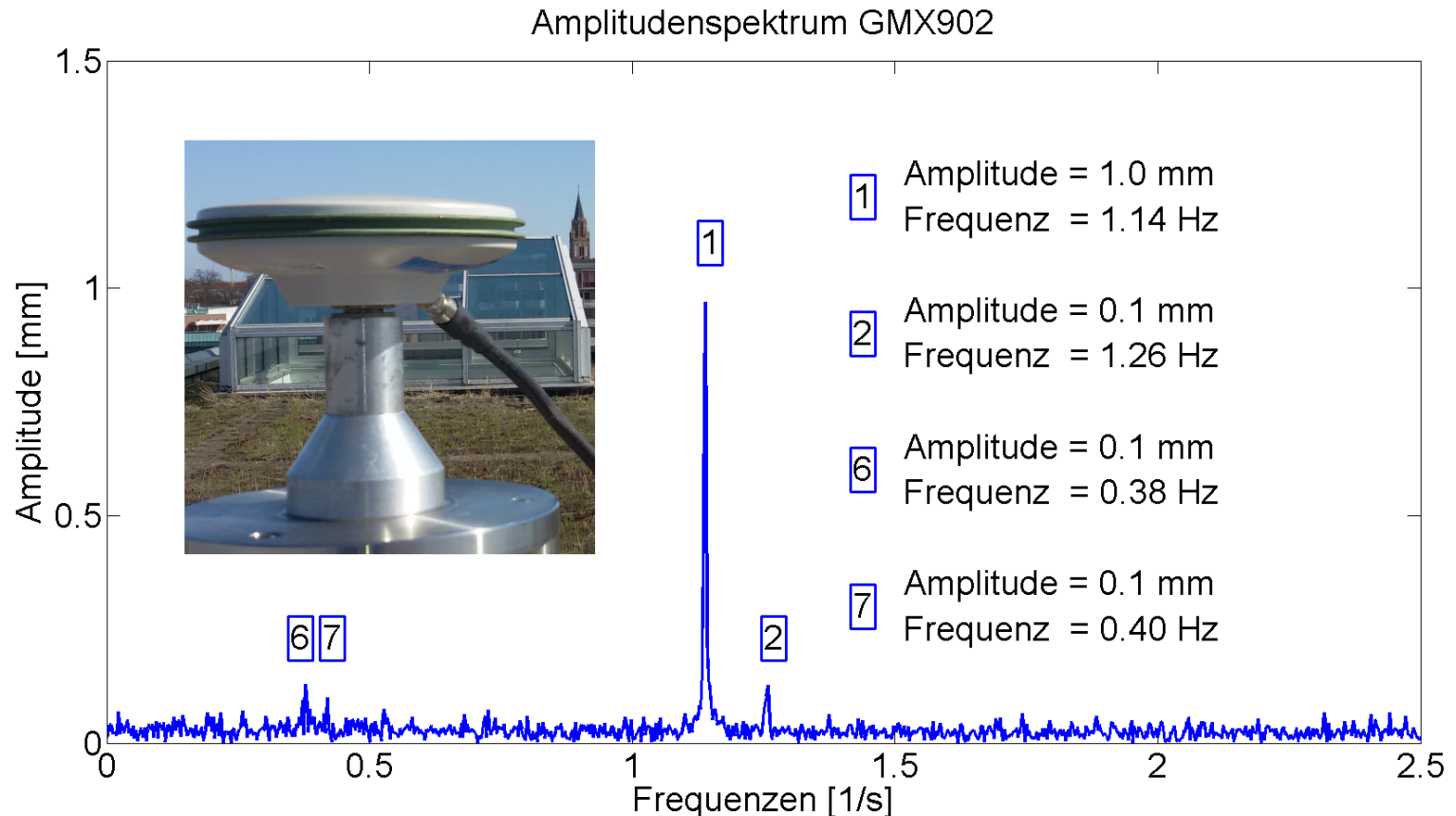


Bild 15: GNSS-Messung des Kirchturmes
2 Glockenbewegungen und 2 Oberschwingungen sind sichtbar.

6. Auswertung der Daten

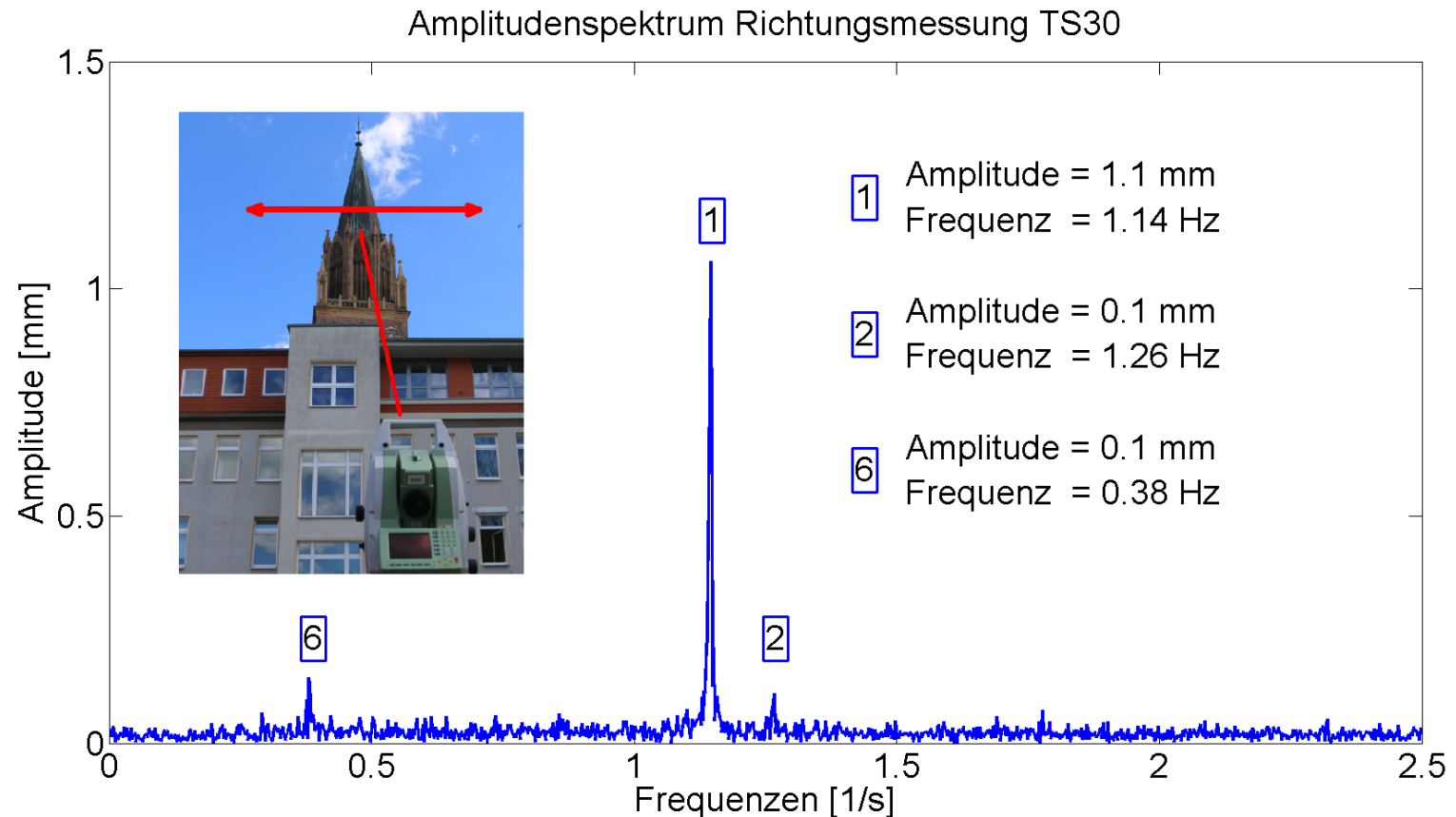


Bild 16: Richtungsmessung mit Tachymeter des Kirchturmes
1 Glockenbewegung und 2 Oberschwingungen sind sichtbar.

6. Auswertung der Daten

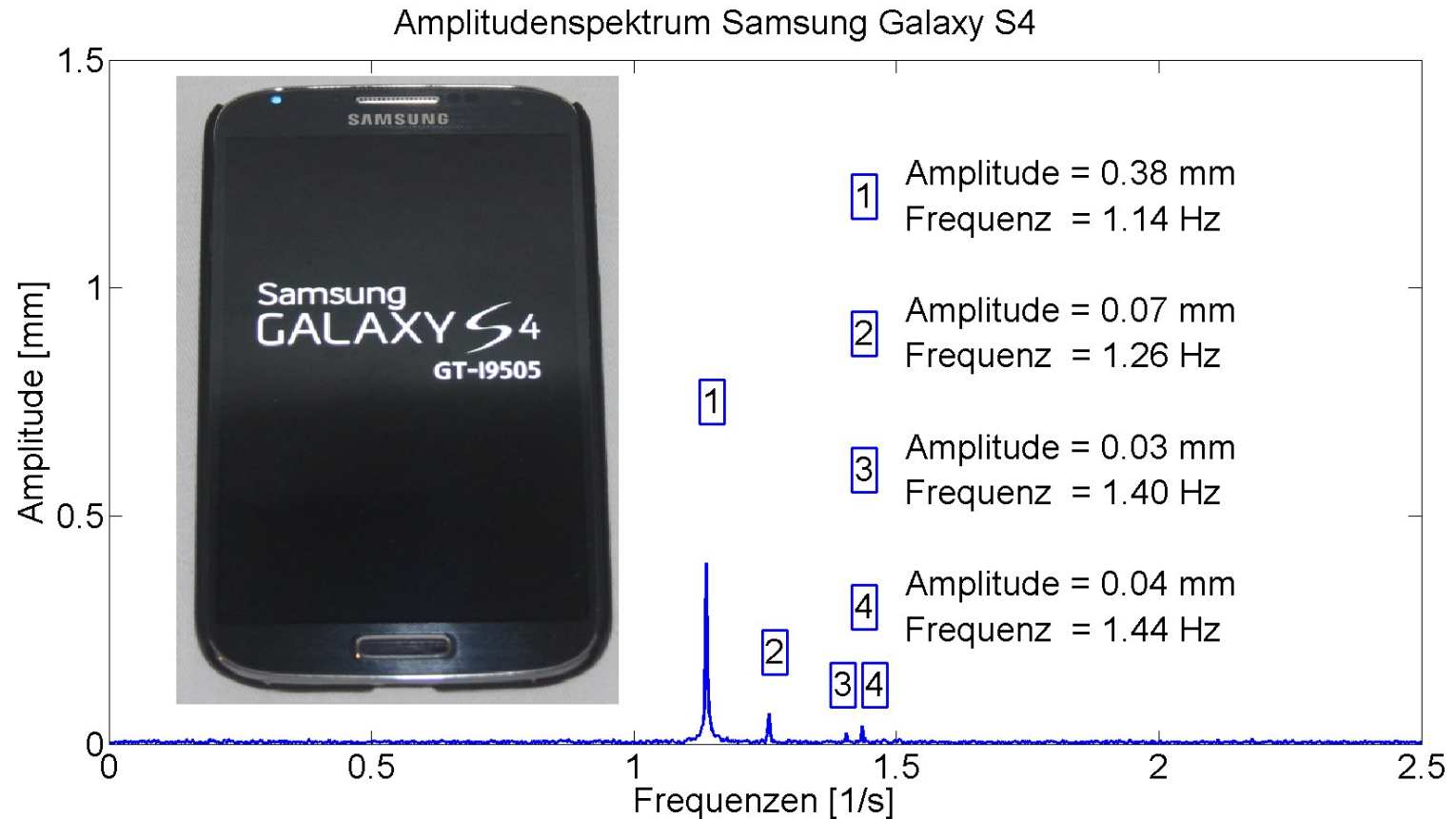


Bild 17: Beschleunigungsmessung des Kirchturmes
4 Oberschwingungen sind sichtbar.

7. Ergebnisse



Tabelle 5:

Frequenzen der Grundschwingungen und Oberschwingungen als Ergebnisse der Schwingungsanalyse

Glocke	Frequenz in Hz	Gebäude-schwingung in Hz	Multiplikator
Marienglocke	0,39	1,14	3
Johannesglocke	0,42	1,26	3
Gebetsglocke	0,47	1,41	3
Sakramentsglocke	0,48	1,44	3
Lob- und Dankglocke	0,50	1,50	3

- Nachweis der Turmschwingung konnte erbracht werden
- Amplitude der Schwingung geringer als erwartet, nur ca. 1 mm
- Frequenz der Gebäudeschwingungen 3 mal so hoch wie die Glockenfrequenzen - Resonanz



Bild 18: eingesetzte Sensorik bei der Messung



8. Ausblick

Ausblick und weiterführende Arbeiten:

- Auswertung mit weiteren Verfahren wie Short-Time-Fourier-Transformation (*STFT*) und Wavelet-Transformation (*WT*)
- Messung der Turmschwingungen mittels Low-Cost-GNSS
- Einbindung der RTKLIB Echtzeitdaten in Monitoringsysteme

Morgenthal, Guido, Rau, Sebastian und Nowack, Markus. 2019. [Hrsg.] Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau. *Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern*. [Abschlussbericht Forschungsprojekt]. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2019

Leica Geosystems. 2005. Leica Nivel210/Nivel220 - Precision inclination sensor for structural monitoring. [Datenblatt]. Heerbrugg, Schweiz : s.n., 2005

Leica Geosystems. 2009. Leica TM30 - Technische Daten. [Datenblatt]. Heerbrugg, Schweiz : s.n., 2009

Leica Geosystems. 2010. Leica GMX902 GG - Leica GMX902 Empfänger Hochfrequenz GNSS Monitoring von bewegten Bauwerken. [Online] 15. Dezember 2022. [Datenblatt] . [Zitat vom: 01. April 2023.] https://leica-geosystems.com/-media/files/leicageosystems/products/flyer/leica_gmx902_series_monitoring_fly.ashx?la=de-at&hash=57EE7562576CF8916E3D1619049A5CC3

U-blox. 2021. ZED-F9P - u-blox F9 high precision DDSS module. ZED-F9P Data sheet [Online] 21. Dezember 2021. [Zitat vom: 01. April 2022.] https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P-041ELDataSheet_UBX-21044850.pdf. UBX-21044850 -1101.