



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

**Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik
Master-Studiengang Geodäsie und Geoinformatik**

Masterarbeit

Evaluierung von low-cost GNSS und IMU für ingenieurgeodätisches Monitoring

Zum Erlangen des akademischen Grades

Master of Engineering

vorgelegt von: *Albert Schnak (B.Eng.)*

Erstprüfer: Prof. Dr. -Ing. Karl Foppe

Zweitprüfer: Prof. Dr. -Ing. Thomas Willemsen

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2022-0251-9

Neubrandenburg, am 02. Juni 2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die hier vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und sowohl wörtliche, als auch sinngemäß entlehnte Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Prüfern Prof. Dr. -Ing. Karl Foppe und Prof. Dr. -Ing. Thomas Willemsen für die fachliche Unterstützung und nützlichen Hinweise nicht nur im Rahmen dieser Masterarbeit, sondern über den gesamten Studienverlauf bedanken. Anhand zahlreicher Projekte und Messübungen haben sie die Grundlagen kostengünstiger GNSS- und Inertialsensorik für geodätische Anwendungen nahegebracht und somit mein Interesse für diese Themengebiete geweckt.

Mein weiterer Dank gilt der Kirchengemeinde Altentreptow für den unkomplizierten Zugang zum Messobjekt sowie den Mitarbeitern im LAiV M-V und dem LGB für die schnelle Bereitstellung von SAPOS®-Korrekturdaten. An dieser Stelle sind auch die Werkstattmitarbeiter im Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik zu nennen, welche maßgeblich beim Entwurf und der Herstellung von Montage- und Verbrauchsmaterial beteiligt waren.

Ebenfalls bedanke ich mich bei M.Eng. Uwe Köster für dessen technische und organisatorische Unterstützung sowie den zahlreichen Ideen und Anmerkungen, denen im Zuge dieser Arbeit nachgegangen wurde.

Weiterhin sind auch meine Kommilitonen Dennis Vollert und Felix Weidemann zu nennen, die bei den Messungen tatkräftig mitwirkten. Mein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, welche mich während des Studiums und in allen Lebenslagen tatkräftig unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Grundlagen.....	3
2.1	Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen.....	3
2.2	Werkzeuge der Zeitreihenanalyse.....	7
2.3	Schwingungsmessungen.....	12
3	Aufbau der Messverfahren.....	15
3.1	Inertialsensoren in MEMS-Bauweise.....	15
3.1.1	Grundlagen.....	15
3.1.2	Kostengünstige Sensorik in consumer-Endgeräten.....	19
3.2	Globale Satellitennavigationssysteme.....	27
3.2.1	Grundlagen.....	27
3.2.2	Messsystem.....	31
3.2.3	Prüfverfahren.....	35
3.3	Totalstation.....	39
3.3.1	Tachymeter als Multisensorsystem.....	39
3.3.2	Instrumentenauswahl und Messdatenerfassung.....	40
3.3.3	Untersuchung der Abtastrate und Äquidistanz.....	43
4	Anwendung: Glockengeläut der St. Petri-Kirche Altentreptow.....	47
4.1	Übersicht zum Messobjekt.....	47
4.1.1	Geschichte.....	47
4.1.2	Deformationen während des Glockenläutens.....	48
4.2	Aufbau des Messsystems.....	51
4.2.1	Messaufbau.....	51
4.2.2	Konfiguration.....	54

4.3	Auswertungen und Ergebnisse.....	56
4.3.1	Vorbereitung der Daten	56
4.3.2	Auswertungen der Messverfahren.....	57
4.3.2.1	IMU	57
4.3.2.2	GNSS	63
4.3.2.3	Totalstationen	70
4.3.3	Vergleich der Ergebnisse	75
5	Anwendung: Deformationen an Fußgängerbrücke.....	78
5.1	Übersicht	78
5.2	Aufbau und Konfiguration des Messsystems	79
5.3	Auswertung und Vergleich der Ergebnisse	80
6	Fazit und Ausblick.....	90
7	Literaturverzeichnis.....	93
8	Abbildungsverzeichnis.....	97
9	Tabellenverzeichnis	99
10	Formelverzeichnis.....	100

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Evaluierung eines kostengünstigen GNSS-Zweifrequenz-Messsystems sowie Inertialsensoren auf Basis der mobilen Konsumelektronik für den Einsatz im ingenieurgeodätischen Monitoring. Anhand praktischer Überwachungsobjekte soll besonders die Anwendung dieser Verfahren im Hinblick auf die Erfassung hochfrequenter Schwingungsvorgänge untersucht werden. Die nachstehende Motivation dient zunächst als Einführung in das Thema, anschließend erfolgt ein kurzer Überblick zum Aufbau und Inhalt dieser Arbeit.

1.1 Motivation

Einen Teilbereich der Ingenieurgeodäsie stellt die Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten dar, um negative geometrische Bewegungen oder Verformungen möglichst noch vor Schadenseintritt aufdecken zu können. Die klassischen Fragestellungen beziehen sich hierbei in der Praxis zumeist auf eine epochenweise Erfassung statischer Bewegungen; für kinematische Veränderungen stehen hingegen oftmals keine geeigneten Methoden oder Messmittel zur direkt zur Verfügung. So lassen sich besonders hochfrequente Deformationen mithilfe moderner Technologien zwar grundsätzlich erfassen; diese Spezialanwendungen sind jedoch aufgrund besonderer Mess- und Auswerteverfahren oftmals sehr kostenintensiv.

Mit den aktuellen Fortschritten in der Entwicklung elektronischer Bauelementen sowie der kostengünstigen Massenproduktion stellen neue Hardwarekomponenten den Schlüssel für ein zunehmend breites Anwendungsspektrum dar. So ist ehemalige „Spezialsensorik“ wie z.B. GNSS-Empfänger mit Rohdatenausgabe inklusive Zubehör schon für wenige hundert Euro erhältlich und kann in seinen Ergebnissen durchaus mit denen professioneller Messsystemen mithalten. Auch in Geräten der mobilen Konsumelektronik wie Smartphones oder Tablet-Computern ist häufig eine Vielzahl von Inertialsensoren integriert, welche vorwiegend zur Anwendungssteuerung dienen; mit der Exportmöglichkeit von „Rohdaten“ stehen diese Geräte jedoch prinzipiell auch für Messaufgaben zur Verfügung. Weiterhin ist die zur Auswertung erforderliche Software oftmals kostenfrei und quelltextoffen im Internet verfügbar, sodass diese gemeinsam mit der low-cost Hardware auch zum Aufbau wirtschaftlicher Messsysteme eingesetzt werden kann.

In der Praxis haben solche kostengünstigen GNSS-Systeme schon Einzug in viele Bereiche der Ortung und Navigation gehalten; ebenso werden bei den Smartphones durch den sehr großen Anwenderkreis immer wieder neue Nutzungsmöglichkeiten auch in Richtung der Geodäsie

erschlossen. Für den Bereich des ingenieurgeodätischen Monitorings kommt es jedoch auf ein hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der erfassten Daten an, da auf Grundlage der Messergebnisse möglicherweise Entscheidungen über weitere Vorgehensweisen z.B. bei Gefahrenlagen abgeleitet werden müssen. Genauso wie vor jedem Einsatz herkömmlicher geodätischer Instrumente eine Überprüfung gefordert ist, gilt dies für selbstentwickelte Sensorik oder Messverfahren in besonderem Maße. Daher soll Rahmen dieser Arbeit das Potential kostengünstiger GNSS-Messsysteme und inertialer Sensorik aus Smartphones im Sinne des geodätischen Monitorings für die Erfassung von hochfrequenten Schwingungsvorgängen ermittelt und im Rahmen praktischer Messungen mögliche Anwendungsbeispiele aufgezeigt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung werden im Abschnitt 2 allgemeine Grundlagen zu ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen, den Auswertemethoden der Zeitreihenanalyse und zur Messung mechanischer Schwingungen vorgestellt. Die in dieser Arbeit verwendeten Messsysteme sind in Abschnitt 3 näher beschrieben. Hier werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Messverfahren zusammengefasst und anschließend Aufbau und Konfiguration der verwendeten Systeme behandelt. Weiterhin sollen Möglichkeiten der Kalibrierung und einfache Prüfverfahren vorgestellt und die erfassten Messdaten im Hinblick auf genauigkeitsrelevante Parameter untersucht werden. In den darauf nachfolgenden Abschnitten werden die Messsysteme anhand praktischer Überwachungsmessungen vergleichend eingesetzt und auf ihre Verwendbarkeit hin überprüft. Das Überwachungsobjekt in Abschnitt 4 ist die St. Petri-Kirche in Altentreptow, an welcher die während des Glockenläutens am Turm auftretenden hochfrequenten Bewegungen erfasst werden sollen. Neben einer Einführung in die spezielle Deformationscharakteristik werden die verwendeten Messsysteme zunächst einzeln ausgewertet; im Anschluss erfolgt die qualitative und quantitative Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf normative Vorgaben für Glockentürme. Die Messung an einer Fußgängerbrücke wird als weiterer Anwendungsfall in Abschnitt 5 behandelt. Hierbei treten unter gegebenen Lastbedingungen ebenfalls Schwingungen mit hoher Periodizität auf, wobei anders als an der Kirche diese Deformationen in kürzeren Zeitfenstern stattfinden. Daher wurde die übliche Auswertung mithilfe der Zeitreihenanalyse um die Betrachtung der integrierten Schwingwege aus Beschleunigungsmessungen erweitert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Abschnitt 6 zusammengefasst und ein Ausblick zur möglichen Weiterführung gegeben. Abschließend ist die verwendete Literatur sowie Verzeichnisse der Abbildungen, Tabellen, und Formel aufgeführt.

2 Grundlagen

Für die sachgerechte Auswertung der erhobenen Messdaten im Rahmen dieser Arbeit sollen im vorliegenden Abschnitt zunächst die Grundlagen ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen, die Auswertung mit den Werkzeugen der Zeitreihenanalyse sowie die Besonderheiten von Schwingungsmessungen näher betrachtet werden.

2.1 Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen

Den Aufgabenbereich der Ingenieurgeodäsie umfasst die „Vermessung im Zusammenhang mit der Aufnahme, Projektierung, Absteckung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten“. Die Messobjekte sind dabei „z.B. Planungsareale für Baumaßnahmen, bauliche Anlagen, Verkehrsanlagen, Maschinen- und Industrieanlagen sowie die damit in Verbindung stehenden natürlichen Objekte“ (Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, 2010). Aus diesem umfangreichen Aufgabenspektrum soll der Bereich der Überwachung im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet werden. Laut der DIN-Norm 18710-4 wird eine Überwachungsmessung „zur Feststellung von Bewegungen und Verformungen von technischen und natürlichen Objekten“ angewendet. Die Grundlagen sowie Mess- und Auswertetechnische Besonderheiten ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen werden im Folgenden zusammenfassend wiedergegeben.

Mithilfe geodätischer Überwachungsmessungen können geometrische Bewegungen und Verformungen sowie Angaben zur Größenordnung der Veränderungen bzw. deren Ausdehnungsbereich bestimmt werden. Zunächst ist anhand einer Aufgabenbeschreibung des Auftraggebers ist dazu ein geeignetes Messkonzept zu entwickeln, wobei insbesondere für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse die Zusammenarbeit mit anderen Fachdisziplinen notwendig ist. Nach (Heunecke, et al., 2013) lassen sich dabei die möglichen Zielsetzungen für Überwachungsmessungen wie folgt wiedergeben:

- Liefern von Beiträgen zum Nachweis der Stand- und Funktionssicherheit des zu überwachenden Bauwerkes oder zur Gewährleistung des störungsfreien Betriebs einer technischen Anlage;
- Eine mögliche „Frühwarnung“ durch rechtzeitiges Erfassen von kritischen Veränderungen;
- Beweissicherung zur Dokumentation und Ursachenermittlung nach Schadensereignissen;
- Möglichkeit zur Prognose des mutmaßlichen Verhaltens in der näheren Zukunft, dadurch auch Erkenntnisgewinn für vergleichbare Objekte im Hinblick auf Planung und Sanierung;

- Die Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften mit dem Ziel, die mechanischen Modellvorstellungen des Objekts zu verbessern und Kenntnisse seines Verhaltens zu erlangen.

Die Gesamtheit der Messaufgabe besteht aus den Teilbereichen der Diskretisierung, der Messung und der Auswertung mit anschließender Interpretation der Ergebnisse. Aufgrund der Individualität eines jeden Objektes lassen sich die Abläufe für eine optimale Überwachungsmessung anfangs nur näherungsweise festlegen, sodass das Messprogramm im Bedarfsfall den praktischen Anforderungen angepasst werden muss.

Die Diskretisierung umfasst die geometrische und zeitliche Modellbildung für die Durchführung einer Überwachungsmessung. So ist die Vereinfachung des Messobjekts durch ausgewählte Objektpunkte, welche gleichzeitig das (erwartete) charakteristische Deformationsverhalten beschreiben, Bestandteil der geometrischen Diskretisierung. Die generalisierende Auswahl erfolgt zumeist auf Grundlage von Erfahrungswerten, zudem sind im praktischen Einsatz zwischen Aufwand, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit abzuwägen.

Im Rahmen der zeitlichen Modellbildung müssen unter Berücksichtigung der Aufgabenbeschreibung der Beginn, die Zeitabstände und die Dauer einer Einzelmessung der Überwachungsmessung festgelegt werden. Bei einer langsamen Änderung der Einfluss- und Zielgrößen ist eine lückenlose Erfassung von Veränderungen dabei oftmals nicht notwendig, es werden dann epochale (diskontinuierliche) Überwachungsmessungen durchgeführt. Zumeist finden diese in gleichen Zeitabständen statt, sodass sie zusätzlich als periodische Überwachungsmessungen klassifiziert werden können. Wenn jedoch schwer erfassbare Änderungen der Einflussgrößen die Prognose des Deformationsverhaltens erschweren oder eine lückenlose Aussage über das Objektverhalten benötigt wird, ist hingegen eine permanente (kontinuierliche) Überwachungsmessung anzuwenden. Mithilfe der Automatisierung und Datenverarbeitung schaffen moderne Instrumente die Grundlage für diese kontinuierliche Erfassung von Deformationsvorgängen, wobei in der Auswertung z.B. die Werkzeuge der Zeitreihenanalyse einen zusätzlichen Informationsmehrwert bieten können.

Die Messverfahren bei Überwachungsmessungen müssen entsprechend der Aufgabenbeschreibung die erforderlichen Genauigkeiten gewährleisten und in der Praxis den ökonomischen Gesichtspunkten standhalten. So lassen sich aus den Standardmessgrößen wie z.B. Richtungen, Distanzen (Wegänderungen), Höhen, Koordinaten, Neigungen und Dehnungen nach erfolgter Diskretisierung die gesuchten geometrischen Veränderungen ableiten. Eine Übersicht zur Genauigkeit ausgewählter Standardmessverfahren in Abhängigkeit von der Objektgröße ist in Abbildung 2-1 wiedergegeben:

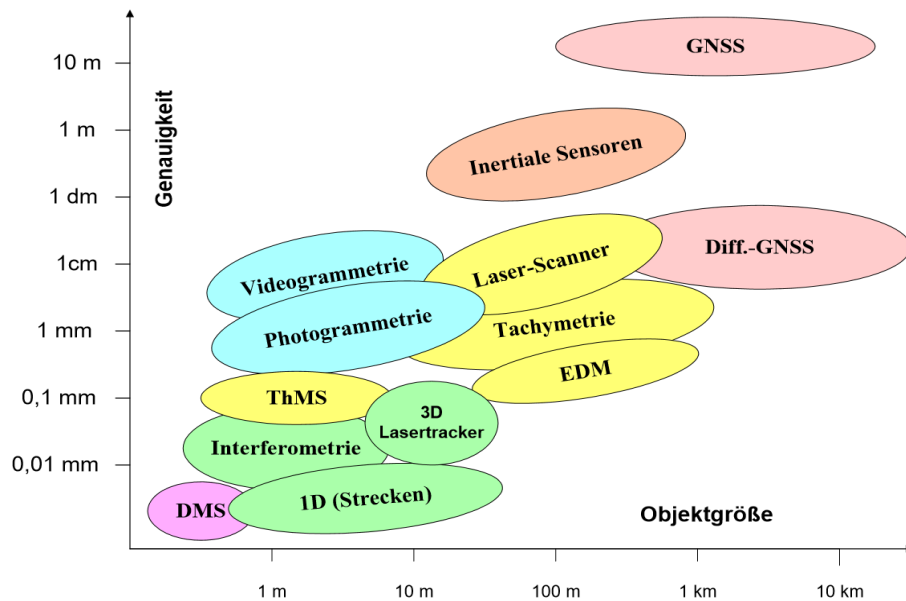


Abbildung 2-1: Genauigkeiten ausgewählter Messverfahren in Abhängigkeit von der Objektgröße (Foppe, et al., 2004)

Die geometrischen Veränderungen lassen sich entweder absolut aus (geo)-referenzierten Messergebnissen im übergeordneten Koordinatensystem (z.B. GNSS, terrestrische Verfahren, ...) oder relativ in Bezug zu einer Ausgangslage (z.B. Dehnungsmessung) ableiten. Weiterhin kann im Hinblick auf die Auswertung je nach Anwendungsfall die zusätzliche Erfassung von Umgebungsparametern mithilfe Umwelt- und Geotechnischer Sensoren notwendig werden.

Nach der Diskretisierung und Messung erfolgt die Auswertung einer Überwachungsmessung. Die DIN 18710-4 nennt dabei Ausgleichungsverfahren, Koordinatenvergleiche, Transformationen, Filtertechniken und die Anwendungen aus der Zeitreihentheorie als mögliche Auswertemodelle. Insbesondere für die Interpretation der Ergebnisse sind darüber hinaus statistische Tests geeignet. Im Rahmen der Auswertung wird dabei zwischen (kausalen) Ursache-Wirkungs-Modellen und beschreibenden (deskriptiven) Modellen unterschieden.

Die Ursache-Wirkungs-Modelle beschreiben Bewegungen und Verformungen eines Objektes infolge wirkender Kräfte und deren Übertragungsverhaltens. Die gemeinsame Modellierung der Bewegungen und Belastungen als Funktion der Zeit wird als dynamisches Modell bezeichnet. Sofern das Objekt während der Messung sich im Gleichgewichtszustand befindet und keine Bewegungen stattfinden ist darüber hinaus die Vereinfachung mittels einer statischen Modellbildung zulässig. Diese kausalen Modelle repräsentieren das reale Objektverhalten am besten, durch die Erfassung der Einflussgrößen ist die Modellierung oftmals jedoch sehr komplex (Heunecke, et al., 2013).

Die Beschreibung der Deformationen ohne Bezug zu den einwirkenden Belastungen erfolgt in deskriptiven Modellen. Diese werden angewendet, wenn die verursachenden Kräfte zwar qualitativ bekannt, jedoch nicht quantitativ messbar sind bzw. diese Informationen in der Auswertung nicht benötigt werden. Für bewegte Messobjekte lassen sich mit Kenntnis der typischen Bewegungs- und

Verformungsabläufe die Deformationen in Abhängigkeit von der Zeit im kinematischen Modell analysieren. Bei unbewegten Objekten werden im beschreibenden Modell hingegen nur die geometrischen Zustandsänderungen zwischen den Epochen betrachtet. Dieser Fall wird als Kongruenzmodell bezeichnet und stellt aufgrund der relativ einfachen Auswertung das am häufigsten verwendete Verfahren der Deformationsanalyse dar (Heunecke, et al., 2013).

Aufgrund der spezifischen Eigenheiten eines jeden Überwachungsobjektes ist in der Praxis das Messprogramm flexibel den jeweiligen Anforderungen anzupassen. Die grundsätzlichen Messaufgaben lassen sich dazu anhand ihres Zwecks in die Beschreibung von Zustandsänderungen, der Überwachung und Prozesssteuerung kategorisieren:

Tabelle 2-1: Typische Messaufgaben der Überwachungsmessung und deren Anforderungen (Staiger, 2009)

Zweck der Messung	Beispiele	Art der Bewegung	Größenordnung der Bewegung	Grad der Anforderung an ...				
				Latenzzeit	Messzeit pro Epoche	Synchronisation	Wiederholungsrate	Genauigkeit
Beschreiben von Zustandsveränderungen	Geotektonik	kriechend, abrupt	0 – 20 mm / a	0	1	1	1	5
	Gletscher	gleichförmig	0-10 m /a	0	1	1	1	2 - 4
	Gezeiten	kontinuierlich	bekannt	0	3	2	1	1 - 5
	Materialtests, Instrumentenuntersuchungen	kriechend-abrupt, plastische Verformung	< 100 mm/s	0	3 - 5	3 - 5	3 - 5	4 - 5
Überwachung der Stand- und Funktions-sicherheit von Bauwerken/ Geländeabschnitten	Talsperren, Brücken, Hochhäuser usw.	elastisch, abhängig von Tages- und Jahreszeit, Füllstand, ...	0 – 20 mm / a	3	2	2	2	2 - 5
	Hangrutschungen	kriechende Rutschung, Felsabbruch	0 – 50 mm / a	4	3	3	3	2 - 5
Prozesssteuerung	Steuerung von Baumaschinen	gleichförmig	0 – 10 m/s	5	5	4	5	3 - 5

Die Gesamtheit aller systematischen Beobachtungen zur Überwachung des Bewegungsverhaltens und deren Auswertung mit der Möglichkeit, bei Bedarf auch steuernd eingreifen zu können, wird als Monitoring bezeichnet. Hierfür lassen sich je nach Anwendungszweck alle zuvor genannten Mess- und Auswerteverfahren einzeln oder auch in Kombination einsetzen.

2.2 Werkzeuge der Zeitreihenanalyse

In der modernen Überwachungsmessung bieten praktisch alle Messsysteme eine automatisierte Objekterfassung, den elektronischen Abgriff sowie die Möglichkeit, die Messwerte mit einem Zeitstempel zu versehen und weiterzuverarbeiten. Neben den primären Zielgrößen der Überwachung lassen sich daher auch die bisher als „Randerscheinungen“ betrachteten periodischen Abweichungen (z.B. Jahresgänge) in den vorliegenden Daten analysieren, sodass diese zur Interpretation des gesamten Objektverhaltens im Sinne der kinematischen oder dynamischen Deformationsanalyse herangezogen werden können (Foppe, et al., 2009).

Der physikalische Vorgang einer Deformation läuft als kontinuierlicher Prozess $\xi(t)$ ab, die Erfassung kann messtechnisch hingegen nur zu diskreten Zeitpunkten erfolgen. Die zeitabhängige Realisierung stellt daher eine diskrete Zeitreihe $x(t)$ dar, wobei die Wahl der Abtastrate Δt von der der zu erwarteten Änderungsgeschwindigkeit des Prozesses abhängig ist (Heunecke, et al., 2013).

Als Beispiel für die weiteren Erläuterungen dient die Positionskomponente einer GNSS-Zeitreihe, welche die periodische Bewegung der Antenne für einen Zeitraum von 10 Sekunden beinhaltet:

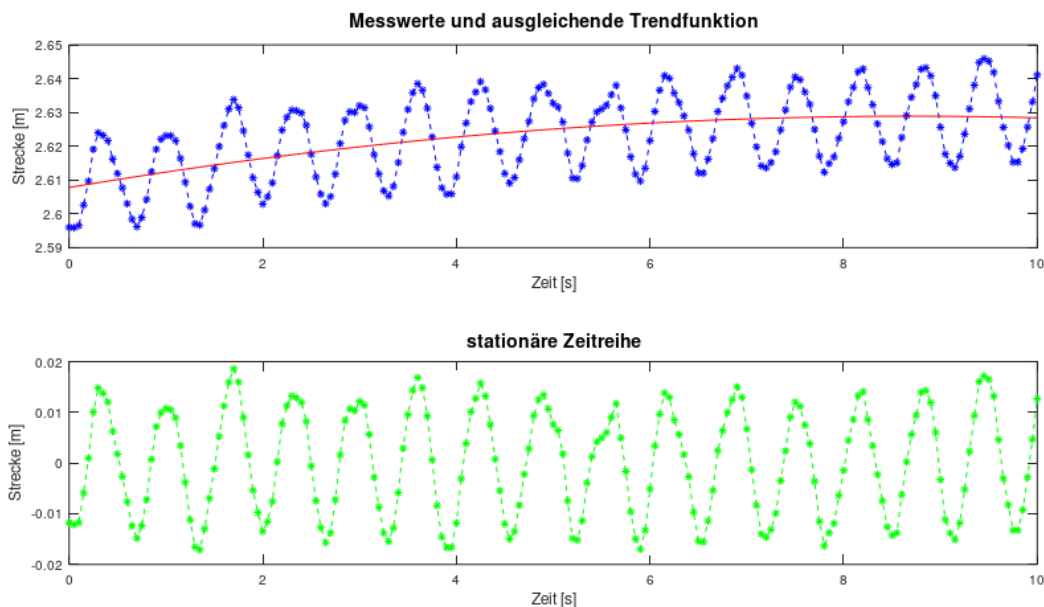


Abbildung 2-2: Beispiel einer gemessenen und stationären Zeitreihe

Da die Mehrdeutigkeiten für diesen Ausschnitt der Zeitreihe nicht festgesetzt wurden, weisen die Messwerte neben dem Offset auch einen Trend auf. Für die weiteren Auswertungen muss jedoch die Forderung der Stationarität erreicht werden: Durch eine Regression oder geeigneter Mittelwertbildung (z.B. Median-Filter) werden die deterministischen Anteile aus der Zeitreihe entfernt, sodass diese anschließend über den gesamten Zeitraum einen konstanten Mittelwert und Varianz aufweist.

Analyse im Zeitbereich:

Schon anhand der in Abbildung 2-2 unten aufgetragenen stationären Zeitreihe lässt sich die Amplitude mit etwa 11 Millimetern abschätzen. Weiterhin entsprechen die 15,5 Schwingungen in dem Zeitraum von 10 Sekunden einer Periodendauer von 0,65 Sekunden bzw. einer Frequenz von 1,55 Hertz. Mit der Abtastrate von 20 Hertz wird die Bewegung daher schneller erfasst als sich die Schwingung ändert; aufeinanderfolgende Messwerte sind somit aufgrund des Objektverhaltens miteinander korreliert. Dieses als Erhaltensneigung bezeichnete Phänomen kann für einen zeitabhängigen Prozesses $\xi(t)$ als Verallgemeinerung der Varianz σ^2 aus dem Erwartungswert μ durch die Autokovarianzfunktion $C(\tau)$ beschrieben werden:

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} (\xi(t) - \mu)(\xi(t + \tau) - \mu) dt \right\}$$

Formel 2-1: Autokovarianzfunktion einer Zeitreihe (Heunecke, et al., 2013 S. 343)

Für die messtechnisch erfasste diskrete Zeitreihe $x(t)$ erfolgt die Herleitung zunächst über den empirischen Mittelwert \bar{x} und die Varianz s^2 :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \qquad s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$$

Formel 2-2: Mittelwert und Standardabweichung (Heunecke, et al., 2013 S. 342 f.)

Analog zur Formel 2-1 ergibt sich als Schätzung daraus die diskrete Autokovarianzfunktion $\hat{C}(k)$, welche aus Gründen der statistischen Sicherheit üblicherweise nur bis zur Stelle k berechnet wird:

$$\hat{C}(k) = \frac{1}{n-k-1} \sum_{j=1}^{n-k} (x_j - \bar{x})(x_{j+k} - \bar{x}); \quad k = n/10$$

Formel 2-3: diskrete Autokovarianzfunktion einer Zeitreihe (Heunecke, et al., 2013 S. 343)

Da die diskrete Autokovarianzfunktion an der Stelle $k = 0$ die empirische Varianz s^2 wiedergibt, ist diese nicht skaleninvariant. Für eine bessere Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Messgrößen und Dimensionen ist daher die Normierung zur diskreten Autokorrelationsfunktion $\hat{K}(k)$ sinnvoll:

$$\hat{K}(k) = \frac{\hat{C}(k)}{\hat{C}(0)}$$

Formel 2-4: Autokorrelationsfunktion einer Zeitreihe (Heunecke, et al., 2013 S. 343)

Die Autokorrelationsfunktion gibt somit die Ähnlichkeit einer um die Zeit k verschobenen Zeitreihe $x(t+k)$ mit der ursprünglichen Zeitreihe $x(t)$ an. Die in der Beispielzeitreihe enthaltene Periodizität wird daher mit einem positiven Korrelationskoeffizienten von 0,9 nach einer Zeitverschiebung von rund 0,65 Sekunden sichtbar:

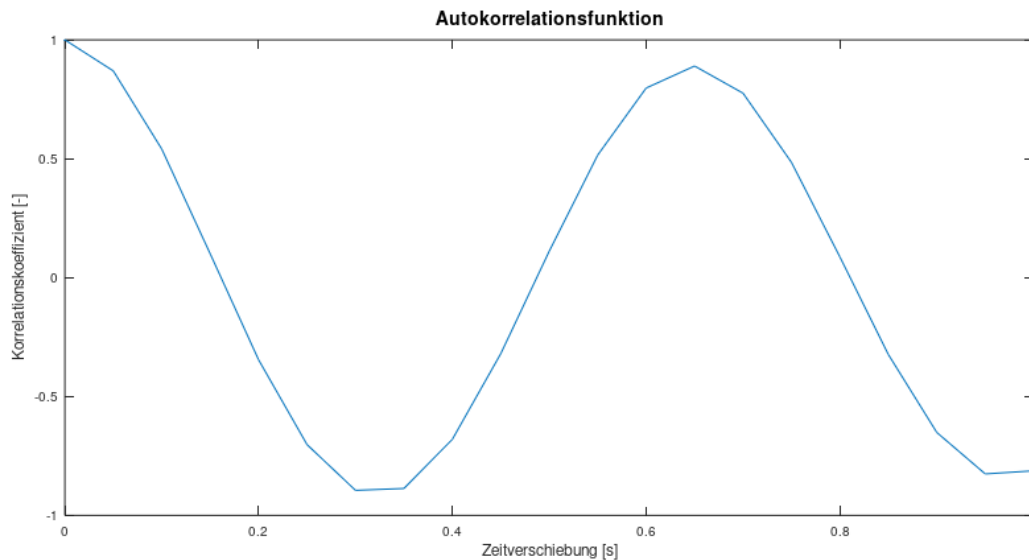


Abbildung 2-3: Autokorrelationsfunktion des Beispieldatensatzes

Weiterhin kann analog zur Formel 2-3 die relative zeitliche Verschiebung zweier diskreter Zeitreihen $x(t)$ und $z(t)$ mit der Kreuzkovarianzfunktion \hat{C}_{xz} berechnet werden:

$$\hat{C}_{xz} = \frac{1}{n-k-1} \sum_{j=1}^{n-k} [x_j - \bar{x}][z_{j+k} - \bar{z}]; \quad k = n/10$$

Formel 2-5: Kreuzkovarianzfunktion zwischen zwei Zeitreihen (Heunecke, et al., 2013 S. 348)

Auch hier ist wiederum eine Normierung zur Kreuzkorrelationsfunktion $\hat{K}_{xy}(k)$ möglich:

$$\hat{K}_{xz}(k) = \frac{\bar{C}_{xz}(k)}{\sqrt{\hat{C}_x(0) * \hat{C}_z(0)}}$$

Formel 2-6: Kreuzkorrelationsfunktion zweier Zeitreihen

Die aus der Kreuzkorrelation abgeleitete relative Zeitverschiebung gibt Aufschlüsse über das Übertragungsverhalten zwischen den beiden Zeitreihen. So treten im praktischen Einsatz die Deformationen am Objekt zumeist zeitverzögert gegenüber den Einflussgrößen (Temperatur, Last, ...) auf. Eine weitere Anwendung findet sich bei Ermittlung des Offsets in der ereignisbasierten Synchronisierung von Messsystemen mit lokalen Zeitstempeln.

Analyse im Frequenzbereich:

Die Darstellung im Zeitbereich erlaubt das Abschätzen der enthaltenen Periodizitäten, die Amplituden sind hingegen besonders bei überlagerten Schwingungsprozessen nicht sofort aus den stationären Daten ersichtlich. Hierzu lassen sich erst mithilfe einer Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich die Amplituden in einem Spektrum in Abhängigkeit von der Frequenz einzeln auftragen und näher analysieren. Der Übergang von der empirischen Autokovarianzfunktion $\hat{C}(k)$ im

Zeitbereich zum empirischen Leistungsspektrum $\hat{P}(v_k)$ im Frequenzbereich kann dabei mit der diskreten Fouriertransformation erreicht werden:

$$\hat{P}(v_k) = 4\Delta t \left\{ \frac{1}{2} [\hat{C}(0) + (-1)^k \hat{C}(m)] + \sum_{j=1}^{m-1} \hat{C}(j) \cos(\pi k \frac{j}{m}) \right\}$$

Formel 2-7: Übergang in den Frequenzbereich mit der diskreten Fouriertransformation (Heunecke, et al., 2013 S. 363)

Das empirische Leistungsspektrum $\hat{P}(v_k)$ stellt eine Schätzung für das theoretische Leistungsspektrum $P(v)$ dar und folgt der χ^2 -Verteilung. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ und dem aus der Festlegung $m = n/10$ resultierenden effektiven Freiheitsgrad von $f_{eff} = 19$ lassen sich daher auch die Grenzen des Konfidenzbereiches angeben:

$$g_u = \hat{P}(v_k) * \frac{f_{eff}}{\chi^2_{f_{eff}; 1-\alpha/2}} = \hat{P}(v_k) * 0,58 \qquad g_o = \hat{P}(v_k) * \frac{f_{eff}}{\chi^2_{f_{eff}; \alpha/2}} = \hat{P}(v_k) * 2,13$$

Formel 2-8: Grenzen des Konfidenzbereichs für das empirische Leistungsspektrum (Heunecke, et al., 2013 S. 361)

Das Leistungsspektrum stellt als Energiedichtefunktion die im Prozess enthaltene Gesamtenergie dar. Für praktische Interpretationen sind hingegen die aus dem Leistungsspektrum abgeleiteten Amplituden anschaulicher:

$$\hat{A}_k = \sqrt{\hat{P}(v_k) * \frac{1}{2m \Delta t}}$$

Formel 2-9: Übergang zum empirischen Amplitudenspektrum (Heunecke, et al., 2013 S. 364)

Analog dazu verhalten sich die Grenzen des Konfidenzbereichs aus Formel 2-8:

$$g_{u,A} = \hat{A}_k * 0,76 \qquad g_{o,A} = \hat{A}_k * 1,46$$

Formel 2-10: Grenzen des Konfidenzbereichs für das empirische Amplitudenspektrum

Für eine Signifikanzbewertung werden die Grenzen des Konfidenzbereichs zunächst für ein angenommenes Spektrum wie z.B. dem empirischen Ruherauschen des jeweiligen Messsystems berechnet. Anschließend wird das zu bewertende Spektrum mit den Grenzen verglichen; eine Abweichung davon stellt eine signifikante Periodizität dar.

Die Berechnung eines Leistungs- oder Amplitudenspektrums mit der diskreten Fouriertransformation ist aufgrund des Umweges über die Autokovarianz mit zunehmender Messwertanzahl sehr rechenintensiv. Im praktischen Gebrauch hat sich daher die schnelle Fouriertransformation („fast fourier transform“ - FFT) durchgesetzt, bei der die die Symmetrieeigenschaften der trigonometrischen Funktionen ausgenutzt werden um gleichartiger Funktionswerte nicht berechnen zu müssen. Weiterhin kann hierbei durch auffüllen der Zeitreihe mit Nullen („Zero-Padding“) bis zur nächsten Potenz 2^n die Auflösung des Spektrums erhöht werden (Heunecke, et al., 2013 S. 366).

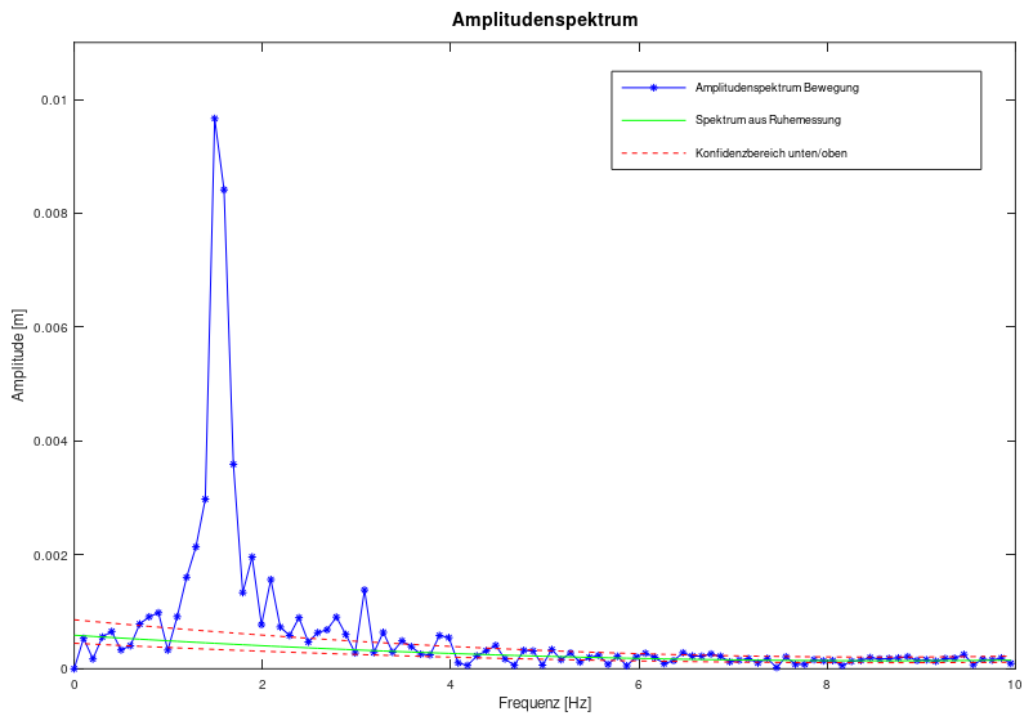


Abbildung 2-4: Amplitudenspektrum des Beispieldatensatzes

In der Abbildung 2-4 ist das mit der schnellen Fouriertransformation berechnete Amplitudenspektrum des Beispieldatensatzes bis zur halben Abtastfrequenz (Nyquistfrequenz) dargestellt. Im Vergleich zum aus einer Ruhemessung von 10 Sekunden abgeleiteten Konfidenzbereich zeigt sich eine signifikante Spitze bei 1,5 Hertz mit einer Amplitude von 9,9 Millimetern. Da die Zeitreihe nicht rein sinusförmig verläuft ist außerdem bei der doppelten Frequenz von etwa 3,1 Hertz die erste Oberschwingung mit einer Amplitude von 1,4 Millimetern ersichtlich.

Analyse im Zeit-Frequenz-Bereich:

Für eine sachgerechte Auswertung im Frequenzbereich muss die Zeitreihe über den gesamten Auswertezitraum eine gleiche Periodizität und Amplitude aufweisen. Im praktischen Einsatz sind die genauen Zeitfenster der Deformation oftmals nicht hinreichend genau bekannt, sodass eine aufwändige manuelle Selektion der Ereignisse durchgeführt werden muss. Um diesen Nachteil zu umgehen, lässt sich mit der Kurzzeit-Fouriertransformation („short-time fourier transform“ - STFT) der Verlauf des Signals mit periodischen Anteilen in Abhängigkeit von der Zeit darstellen. Hierbei wird das Signal mithilfe einer Fensterfunktion in Zeitabschnitte eingeteilt, in welchen die Auswertung mit der Fouriertransformation durchgeführt wird. Durch eine Verschiebung dieses Auswertefensters können somit über den gesamten Zeitraum Angaben zur Periodizität des Signals getätigt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass die gleichzeitige Anpassung der Sensitivität in Bezug zur Zeit- und Frequenzauflösung aufgrund der Küpfmüllerschen Unbestimmtheitsrelation nicht möglich ist; dies zeigt sich in den Spektrogrammen anhand von „Verschmierungseffekten“:

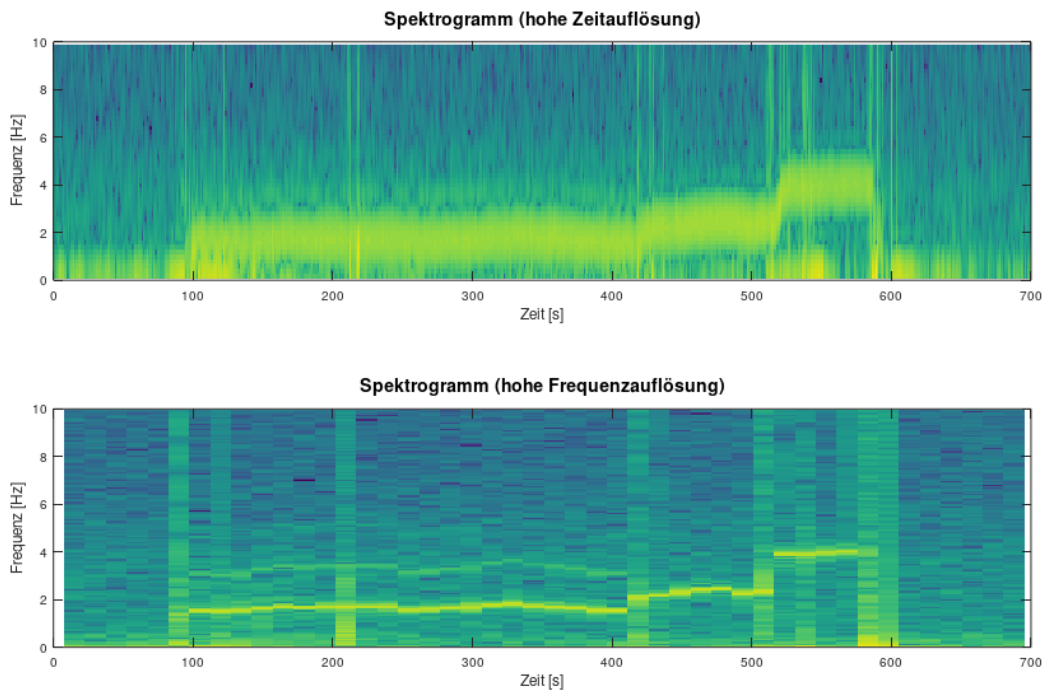


Abbildung 2-5: Spektrogramme mit hoher Zeit- bzw. Frequenzauflösung

Die Abbildung 2-5 stellt die Spektrogramme einer 700 sekundigen Messung einer Antennenposition mit unterschiedlichen Bewegungsfrequenzen dar. Mit kurzen Auswertefenstern lassen sich die Zeitpunkte der Frequenzübergänge (senkrechte Linien) ermitteln, gleichzeitig wird jedoch die Periodizität nur sehr breitbandig wiedergegeben. Ein längeres Zeitfenster optimiert die Frequenzauflösung, es geht dabei jedoch die Information der Übergangzeitpunkte verloren bzw. wird nur sehr undeutlich dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit der Analyse im Zeit-Frequenz-Bereich bietet der Einsatz der Wavelet-Transformation. Hierbei ist die Fenstergröße variabel, sodass Periodizitäten gleichermaßen für hohe und niedrige Frequenzbereiche ermittelt werden können. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch vorwiegend niedrige Frequenzen bis etwa 5 Hertz aufgedeckt werden sollen, ist die Kurzzeit-Fouriertransformation aufgrund der einfacheren Anwendung das Mittel der Wahl dar.

2.3 Schwingungsmessungen

Die im praktischen Teil dieser Arbeit untersuchten Deformationsvorgänge am Turm der St. Petri-Kirche als auch an der Fußgängerbrücke sind grundsätzlich periodisch-oszillierender Natur. Auch wenn ein Großteil der realen Schwingungsvorgänge das Kriterium der strengen Periodizität nicht erfüllen, können sie dennoch als (zusammengesetzte) harmonische Schwingungen approximiert werden. Auf die sich dadurch ergebenden Vereinfachungen für die Auswertung wird diesem Abschnitt näher eingegangen.

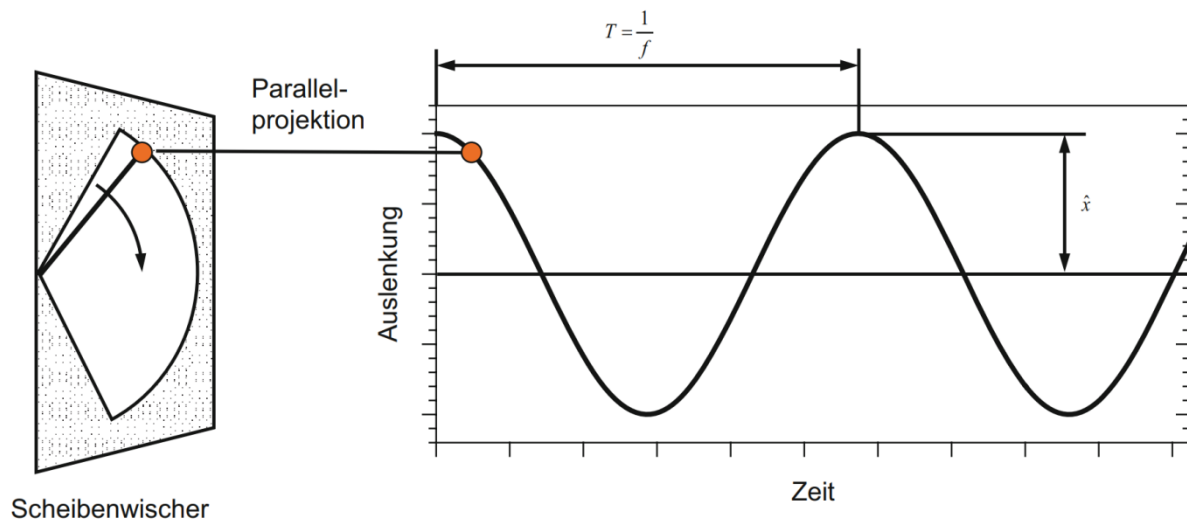


Abbildung 2-6: Beispiel einer harmonischen Schwingung (Kuttner, et al., 2019)

Die Abbildung 2-6 zeigt den zeitlichen Verlauf eines Scheibenwischers, dessen gleichmäßige Bewegung in der Parallelprojektion als Beispiel einer harmonischen Schwingung aufgefasst werden kann. Die Amplitude der Auslenkung \hat{x} beschreibt in seinem zeitlichen Verlauf einen Cosinus mit der Kreisfrequenz ω . Diese bezieht sich auf den Einheitskreis und ist abhängig von der Periodendauer T ($\omega = \frac{2\pi}{T}$). Der Nullphasenwinkel φ_0 ist dabei die Abweichung von der idealen Phasenlage (Amplitude = 1) zum Zeitpunkt t_0 . Der zurückgelegte Weg in Abhängigkeit von der Zeit lässt sich somit als harmonische Schwingung darstellen:

$$x(t) = \hat{x} * \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Formel 2-11: Weg-Zeit-Funktion

Ausgehend vom Weg kann durch Differenzieren die Geschwindigkeit berechnet werden:

$$\dot{x}(t) = -\hat{x} * \sin(\omega t + \varphi_0) * \omega$$

Formel 2-12: Geschwindigkeits-Zeit-Funktion

Bei erneuter Ableitung ergibt sich daraus die Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit:

$$\ddot{x}(t) = -\hat{x} * \cos(\omega t + \varphi_0) * \omega^2$$

Formel 2-13: Beschleunigungs-Zeit-Funktion

Die Formeln 2-11 bis 2-13 zeigen, dass sich bei harmonischen Schwingungen die Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg äquivalent ineinander umrechnen lassen. Die dazugehörigen Amplituden vereinfachen sich somit zu:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -\hat{x} * \underbrace{\sin(\omega t + \varphi_0)}_{=-1} * \omega = \hat{x} * \omega = \hat{x} * 2\pi f \\ \ddot{x}(t) &= -\hat{x} * \underbrace{\cos(\omega t + \varphi_0)}_{=-1} * \omega^2 = \hat{x} * \omega^2 = \hat{x} * 4\pi^2 f^2 \end{aligned}$$

Formel 2-14: Amplituden der Geschwindigkeit und Beschleunigung einer harmonischen Schwingung

Aus Formel 2-14 wird ersichtlich, dass für die Umrechnung einer Weg- in eine Geschwindigkeitsamplitude diese mit dem Faktor $2\pi f$ multipliziert werden muss; um vom Weg- zu einer Beschleunigungsamplitude zu gelangen muss der Faktor $4\pi^2 f^2$ angebracht werden. Umgekehrt ist für die Integration der Größen die Division mit den genannten Faktoren notwendig. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-7 mithilfe eines logarithmisch skalierten Diagrammes verdeutlicht. Bei einer konstanten Geschwindigkeit nimmt mit steigender Frequenz die Größe der Wegamplituden ab, die der Beschleunigungsamplituden jedoch zu:

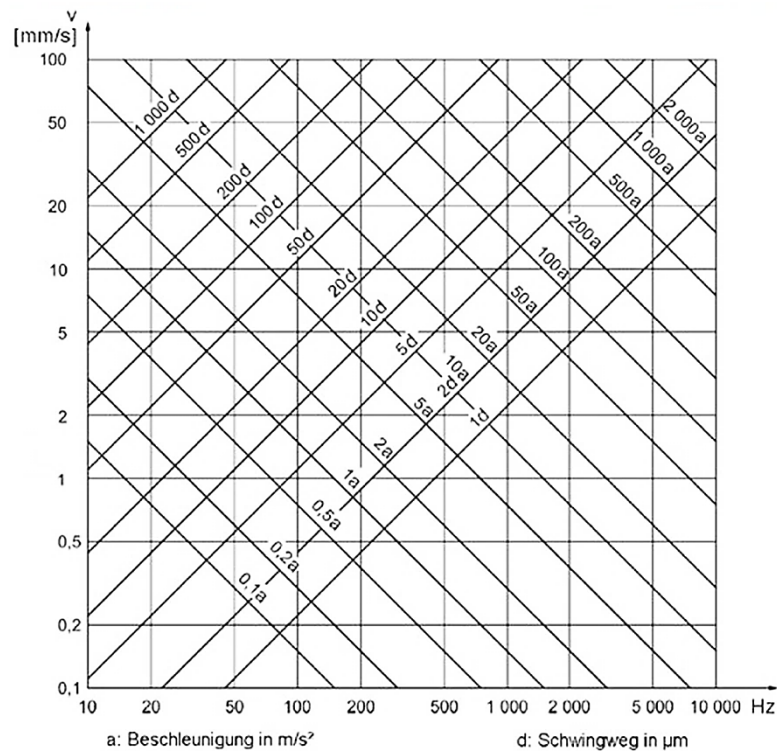


Abbildung 2-7: Zusammenhang zwischen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Frequenzbereich (Ruhm, 1992)

Im Frequenzbereich ist daher die Umrechnung der Amplitudenspektren mithilfe einfacher Rechenoperationen möglich. Die Messtechnik macht sich diesen Umstand zu Nutze, da z.B. in hohen Frequenzbereichen die Messung von Beschleunigungen einfacher umsetzbar ist als das direkte Messen der Schwingwege. Im praktischen Einsatz ist bei der Umrechnung jedoch die Sensitivität zu beachten: So wird das Amplitudenspektrum einer Beschleunigung bei der Integration zu Geschwindigkeiten oder Wegen mit zunehmender Frequenz geglättet, gleichzeitig wird das Grundrauschen in niedrigen Frequenzbereichen jedoch verstärkt dargestellt.

3 Aufbau der Messverfahren

Die Anwendung technologisch unterschiedlicher Messverfahren zur Erfassung von Deformationen wird einerseits zum Vergleich der Ergebnisse aber auch aus Gründen der Redundanz durchgeführt. So können die Ergebnisse untereinander validiert oder auch unerkannte Systematiken, die nur bei einem Messsystem auftreten, durch ein anderes aufgedeckt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden inertielle Sensoren in MEMS-Bauweise auf Basis von Smartphones sowie ein selbstkonfiguriertes kostengünstiges GNSS-Messsystem zur praktischen Erfassung von Bauwerksdeformationen vergleichend evaluiert. Darüber hinaus wird auch der Einsatz von elektronischen Tachymetern zu Vergleichszwecken behandelt. Die notwendigen technischen Grundlagen, der Aufbau und einige Besonderheiten der eingesetzten Messverfahren sind in diesem Kapitel zusammengestellt.

3.1 Inertialsensoren in MEMS-Bauweise

In der Geodäsie werden Inertialsensoren nicht nur für Zwecke der Navigation sondern zunehmend auch im Rahmen von Überwachungsmessungen verwendet. Im folgenden Abschnitt soll zunächst auf die technischen Grundlagen dieser Systeme eingegangen werden. Zudem werden die Rohdaten der verwendeten preisgünstigen Sensoren aus Geräten der mobilen Konsumelektronik in Bezug auf die erreichbaren Genauigkeiten und notwendigen Kalibrierprozesse näher untersucht.

3.1.1 Grundlagen

Ein Inertialsensor (von *inertia* (lat.), *Trägheit*) dient zur Erfassung des Bewegungsverhaltens eines Objekts in Bezug zum gravitationsfreien (unbeschleunigten) Inertialraum. Um die Bewegungen dreidimensional zu erfassen, sind jeweils Beschleunigungs- gemeinsam mit Drehratensensoren koaxial auf drei zueinander rechtwinkligen Achsen zusammengefasst und an eine Uhr gekoppelt (Foppe, 2001); diese Konfiguration wird als Inertialmesseinheit („inertial measurement unit“ - IMU) bezeichnet. Durch die zweifache Integration der Beschleunigungen und der einfachen Integration der Drehraten kann in einem zuvor definierten Bezugssystem die Position und Ausrichtung des Sensors zu diskreten Zeitpunkten angegeben werden. Da diese Sensoren vollkommen unabhängig von äußeren Bedingungen wie z.B. Sicht- oder Funkverbindungen sind, eignen sie sich insbesondere für Navigationsfragen oder auch Messanwendungen in räumlich extrem beengten Verhältnissen.

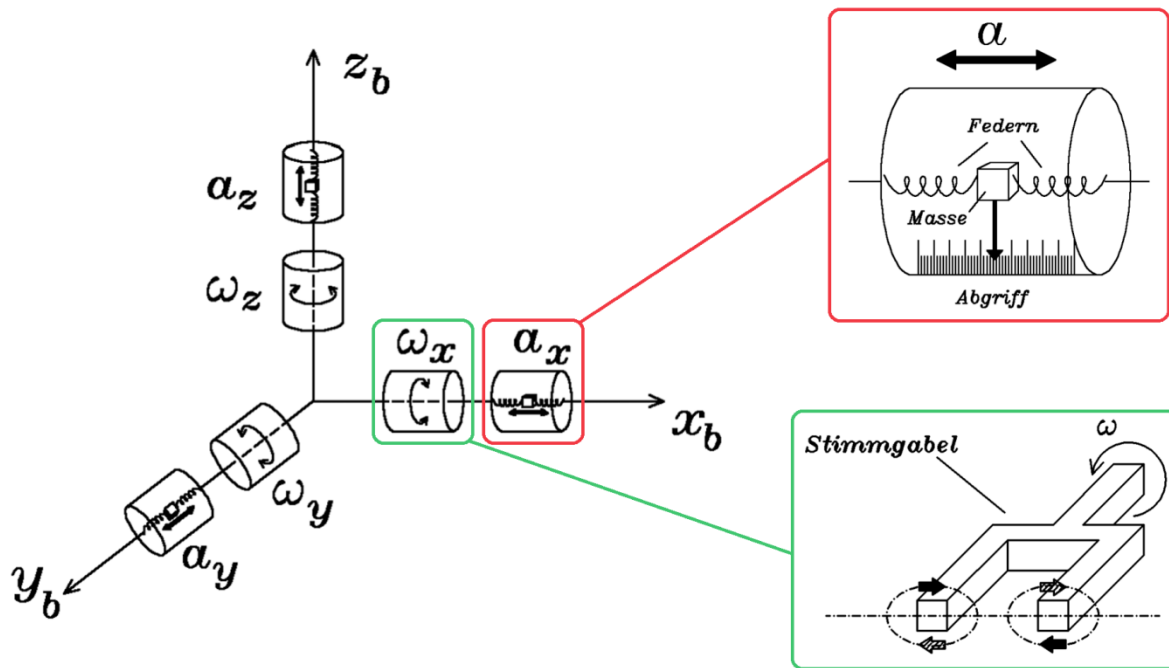


Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau eines Inertialsensors (Foppe, 2001)

Für hochpräzise Aufgaben wie bei der Koppelnavigation kommen überwiegend Plattformsysteme zum Einsatz. Hierbei sind die Sensoren auf einer durch Servomotoren nachstellbaren kardanisch aufgehängten Plattform montiert. Durch diese Bauweise wird der Messbereich klein gehalten, wodurch eine hohe Auflösung möglich ist und gleichzeitig die vorhandenen Restfehler minimiert werden. Als Nachteile sind hier jedoch die verhältnismäßig großen Baudimensionen sowie die aufgrund der aufwändigen Fertigung hohen Kosten für diese Systeme zu nennen.

Mit der zunehmenden Technisierung haben sich die sogenannten Strapdown-Systeme entwickelt. Bei diesen sind die Sensoren direkt mit dem bewegten Körper verbunden wodurch die komplexe Aufhängung und Regelung entfällt. Im Vergleich zu den Plattformsystemen müssen die eingesetzten Sensoren jedoch einen großen Messbereich besitzen, sodass hier die Bestimmung von Kalibrierparametern für Offset, Maßstab und weiteren Einflussfaktoren insgesamt einen hohen Stellenwert einnimmt (Foppe, 2001). Mit diesen technischen Vereinfachungen ist eine kostengünstige Massenentwicklung und -herstellung insbesondere durch den Einsatz von Halbleitermaterialien in der Mikrosystembauweise („micro electronic-mechanical system“ - MEMS) möglich. Die Mikrosystembauweise ist im allgemeinen dadurch gekennzeichnet, dass sie elektrische, mechanische und ggf. weitere Komponenten enthält welche durch mikrotechnologische Fertigungsverfahren hergestellt werden; gleichzeitig sind sensorische, aktorische und signalverarbeitende Funktionen in diesen Sensoren implementiert. Die einzelnen Funktionselemente und Komponenten besitzen Abmessungen im Mikro- und Nanometerbereich und die Gesamtdimensionen der Sensoren liegen bei wenigen Millimetern (Wild-Pfeiffer, 2015).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die MEMS-Inertialsensoren aus Geräten der Konsumelektronik (Smartphones) verwendet. Die konkrete technische Realisierung der verbauten Sensoren ist unbekannt, nachfolgend sollen jedoch die üblichen Bauweisen für Beschleunigungs- und Drehratenmesser wiedergegeben werden:

Beschleunigungsmesser:

Ein MEMS-Beschleunigungsmesser besteht zumeist aus einer Prüfmasse, welche an einer Aufhängung befestigt ist. Während einer von außen einwirkenden Beschleunigung kommt es aufgrund der Massenträgheit zu einer Bewegung der Prüfmasse, die anschließend über ein Abgriffsystem erfasst wird. Eine Möglichkeit stellt die Feder-Masse-Bauweise wie in Abbildung 3-1 dar. Hierbei ist die Prüfmasse an zwei Federn mit dem Gehäuse verbunden und ein induktives oder kapazitives Abgriffsystem erfasst die Auslenkung. Mit bekannter Federkonstante kann somit die wirkende Beschleunigung a bestimmt werden.

Drehratenmesser (Gyroskope):

Für die messtechnische Erfassung von Drehraten werden unterschiedlichste Sensorbauweisen verwendet. Neben Systemen mit mechanischen Rotoren oder optischen Bauteilen kommen im MEMS-Bereich vorwiegend Vibrationsdrehratengeber zum Einsatz. In der Abbildung 3-1 ist die Realisierung als Stimmgabelsystem dargestellt. Hierbei vibrieren in der Ruhelage die Enden einer „Stimmgabel“ in der waagerechten Ebene. Sobald eine Drehung um die Sensorachse erfolgt, kommt es aufgrund des Coriolis-Effektes zusätzlich zu einer oszillierenden Bewegung der Enden um die Ebene. Diese Bewegungen lassen sich mit einem Abgriffsystem erfassen und stellen ein Maß für die einwirkenden Drehraten ω dar.

Bei inertialen Messsystemen treten in allen Preis- und Genauigkeitsklassen vergleichbare Fehlercharakteristiken auf, dessen die größten Einflüsse nachfolgend beschrieben werden sollen. So wird der Unterschied zwischen dem mechanischen Nullpunkt und elektronischen Abgriff als Nullpunktverschiebung oder Offset bezeichnet. Dies wirkt sich bei der Integration als Geschwindigkeits- oder Wegfehler bei den gemessenen Beschleunigungen und beim Gyroskop als konstanter Rotationsfehler aus, sodass er insbesondere bei Navigationsanwendungen den größten Fehlereinfluss auf das Ergebnis darstellt.

Der zumeist lineare Quotient zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal beschreibt den Maßstabsfaktor des Sensors; es sind jedoch auch quadratische oder kubische Nichtlinearitätsfehler möglich (Foppe, 2001). Bei geringen Beschleunigungen oder Drehraten wirkt sich ein Maßstabsfehler ähnlich wie ein Offset aus, er muss jedoch insbesondere für dynamische Anwendungen berücksichtigt werden. Weitere Fehlereinflüsse resultieren aus Nichtorthogonalitäten zwischen den Sensorachsen, Rotationseffekten sowie Abhängigkeiten aufgrund der Sensortemperatur.

Im vereinfachten Fehlermodell müssen für den Beschleunigungsmesser an die Messwerte \vec{a} die Parameter Offset \vec{b}_a und Maßstabsfaktor M_a angebracht werden, um die tatsächliche Beschleunigung \vec{a}_{korr} zu erhalten:

$$\vec{a}_{korr} = M_a * \vec{a} + \vec{b}_a (+ \vec{n}_a)$$

Formel 3-1: vereinfachtes Fehlermodell für den Beschleunigungsmesser (Willemsen, 2016)

Analog dazu müssen beim Gyroskop zum Erhalt der tatsächlichen Drehrate \vec{r}_{korr} die Messwerte \vec{r} um Offset \vec{b}_r und Maßstabsfaktor M_{Gyr} korrigiert werden:

$$\vec{r}_{korr} = M_{Gyr} * \vec{r} + \vec{b}_r (+ \vec{n}_r)$$

Formel 3-2: vereinfachtes Fehlermodell für das Gyroskop (Willemsen, 2016)

Sowohl beim Beschleunigungsmesser als auch beim Gyroskop gibt es besonders bei Sensoren in MEMS-Bauweise zusätzlich zu den genannten Parametern das sensorinhärente Rauschen \vec{n}_a bzw. \vec{n}_r als weiteren Fehlereinfluss. Dabei verhalten sich die Abweichungen nicht normalverteilt, sondern sie verhalten sich zumindest für einen begrenzten Zeitraum systematisch. Bei den aus Beschleunigungsmessungen abgeleiteten Geschwindigkeiten und Wegen und dem aus Drehraten integrierten Drehwinkel zeigen sich daher momentstabile Drifterscheinungen:

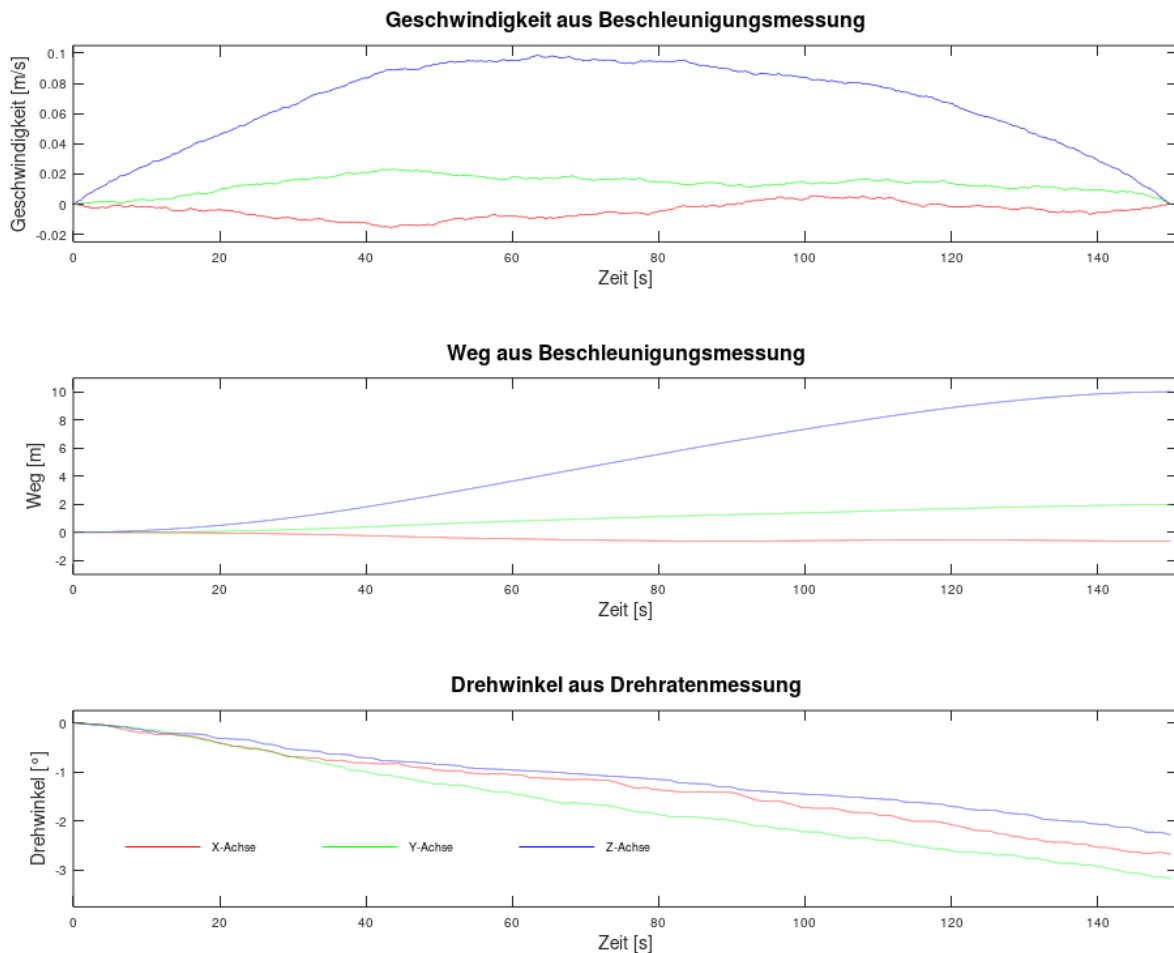


Abbildung 3-2: Drift bei integrierten Geschwindigkeiten, Wegen und Drehwinkeln nach 150 Sekunden (Ruhemessung)

Die in Abbildung 3-2 dargestellten Abweichungen von bis zu 10 Metern in der Entfernung und 3° bei der Ausrichtung können für Navigationsanwendungen im Allgemeinen nicht akzeptiert werden. In der Ingenieurgeodäsie bestehen jedoch an Inertialsensoren und den daraus abgeleiteten Ergebnissen teilweise andere Anforderungen, sodass je nach Auswerteverfahren nicht alle Korrekturparameter von Bedeutung sind. So können durch eine bedachte Anordnung wie der Messung in zwei Lagen oder einer Hin- und Rückmessung die vorzeichenbehafteten systematischen Fehleranteile weitestgehend eliminiert werden (Neuhierl, 2005).

3.1.2 Kostengünstige Sensorik in consumer-Endgeräten

Durch die technischen Fortschritte in der Elektronik und Digitalisierung und dem daraus resultierenden Bedarf in der Kommunikationstechnik, Automobil- und Luftfahrzeugbranche sowie der Industrie werden seit rund 20 Jahren mikromechanische Systeme in großen Massen entwickelt und produziert. Der Markt für Konsumelektronik besitzt dabei aufgrund der allgemeinen Etablierung von Endgeräten im täglichen Gebrauch das größte Marktvolumen. Eine reduzierte Darstellung der originären Einsatzbereiche für MEMS-Sensoren in Smartphones ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst:

Tabelle 3-1: Einsatzbereiche ausgewählter MEMS-Sensoren in Smartphones

Sensor	Anwendungsbereich
Beschleunigungssensor	Lage- und Bewegungserkennung (Displayausrichtung, Schrittzähler, ...)
Drehratensensor	Bildstabilisierung, Navigation
Magnetometer	Navigation (Absolutrichtung für IMU), Steuerungsanwendungen
Luftdrucksensor	Höhenmesser (Unterstützung für GNSS), Indoornavigation

Aufgrund der sehr kostengünstigen Herstellung sind diese Sensoren in Endgeräten aller Preisklassen enthalten und daher unkompliziert verfügbar. Seit einiger Zeit hat sich die Nutzung dieser Geräte z.B. für die Ausbildung in physikalisch-technischen Fächern und der Forschung zur Entwicklung eigener Anwendungen etabliert. Besonders in der Lehre sind hierzu neben der anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche auch die Möglichkeit der Echtzeitdarstellung von Messergebnissen und Analysen, ein Fernzugriff sowie das Vorhandensein von vielfältigen Exportfunktionen notwendig (Staacks, et al., 2018). Aufgrund der genannten Vorteile hat sich für die Rohdatenaufzeichnung mit Smartphones im Rahmen dieser Arbeit die Anwendung Phyphox® von der RWTH Aachen bewährt.

Für die praktischen Versuche und Messungen stehen die Smartphones S5 mini (SM-G800F), S8 (SM-G950F), S9 (SM-G960F), S10 (SM-G973F) und A51 (SM-A515F) des Herstellers Samsung zur Verfügung. Besonderes Interesse liegt in den verbauten inertialen Messeinheiten, in denen jeweils in

3 Achsen Beschleunigungs- und Drehratensensoren zusammengefasst sind. In der Tabelle 3-2 sind die technischen Parameter der verbauten MEMS-Sensoren entsprechend der Datenblätter dargestellt:

Tabelle 3-2: technische Daten der IMUs aus den verwendeten Smartphones [(InvenSense, 2020), (STMicroelectronics, 2017), (STMicroelectronics, 2019)]

	InvenSense „M651M“ (MPU-6500)	STMicroelectronics LSM6DSL	STMicroelectronics LSM6DSO
Markteinführung	2013	2017	2018
Smartphone	SM-G800F	SM-G950F, SM-G960F, SM-A515F	SM-G973F
Abmessungen	3,0 x 3,0 x 0,9 mm	2,5 x 3,0 x 0,83 mm	2,5 x 3,0 x 0,83 mm
gewählter Arbeitsbereich Beschleunigungssensor Drehratenmesser	± 2 g ± 500 dps	±8 g ± 1000 dps	±8 g ± 1000 dps
Auflösung Beschleunigungssensor Drehratenmesser	16.384 LSB/g (0,061 mg) 65,5 LSB/dps (0,015 dps)	0,244 mg 35 mdps	0,244 mg 35 mdps
Rauschdichte Beschleunigungssensor Drehratenmesser	300 µg/VHz 10 mdps/VHz (±250 dps)	90 µg/VHz 3,8 mdps/VHz	80 µg/VHz 3,8 mdps/VHz
Offset (zero-g / zero-rate) Beschleunigungssensor Drehratenmesser	± 60 mg ± 5 dps	± 40 mg ± 3 dps	± 20 mg ± 1 dps
Maßstabsfaktor Beschleunigungssensor Drehratenmesser	3 % 3 %	- 1 %	- 1 %

Aus den Angaben der Datenblätter wird sichtbar, dass im Zeitverlauf erhebliche Qualitätsverbesserungen in der Sensortechnologie aufgetreten sind. Insbesondere zwischen dem MPU-6500 und den LSM6DSL bzw. LSM6DSO sind eine Genauigkeitssteigerung von Rauschdichte, Offset und Maßstabsfaktor sichtbar. Die offenbar höhere Auflösung des MPU-6500 gegenüber den anderen Sensoren wird hingegen nur aufgrund der in den Smartphones geräteintern fest vorgegebenen Arbeitsbereiche verursacht.

Da die Sensoren fest mit dem Smartphone verbaut und im Betriebssystem integriert sind, unterliegen die ausgegebenen „Rohdaten“ möglicherweise schon internen Vorverarbeitungen und Korrekturen. So liegt die höchstmögliche Abtastrate beim S5 mini bei etwa 200 Hertz, wohingegen bei den übrigen Smartphones rund 500 Hertz erreicht werden – beide Angaben unterschreiten die maximalen

Herstellerangaben deutlich. Für einen näheren Überblick der „Rohdaten“ wird daher mit allen vorliegenden Smartphones eine gleichzeitige Ruhemessung von 5 Minuten durchgeführt:

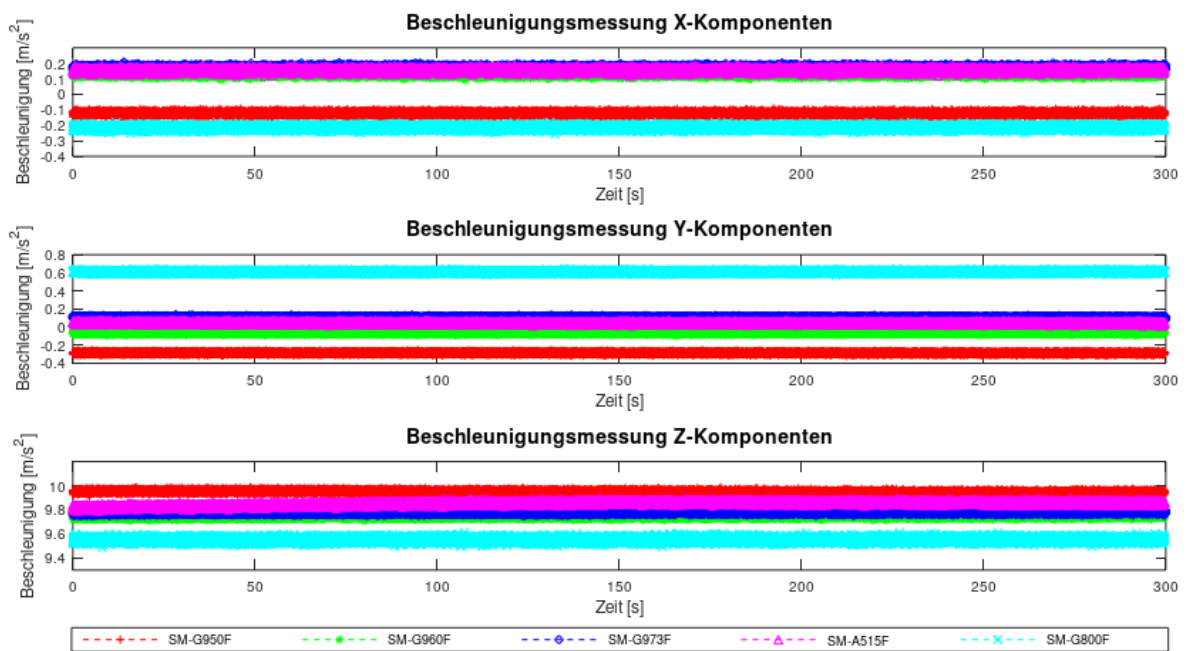


Abbildung 3-3: Rohdaten der Beschleunigungsmessung aus 5 Minuten Ruhemessung

Anhand der Zusammenstellung der Messreihen in Abbildung 3-3 ist ersichtlich, dass diese nur geringe Trends aufweisen und über den Zeitraum der Messung keine sichtbaren Ausreißer aufgetreten sind. Die Mittelwerte weichen jedoch signifikant von den Sollwerten (keine Beschleunigung in X- und Y-Achse, Erdbeschleunigung in Z-Achse) ab, was einerseits auf eine möglicherweise unpräzise Ausrichtung und vorwiegend auf die fehlenden Kalibrierparameter zurückgeführt werden kann.

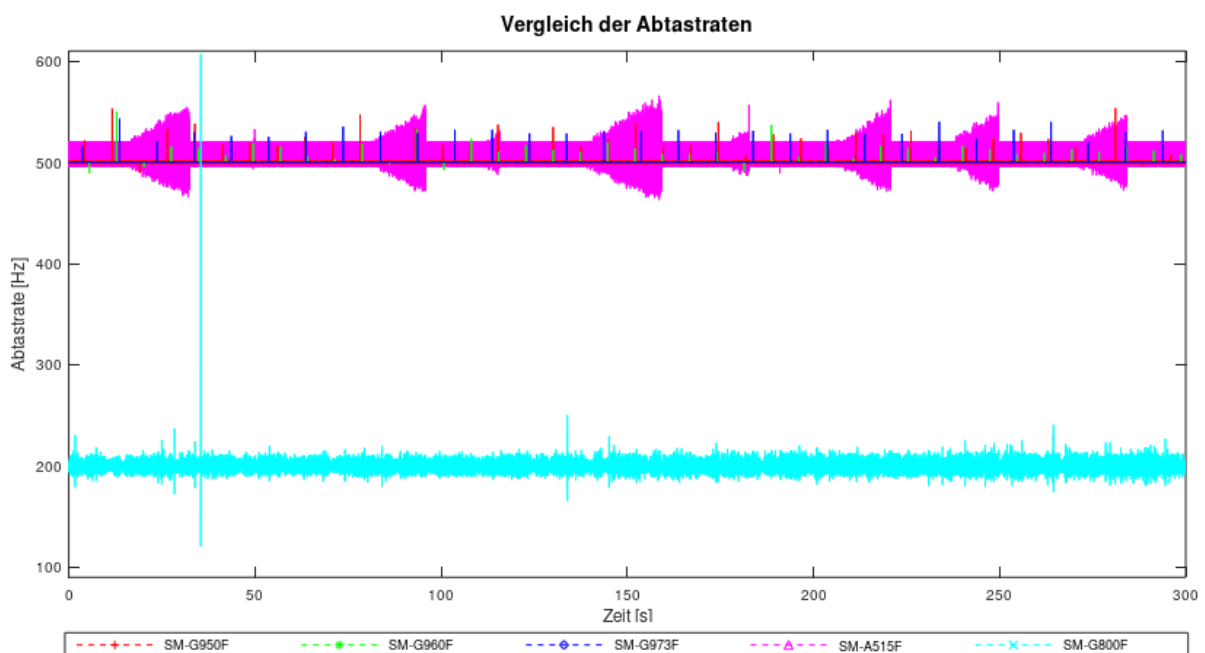


Abbildung 3-4: Vergleich der Abtastraten der Smartphones

Die Darstellung der Abtastraten in Abhängigkeit von der Zeit zeigt deutliche Unterschiede in der Qualität des Zeitstempels. Während bei den Smartphones S8, S9 und S10 sehr einheitlich die Rate von 500 Hertz mit nur wenigen unsystematischen Ausreißern vorliegt, zeigt der Zeitstempel des A51 deutliche Abweichungen bezüglich der Äquidistanz. So bewegt sich bei diesem die Abtastrate zunächst im Bereich von 495 bis 520 Hertz und wechselt nach rund 45 Sekunden periodisch auf 470 bis 560 Hertz. Nach rund 15 Sekunden wiederholt sich dieses Muster unsystematisch bis zum Ende der Messreihe. Beim S5 mini schwankt die Abtastrate zwischen 190 und 210 Hertz, wobei zudem mehrere Ausreißer vorhanden sind; im Mittel liegt die Abtastrate jedoch bei rund 200 Hertz. Die Abweichungen hängen somit nur bedingt vom verbauten Sensor im Smartphone ab, vielmehr wird die Qualität von der Baureihe des Smartphones und vermutlich dessen technischer Integration in das Betriebssystem bestimmt. Für die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit werden daher für die Abtastrate der Median als robuster Mittelwert eingeführt; grundsätzlich wäre hier auch die Interpolation der Messdaten eine weitere Möglichkeit.

Die Ergebnisse der fünfminütigen Ruhemessung sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt, wobei sowohl der gesamte Zeitraum und vergleichsweise ein Fenster von 30 Sekunden in der Mitte der Messreihe ausgewertet wurden:

Tabelle 3-3: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen aus Ruhemessung der Smartphones

	\bar{f}_s (\tilde{f}_s) [Hz]	\bar{X} (sX) [m/s ²]	\bar{Y} (sY) [m/s ²]	\bar{Z} (sZ) [m/s ²]	\bar{X} (sX) [m/s ²]	\bar{Y} (sY) [m/s ²]	\bar{Z} (sZ) [m/s ²]
	$t = 300 \text{ s}$				$t = 30 \text{ s}$		
SM-G950F	499,671 (499,668)	-0,1228 (0,0088)	-0,2865 (0,0083)	9,9493 (0,0102)	-0,1226 (0,0089)	-0,2860 (0,0082)	9,9547 (0,0091)
SM-G960F	500,063 (500,065)	0,1289 (0,0092)	-0,0634 (0,0084)	9,7454 (0,0097)	0,1286 (0,0092)	-0,0645 (0,0084)	9,7435 (0,0095)
SM-G973F	500,065 (500,050)	0,1699 (0,0093)	0,1029 (0,0087)	9,7781 (0,0080)	0,1700 (0,0091)	0,1052 (0,0085)	9,7732 (0,0077)
SM-A515F	506,465 (504,134)	0,1559 (0,0094)	0,0485 (0,0089)	9,8552 (0,0161)	0,1555 (0,0093)	0,0498 (0,0088)	9,8439 (0,0098)
SM-G800F	199,896 (199,932)	-0,2155 (0,0101)	0,6095 (0,0101)	9,5524 (0,0160)	-0,2164 (0,0099)	0,6094 (0,0100)	9,5508 (0,0158)

Aus der Ruhemessung wird ersichtlich, dass die Mittelwerte der Beschleunigungen für beide Auswertungen nur im Rahmen der Standardabweichung voneinander abweichen. Weiterhin ist das Grundrauschen der Sensoren LSM6DSL und LSM6DSO miteinander vergleichbar, sodass auch mit Steigerung der Messdauer keine signifikante Genauigkeitssteigerung eintritt. Auch der Sensor im S5 mini besitzt vorwiegend in der Z-Achse nur ein unwesentlich höheres Rauschen; dabei ist jedoch auf die geringere Abtastrate von nur 200 Hertz hinzuweisen.

Weiterhin soll kurz auf die Möglichkeiten zur Synchronisierung der Messreihen eingegangen werden. In der Abbildung 3-5 ist beispielhaft eine Messreihe der absoluten Beschleunigung mit dem S9 gegenüber dem A51 dargestellt:



Abbildung 3-5: Prinzip der ereignisbasierten Synchronisierung bei Smartphones (S9 vs. A51)

Während der Ruhemessung wurde zum Zeitpunkt 12:59:00 ein leichter Schlag auf die Unterlage der Smartphones durchgeführt, welcher in beiden Datensätzen sichtbar ist. Hier zeigt sich, dass bei der Umrechnung in die Systemzeit der Mobilgeräte eine Zeitdifferenz von -1,4 Sekunden beim S9 und 3,1 Sekunden beim A51 im Verhältnis zum Zeitpunkt des Ereignisses vorliegt; insgesamt liegt die Differenz zwischen den Geräten somit bei 4,5 Sekunden. Die Nutzung der Systemzeit als gemeinsame Zeitreferenz ist somit nur für geringe Genauigkeitsanforderungen sinnvoll. Zusätzlich wurden zu den Zeitpunkten 12:59:05 und 12:59:10 äquivalent weitere Ereignisse durchgeführt. Hier weist die Zeitdifferenz der Ereignisse zwischen beiden Geräten eine hohe Übereinstimmung untereinander und zur Soll-Zeitdifferenz von 5 Sekunden auf, sodass zumindest über diesen Zeitraum mögliche Drifteffekte zu vernachlässigen sind.

Die relative ereignisbasierte Synchronisierung lässt sich rechnerisch über die Kreuzkorrelation durchführen; die ermittelte Zeitverschiebung zwischen den Zeitreihen stellt die gesuchte Zeitdifferenz dar. Für weit voneinander entfernten Messstellen oder unterschiedliche Messsysteme kann die globale ereignisbasierte Synchronisierung nur bedingt angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher die Ereignisse im Verhältnis zu einem übergeordneten Zeitsystem (z.B. GNSS-Zeitstempel, Funkuhr, ...) für jedes Gerät einzeln zu Beginn und am Ende der Messreihe durchgeführt und in der Auswertung berücksichtigt.

Abschließend soll die vereinfachte Kalibrierung eines MEMS-Beschleunigungssensors am Beispiel des Samsung Galaxy S9 dargestellt werden. Es wird dabei jede Achse abwechselnd so ausgerichtet, dass die Schwerebeschleunigung jeweils nur in einer Achsrichtung einwirkt. Mit diesem Verfahren können jedoch nur die quantitativ größten Korrekturparameter Offset und Maßstab bestimmt werden; die Auswirkungen des Orthogonalitätsfehlers oder Drifterscheinungen sind mit diesem statischen Kalibriervorgang nicht ermittelbar.

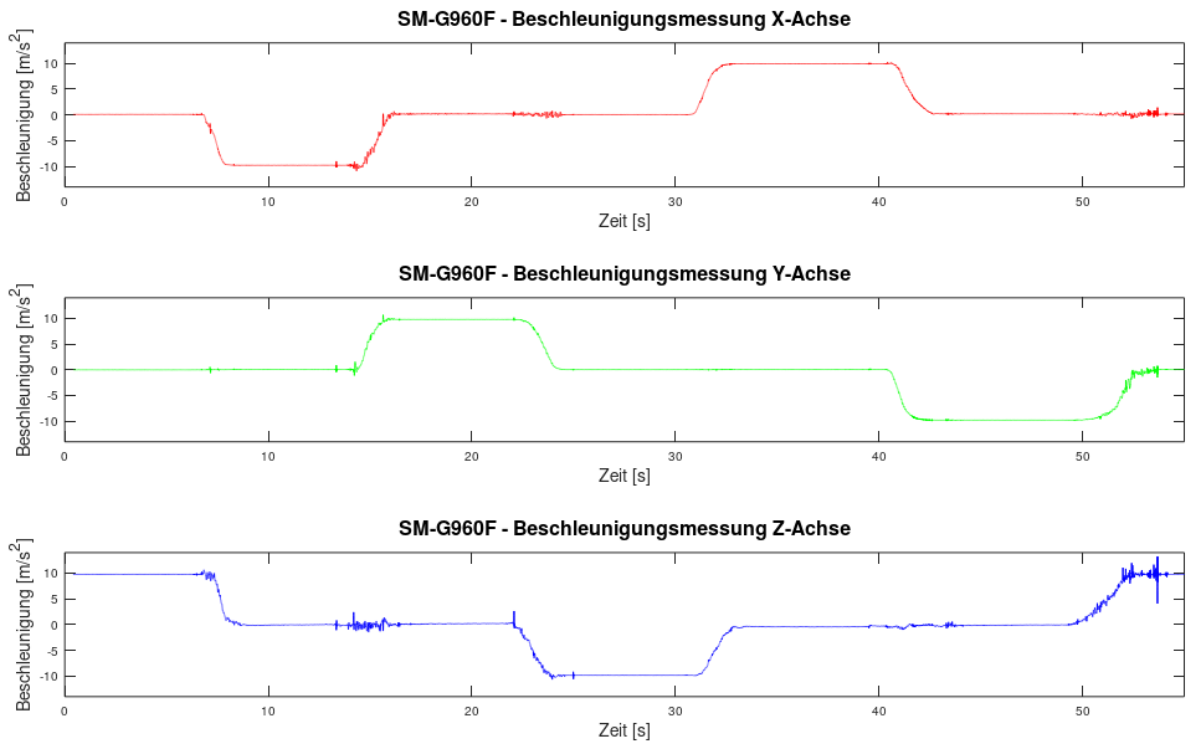


Abbildung 3-6: 6-Punkt Kalibrierung des Beschleunigungssensors im Samsung Galaxy S9

Wie aus Abbildung 3-6 ersichtlich ergeben sich bei einem 3-Achs Beschleunigungssensor für eine Messung in zwei Lagen insgesamt 6 mögliche Positionen. Um eine Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung zu erreichen, wird jede Ausrichtung für mindestens 4 Sekunden (~2000 Messwerte) beibehalten und die Messwerte erfasst:

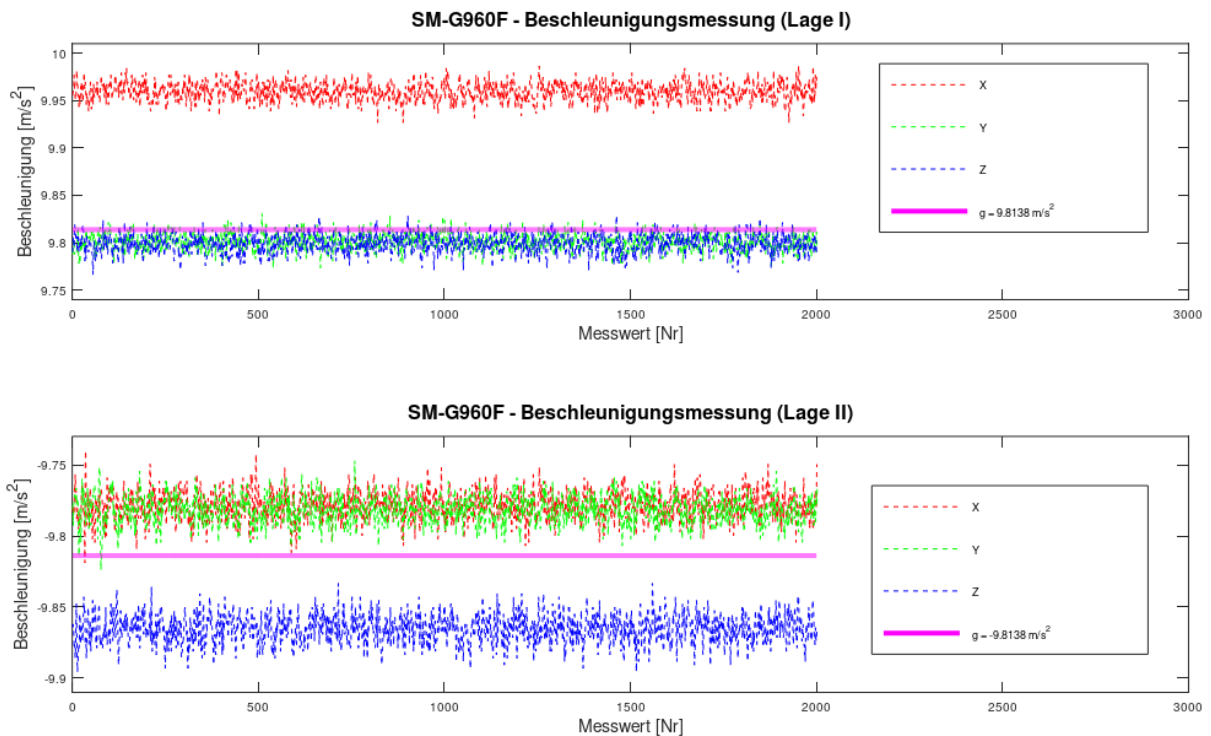


Abbildung 3-7: Darstellung der unkalibrierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert

Der Offset wird aus den berechneten Mittelwerten \bar{a}_I und \bar{a}_{II} der statischen Auswertefenster in zwei Lagen bestimmt:

$$Offset = \frac{\bar{a}_I + \bar{a}_{II}}{2}$$

Formel 3-3: Berechnung des Offsets aus Messung in zwei Lagen

Weiterhin berechnet sich der Maßstabsfaktor aus der Differenz der Mittelwerte \bar{a}_I und \bar{a}_{II} zur Referenzbeschleunigung (Schwerewert g):

$$Maßstab = \frac{2 * g}{(\bar{a}_I + \bar{a}_{II})}$$

Formel 3-4: Berechnung des Maßstabsfaktors aus Messung in zwei Lagen

Der Schwerewert g ist abhängig von der Breite und der Höhe über dem Referenzellipsoid. Für Deutschland kann dieser mit besser als 7 mgal aus regionalen Schwerefeldmodellen berechnet werden (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2022); die somit für den Ort der Messung abgerufene Schwere wird im Rahmen der Kalibrierung daher als fehlerfrei angenommen.

Nach dem Anbringen der Kalibrierparameter an die Messwerte sind die systematischen Abweichungen weitestgehend beseitigt und es bleibt nur noch das Grundrauschen des Beschleunigungssensors um den Referenzwert erkennbar:

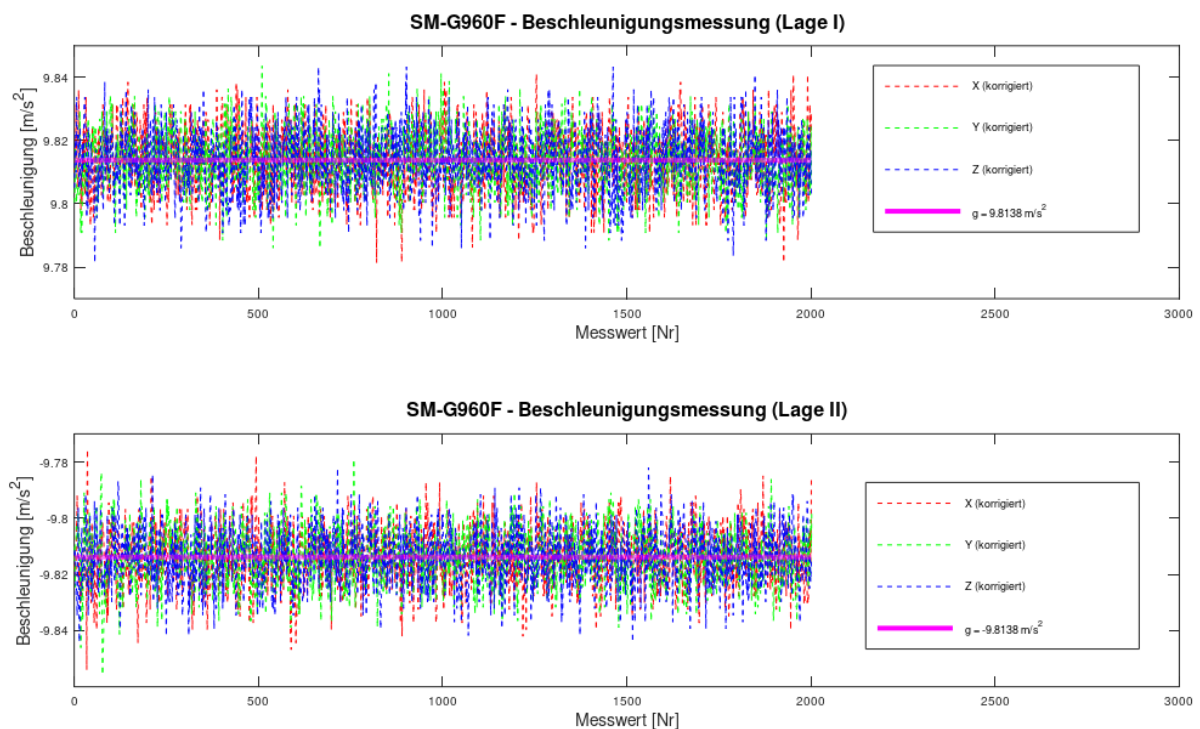


Abbildung 3-8: Darstellung der kalibrierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert

Um einen Eindruck über die Stabilität der Kalibrierparameter zu erhalten wurden mehrere Durchgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten und auch nach Neustart des Smartphones durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst:

Tabelle 3-4: Kalibrierparameter für Samsung S9

	X-Achse Offset [m/s ²] / Maßstab [-]	Y-Achse Offset [m/s ²] / Maßstab [-]	Z-Achse Offset [m/s ²] / Maßstab [-]
Messung 1 (t = 0 min)	0,09037 0,99442	0,00963 1,00228	-0,03312 0,99815
Messung 2 (t = 3 min)	0,09564 0,99374	0,00897 1,00232	-0,03642 0,99818
Messung 3 (t = 60 min)	0,08447 0,99551	0,00735 1,00211	-0,04337 0,99827
Messung 4 (t = 75 min + Neustart)	0,07341 0,99463	-0,02228 1,00245	-0,04410 0,99809
Messung 5 (t = 24 h + Neustart)	0,07774 0,99558	0,00541 1,00247	-0,04791 0,99825

Zusätzlich können anhand der empirischen Standardabweichungen aus den Einzelmessungen mittels Varianzfortpflanzung die Standardabweichungen der ermittelten Kalibrierparameter berechnet werden. Zur Übersicht sind diese gemeinsam mit den Werten aus Tabelle 3-4 in Abbildung 3-9 dargestellt:

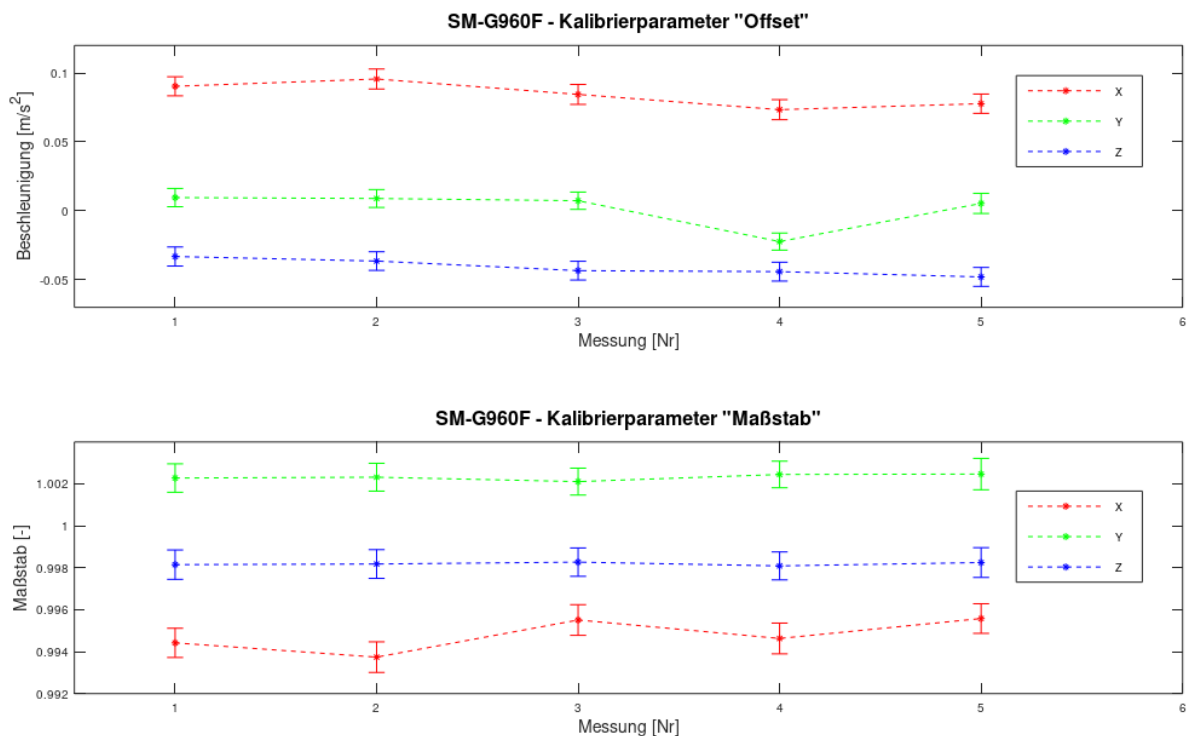


Abbildung 3-9: Kalibrierparameter für Samsung S9 mit Standardabweichungen

Über den Zeitraum von 24 Stunden und auch nach dem Neustart des Smartphones sind die ermittelten Kalibrierparameter als grob unveränderlich anzusehen. Der maximale Nullpunktfehler beträgt $-0,1 \text{ m/s}^2$ und liegt damit knapp über der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit. Da jedoch die Trendercheinungen im Rahmen der Auswertung beseitigt werden, ist eine direkte Berücksichtigung dieses Parameters nicht notwendig. Der Maßstabsfaktor weicht maximal um 0,6 % vom Wert 1 ab, sodass auch dieser im Rahmen der Relativauswertung vernachlässigt werden kann. Zudem wirken diese systematischen Fehler aufgrund der Bewegungscharakteristik während Schwingungsmessungen in beide Richtungen, sodass sie sich im Zeitverlauf weitestgehend eliminieren. Bei der Nutzung des Smartphones für andere Zwecke wie z.B. bei der Indoor-Navigation mithilfe der Sensorfusion von Beschleunigungs- und Drehratensensoren kann eine Berücksichtigung dieser Parameter je nach Genauigkeit des Systems jedoch notwendig werden (Willemsen, 2016).

3.2 Globale Satellitennavigationssysteme

Die Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) im Bereich der Geodäsie nahm den Anfang mit sehr kostenintensiven Messausrüstungen und konnte zunächst nur für Sonderanwendungen wirtschaftlich eingesetzt werden. Durch die Fortschritte in der Forschung, Entwicklung und Technik sind diese Technologien heute in fast allen Anwendungsbereichen der Ortung und Navigation anzutreffen. Die Anschaffungskosten für GNSS-Empfangsanlagen kommerzieller Hersteller liegen dabei noch immer im vier bis fünfstelligen Bereich; grundsätzlich ist die erforderliche Hardware auch schon für untere dreistellige Beträge zu erwerben. Diese kostengünstigen Empfänger können – eine sachgerechte Auswertung vorausgesetzt – ebenfalls die erforderlichen Genauigkeiten für Anwendungen im Bereich der Ingenieurgeodäsie erreichen und wurden schon eingehend evaluiert (Schnak, 2020). Die im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen zu globalen Satellitennavigationssystemen sowie der prinzipielle Aufbau des selbst konfigurierten kostengünstigen Messsystems sollen in diesem Abschnitt behandelt werden.

3.2.1 Grundlagen

Mit dem heutigen Entwicklungsstand sind vier Satellitennavigationssysteme global nutzbar: das amerikanische NAVSTAR-GPS, das russische GLONASS, das chinesische Beidou und das europäische Galileo. Die Positionsqualität dieser weltweit verfügbaren Systeme kann zudem mit unterstützenden satellitenbasierten Systemen (SBAS) oder regionalen Ergänzungssystemen verbessert werden.

Bei gemeinsamer Nutzung unterschiedlicher GNSS muss zunächst ein einheitliches Bezugssystem in der räumlichen und zeitlichen Dimension vorliegen. Dieses wird durch die Transformation in das erdfeste, globale 3D-Referenzsystem WGS84 und der hochgenauen Zeitdefinition durch Atomuhren in den Kontrollzentren mit bekannten Offsets zur internationalen Atomzeit gewährleistet.

Das Grundprinzip der absoluten Positionierung liegt in der Messung von Signallaufzeiten zwischen Satellit und Empfänger. Mit Kenntnis der Bahndaten und weiterer Korrekturen können aus den Laufzeiten der Codephasen die Pseudoentfernungen berechnet werden, dessen (zumeist überbestimmter) räumlicher Schnitt das Ergebnis der Positionslösung darstellt. Die Genauigkeit der Pseudoentfernungen ist durch die Wellenlänge der Signale im Dezimeterbereich limitiert, gemeinsam mit weiteren Restfehlern werden daher bei der absoluten Positionierung nur Genauigkeiten im Meterbereich erreicht. In der Geodäsie wird daher zusätzlich die Trägerphase der ausgesendeten Signale ausgewertet. Dabei wird die Phasenlagendifferenz Φ_m des empfangenen Satellitensignals Φ_{Sat} in Bezug zu einer im Empfänger erzeugten Referenzfrequenz Φ_{Ref} bestimmt. Mit dieser Differenz kann bei bekannter Wellenlänge die relative Entfernung mit Submillimetergenauigkeit zum mit dem Empfängeruhrfehler Δt_i behafteten Zeitpunkt T_i bestimmt werden:

$$\Phi_m(T_i + \Delta t_i) = \Phi_{Sat}(T_i + \Delta t_i) - \Phi_{Ref}(T_i) + N$$

Formel 3-5: Beobachtungsgleichung der Trägerphase (Bauer, 2018 S. 216)

Um die gesamte Entfernung zwischen Satellit und Empfänger zu bestimmen, muss neben dem Phasenreststück und den Nulldurchgängen im Zeitverlauf auch die Anzahl der ganzen Wellenlängen N bestimmt werden. Dieses als Trägerphasenanfangsmehrdeutigkeit bezeichnete Problem kann mithilfe unterschiedlicher Ansätze aufgelöst werden. Die früheste Methode beruht auf der Änderung der Satellitengeometrie bei langen Beobachtungszeiten, sodass durch eine Differenzbildung die Lösung des Gleichungssystems möglich ist. Weiterhin gibt es sogenannte geometriefreie Methoden, bei denen Code- und Trägerphasenbeobachtungen gemeinsam zu einer Mehrdeutigkeitslösung herangezogen werden. Aufgrund der großen Anzahl an heute verfügbaren Satelliten haben sich Verfahren auf der Grundlage von Suchalgorithmen durchgesetzt. Hierbei werden die möglichen Mehrdeutigkeiten durch Variation in einem Näherungsraum zunächst eingegrenzt und mittels statistischer Verfahren die korrekte Lösung fixiert. Darüber hinaus sind auch Kombinationen der genannten Methoden zur Lösung der Trägerphasenanfangsmehrdeutigkeiten möglich (Seeber, 2003 S. 275 f.). Die Mehrdeutigkeitsparameter sind nach der einmaligen Festsetzung für die Dauer der Messung gültig, nach einer Signalunterbrechung zum entsprechenden Satelliten („Cycle Slip“) müssen diese jedoch wieder neu ermittelt werden.

Die Positionierung mithilfe von künstlichen Satelliten setzt auf der Nutzerseite einen GNSS-Empfänger mit dazugehöriger Antenne sowie je nach Anwendungszweck eine spezialisierte

Auswertesoftware voraus. Das Antennenmodul muss dabei die sehr schwachen Satellitensignale bündeln, filtern und verstärken. Die so aufbereiteten elektromagnetischen Signale gelangen über ein geschirmtes Kabel in das Empfangsmodul. Hier werden die hochfrequenten Signale im Frontend zunächst herabgesetzt und digitalisiert. Anschließend werden im Basisbandrechner die Signale akquiriert und einzelnen Kanälen zugeteilt, sodass die weiteren Berechnungsschritte parallel ablaufen. Es erfolgt somit die Schätzung der Beobachtungsgrößen durch Korrelationsverfahren und der Nachführung dieser Signale mit einer „Tracking-Loop“. Das Ergebnis der Basisbandprozessierung sind die GNSS-Beobachtungsgrößen Zeit, Pseudoentfernung, Phasenmessung und Doppler-Frequenzverschiebung. Anschließend wird im Anwendungsrechner aus den Beobachtungsgrößen die Position, Zeit und Geschwindigkeit des Empfängers berechnet; je nach Empfängertyp werden auch die Rohdaten und weitere Ergebnisse zur Verfügung gestellt (Bauer, 2018).

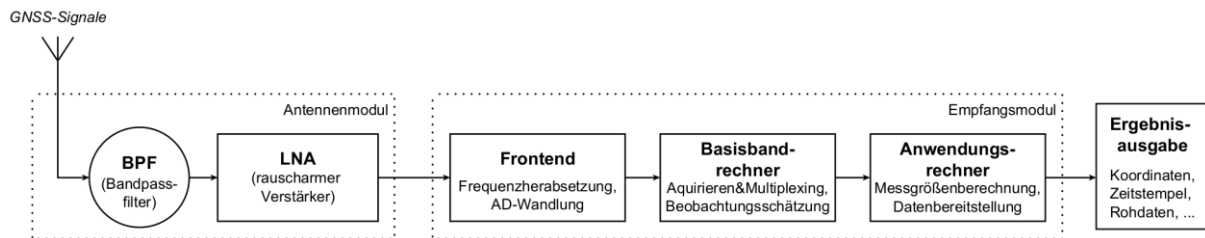


Abbildung 3-10: schematischer Aufbau eines GNSS-Empfängers (nach Bauer, 2018)

Für die Auswertung von GNSS-Trägerphasenmessungen zur Positionsbestimmung müssen umfangreiche Beobachtungsgleichungen und Mehrdeutigkeiten gelöst werden, wobei sich im Wesentlichen zwei Auswertekonzepte etabliert haben. Einerseits können in einer Ausgleichung alle systematischen Einflüsse (Satellitenbahnfehler, Uhrenkorrekturen, atmosphärische Einflüsse, ...) gemeinsam mit den unbekanntenen Koordinaten ermittelt werden, dieses Verfahren wird daher als Parameterschätzung bezeichnet. Jedoch ist aufgrund der umfangreichen Modellbildung und dem großen Rechenaufwand dieses Auswertekonzept oftmals nur in wissenschaftlichen Auswertesoftwaren vorzufinden (Seeber, 2003). Ein Sonderfall der Parameterschätzung ist die präzise Einzelpunktbestimmung („Precise Point Positioning“ - PPP) mit nur einem Empfänger; unter Verwendung präziser Korrekturmodelle für die systematischen Einflüsse können hierbei nach kurzen Konvergenzzeiten Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden.

Das zweite Auswertekonzept beruht auf einer Differenzbildung der auftretenden Fehlereinflüsse für Beobachtungen von mindestens zwei Empfängern zu gleichen Satelliten. Die systematischen Einflüsse können dann fast vollständig eliminiert bzw. müssen nur die zur Positionierung benötigten Parameter bestimmt werden. Das Ergebnis der Parametereliminierung sind Koordinatenunterschiede zwischen den Empfängern (Basislinienvektoren); für einen absoluten Bezug muss daher die Position einer der Empfänger im übergeordneten Referenzsystem bekannt sein. Bei den im praktischen Einsatz häufig vorliegenden kurzen Basislinien benötigt diese Methode aufgrund der vereinfachten

Modellierung nur verhältnismäßig wenig Rechenleistung, sie ist daher in den meisten Auswerteprogrammen implementiert.

Wie bei jedem Messverfahren sind auch bei Anwendung von GNSS zur Positionsbestimmung verschiedene Fehlereinflüsse zu beachten. So wirken die Laufzeitverzögerungen in der Ionosphäre und Troposphäre sowie fehlerhafte Bahndaten weitestgehend entfernungsabhängig; Sie können also bei kurzen Basislinien im Rahmen der Differenzbildung eliminiert oder zumindest durch standardisierte Korrekturmodelle und präzisen Ephemeriden weitestgehend vermindert werden.

Als weitestgehend unabhängig von der Basislinienlänge sind die stationsabhängigen Fehlereinflüsse zu benennen. So stellt die Antenne eines GNSS-Empfängers den eigentliche „Sensor“ des Messsystems dar, wobei das elektromagnetische Phasenzentrum den Bezugspunkt der Beobachtungsgrößen definiert. Für den Nutzer ist jedoch nur der Antennenreferenzpunkt direkt zugänglich, die frequenzabhängigen Phasenzentrumsoffsets (PCO) und -variationen (PCV) müssen daher bei höheren Genauigkeitsanforderungen unbedingt berücksichtigt werden. Für Antennenbaureihen kommerzieller Hersteller werden diese regelmäßig bestimmt und z.B. vom IGS veröffentlicht; weiterhin sind auch individuelle Feld- oder Laborkalibrierungen möglich.

Zudem hat auch die Umgebung der Antenne einen Einfluss auf den Signalempfang. An Flächen mit geringer Rauigkeit kann es zu einer Überlagerung von direkten und reflektierten Signalen entstehen (Fernfeld-Mehrwegeeffekte), sodass dem Empfänger ein fehlerhaftes Summensignal zugeführt wird. Diese Fehlereinflüsse ändern sich durch die Geometrieänderung zwischen Satellit, Empfänger und Reflektionsfläche mit fortschreitender Messzeit, sodass sie per Mittelbildung für statische Anwendungen oder mit speziellen Antennenbauformen reduziert werden können. Bei Hindernissen im Übergangsbereich der direkten Verbindung Satellit-Empfänger kann es weiterhin zum indirekten Empfang („non-line-of-sight“ - NLOS) kommen oder Signalbeugungen auftreten. Dadurch wird die Signallaufzeit aufgrund des zusätzlichen Weges verlängert, gleichzeitig tritt zumeist auch eine Dämpfung des Signals ein. Daher ist die Erkennung durch ein verändertes Signal-Rausch-Verhältnis im Bezug zum ungestörten Empfang möglich, sodass die entsprechenden Beobachtungen in der Auswertung mit einer geringeren Gewichtung berücksichtigt werden können.

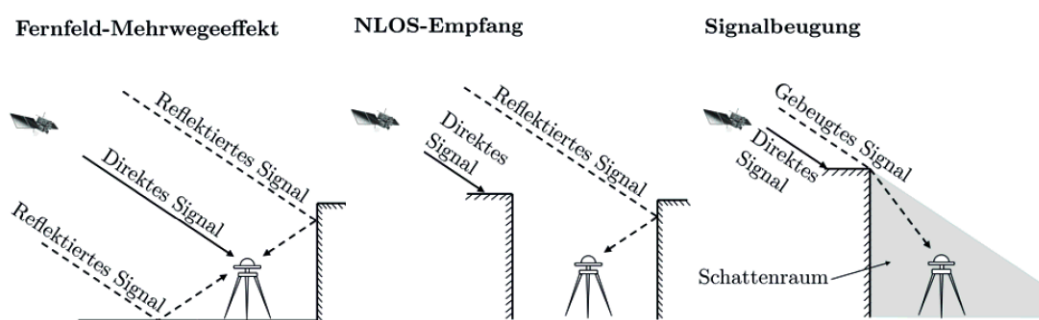


Abbildung 3-11: Stationsspezifische Fehlereinflüsse durch die Umgebung der GNSS-Antenne (Dreier, et al., 2021)

3.2.2 Messsystem

Im Rahmen dieser Arbeit wird preiswerte GNSS-Sensorik gemeinsam mit freier Software eingesetzt. Die erforderlichen Einzelkomponenten und das zusammengestellte Messsystem sollen in diesem Abschnitt näher beschrieben werden.

Der Einsatz von Einfrequenzempfängern zur Navigation und Anwendungen in der Geodäsie wurde schon vielfach erprobt und auch in kommerziellen Produkten eingesetzt. Mit der Einführung von kostengünstigen GNSS-Zweifrequenzmodulen wie dem ZED-F9P des Schweizer Herstellers u-blox im Jahr 2018 konnte das Anwendungsspektrum nochmals deutlich erweitert werden. So bietet dieser Chip neben der Ausgabe von Rohdaten einen integrierten RTK- und PPP-Modus und erlaubt diverse Navigationsberechnungen in Echtzeit, welche über vielfältige Schnittstellen zugänglich sind. Aus diesem Grund ist dieses Produkt im Bereich von professionellen Automotive-Anwendungen, der Steuerung von UAVs und auch schon bei Vermessungslösungen zu finden. Dabei können die vom Empfänger bereitgestellten Rohdaten mit denen kommerzieller Produkte durchaus mithalten und wurden auch für den Bereich der geodätischen Überwachungsmessungen erprobt (Schnak, 2020).

Die wesentlichen technischen Eigenschaften des Moduls sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst:

Tabelle 3-5: Technische Daten des u-blox ZED-F9P-04B (u-blox AG, 2021)

allgemeine GNSS-Eigenschaften	
Kanäle	184
unterstützte Systeme/Frequenzen	GPS: L1 C/A, L2C; GLONASS: L1OF, L2OF; Galileo: E1-B/C, E5b; Beidou: B1I, B2I; QZSS als SBAS
Signalakquirierung/Sensitivität	Kaltstart: 25-30 s, -148 dBm Warmstart: 2 s, -157 dBm Reakquirierung: 2 s, -160 dBm Tracking: -, -167 dBm
Rohdatenausgabe	Code-, Phasenmessung, Doppler; Rate: 15-25 Hz
Schnittstellen	2 x UART, 1 x USB, 1 x SPI, 1 x I ² C
Protokolle	NMEA, UBX binary, RTCM v. 3.3, SPARTN v. 2.0
Energieversorgung	2,7-3,6 V; 68 mA (bei 3 V)
Abmessungen	7,0 x 22,0 x 2,4 mm
integrierter RTK-Modus	
Initialisierungszeit	10-30 s
Genauigkeit (CEP)	horizontal: 10 mm + 1 ppm vertikal: 10 mm + 1 ppm
Ausgaberate	variabel, 8-20 Hz
integrierter PPP-Modus	
Konvergenzzeit	45-70 s
Genauigkeit (CEP)	horizontal: < 0,06 m (SPARTN); 0,04 m (CLAS) vertikal: < 0,12 m (SPARTN); 0,08 m (CLAS)
Ausgaberate	variabel, 8-20 Hz

Für die praktische Nutzung des GNSS-Empfangsmoduls ist weitere Peripherietechnik wie Energieversorgung, Antennenanschluss und weitere Schnittstellen notwendig. Um für den Großteil der Anwender weiteren Entwicklungsaufwand zu vermeiden, werden daher von verschiedenen Herstellern sogenannte „Application-Boards“ angeboten, welche die wesentlichen Funktionalitäten und Anschlüsse bereitstellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Boards von SparkFun (GPS-RTK2) und ArduSimple (simpleRTK2B) verwendet:

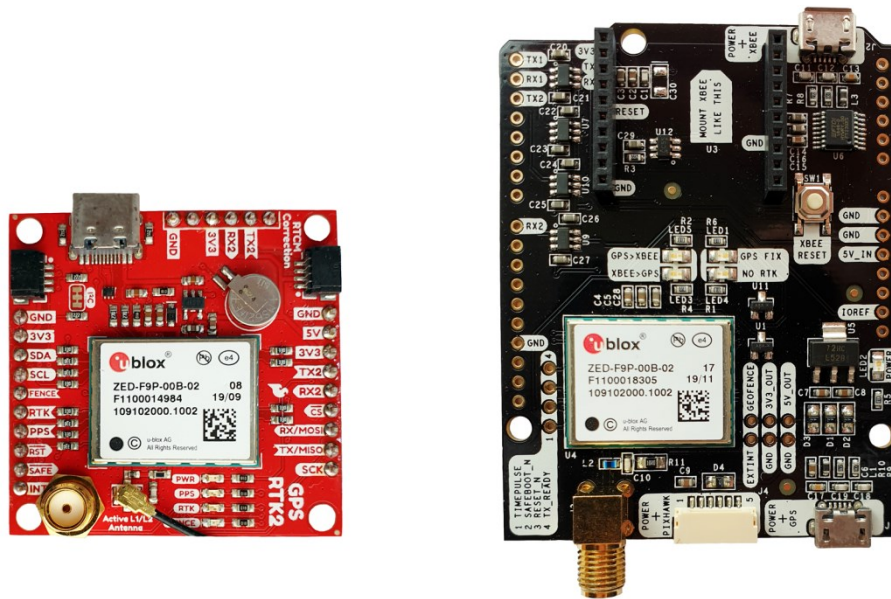
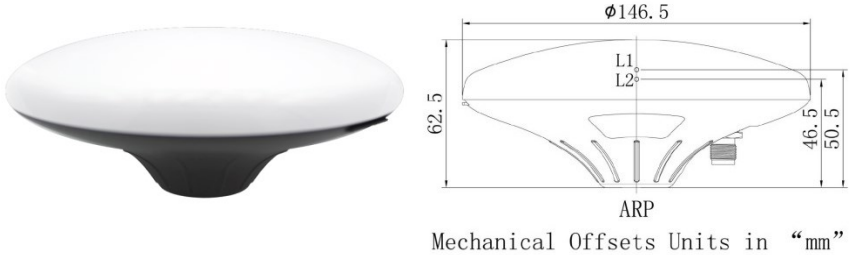


Abbildung 3-12: Empfängerboards „SparkFun GPS-RTK2“ und „ArduSimple simpleRTK2B“

Die zur präzisen Positionierung benötigten Rohdaten werden vom Empfängermodul in den Binärnachrichtentypen „UBX-RXM-RAWX“ („Multi-GNSS Raw Measurement Data“) und „UBX-RXM-SFRBX“ („Broadcast Navigation Data Subframe“) bereitgestellt. Vor der Nutzung des Application-Boards muss dieses daher entsprechend der Anwendung konfiguriert und die Ausgabe dieser Nachrichtentypen aktiviert werden. Dies kann z.B. mit der Herstellersoftware u-center erfolgen; die dazu notwendigen Einstellungsmöglichkeiten sind der Interface Description und dem Integration manual für den u-blox ZED-F9P zu entnehmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vorwiegend die Rohdaten aller unterstützten Satellitensysteme und Frequenzen mit der höchsten Messrate von 20 Hertz im .ubx-Protokoll benötigt. Nach erfolgreicher Konfiguration wird diese dauerhaft im Flashspeicher gesichert und ist auch nach Unterbrechung der Energieversorgung wieder verfügbar.

Für den Empfang der GNSS-Signale werden ebenfalls kostengünstige Antennen eingesetzt, da diese bereits im Rahmen von Voruntersuchungen für Relativmessungen als geeignet befunden wurden (Schnak, 2020). Der Anbieter ArduSimple vertreibt für diesen Zweck passend zu den Application-Boards diverse GNSS-Antennen asiatischer Hersteller, wobei die technischen Parameter der verwendeten Antennen nachfolgend zusammengefasst sind:

Tabelle 3-6: Technische Daten der verwendeten Antenne „AS-ANT2B-SUR“ (EPS Works, 2022)

ArduSimple simpleANT2B „Survey“	
Abbildung / Dimensionen	 <p style="text-align: center;">Mechanical Offsets Units in “mm”</p>
Frequenzen/ Bänder	GPS: L1, L2; GLO: G1, G2; GAL: E1, E2, E5b, E6; BDS: B1, B2, B3
LNA-Gewinn	40 dB
PCV	3 mm
Energie	3-5,5 V; 45 mA
IP-Schutzart	IP66
Gewicht	390 g
Temperaturbereich	-40 bis +85 °C
Preis	89 €

Das Softwarepaket RTKLIB wird seit 2006 von Tomoji Takasu entwickelt und unterliegt der freien „2-clause BSD“-Lizenz (aktuelle Version: 2.4.3 b34). Mit RTKLIB lassen sich GNSS-Signale aller Systeme sowohl in Echtzeit als auch im Postprocessing in unterschiedlichen Auswertemodi verarbeiten. Dabei sind neben Standarddatenprotokollen auch herstellereinspezifische Formate eingebunden; der Datenaustausch ist über serielle Schnittstellen, NTRIP, TCP/IP, FTP/HTTP oder als Datei möglich. Unter Windows lassen sich die Programmmodule kommandozeilenbasiert oder mit grafischer Benutzeroberfläche nutzen; weiterhin können die mit dem Quelltext verfügbaren Anwenderschnittstellen auch für Linux oder andere Systeme individuell kompiliert werden (Takasu , 2013).

Aufgrund des frei verfügbaren Quellcodes erfährt die Grundversion von Tomoji Takasu durch eine breite Entwickler-Community viele Weiterentwicklungen, welche kostenfrei im Internet bereitgestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine speziell für kostengünstige Zweifrequenzempfänger optimierte und verbesserte Version (demo5 b34f) von Tim Everett verwendet. Weiterhin kann sich jeder Anwender am Projekt beteiligen und den Quellcode an seine eigenen Bedürfnisse anpassen.

Das Programmpaket von RTKLIB setzt sich aus verschiedenen Modulen zusammen bietet eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten. Die Konfigurationsparameter sind ausführlich in der Dokumentation (Everett, 2022) sowie in (Schnak, 2020) beschrieben, sodass auf diese nur im Rahmen der Auswertung am praktischen Messobjekt genauer eingegangen wird.

Tabelle 3-7: Übersicht der RTKLIB-Programmmodule

Programmmodul GUI (CUI)	Symbol	Funktionsbeschreibung
RTKLAUNCH		Auswahlmenü für Programmmodule
RTKNAVI (RTKRCV)		Echtzeitpositionierung und Datenspeicherung
RTKPOST (RNX2RTKP)		Postprocessing von RINEX-Beobachtungsdateien
RTKPLOT		Darstellung von Beobachtungsdaten und Lösungen, auch verknüpft mit RTKNAVI und RTKPOST
RTKCONV (CONVBIN)		Konvertierung von Beobachtungsdaten in RINEX-Format
RTKGET		Download von Beobachtungs- und Zusatzdaten
STRSVR		Serveranwendung für Datenstreaming
SRCTBLBROWS		NTRIP-Browser

Aus den beschriebenen Hard- und Softwarekomponenten lässt sich sehr modular ein kostengünstiges GNSS-Messsystem zusammenstellen, auf welches nun näher eingegangen werden soll.

Am zu untersuchenden Messobjekt werden die kostengünstigen Antennen montiert anschließend mit dem auf Rohdatenausgabe konfigurierten u-blox ZED-F9P verbunden. Die Ansteuerung, Ein- und Ausgabe sowie die Energieversorgung erfolgt über den Anschluss an einen Windows-PC. Auf diesem werden im Modul RTKNAVI die seriellen Verbindungen vom Rover und der Basis zusammengeführt und jeweils in eine Datei für das Postprocessing abgespeichert. Weiterhin ist optional eine Echtzeitberechnung der verarbeiteten Daten möglich, welche sowohl mit RTKPLOT betrachtet als auch in eine Datei abgespeichert werden können.

Die vorwiegende Auswertung erfolgt im Postprocessing, da hier die Anpassung der Konfigurationsparameter besonders bei schwierigen Empfangsbedingungen unkompliziert möglich ist und zusätzlich Daten externer Referenzstationen verarbeitet werden können. Die binären Rohdaten müssen dafür zunächst mit dem Modul RTKCONV zu Beobachtungs- und Navigationsdaten im standardisierten RINEX-Format umgewandelt werden. Anschließend kann die Berechnung der Basislinien mit RTKCONV erfolgen, dessen Ergebnisse mit dem Modul RTKPLOT weiter analysiert werden können. Anschließend lassen sich die ausgegebenen Textdateien für weitere Auswertungen an GNU-Octave übergeben z.B. mit den Werkzeugen der Zeitreihenanalyse bearbeiten.

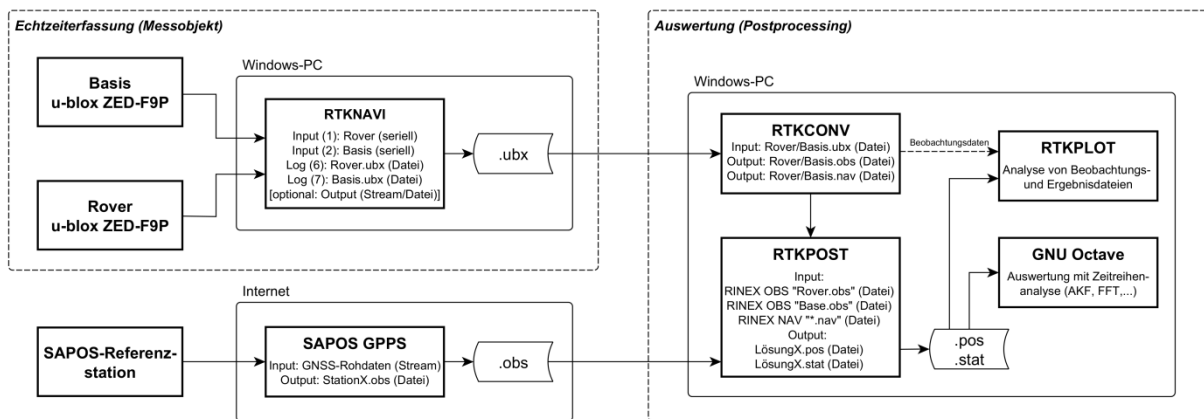


Abbildung 3-13: grundlegendes Konfigurationsschema des kostengünstigen GNSS-Messsystems

Dieses Schema lässt sich je nach Anforderung um mehrere Rover erweitern oder für andere Schnittstellen anpassen. Da die wesentlichen Softwarekomponenten auch unter Linux lauffähig sind, ist darüber hinaus der Aufbau autonomer Sensornetzwerke unter Verwendung kostengünstiger Hardware z.B. mit Einplatinencomputern wie dem Raspberry Pi grundsätzlich möglich.

3.2.3 Prüfverfahren

Vor dem Einsatz an realen Überwachungsobjekten soll das vorgestellte kostengünstige Messsystem auf seine Leistungsfähigkeit überprüft werden. Dazu werden zunächst die Phasenzentrumsoffsets kontrolliert und die Erfassung einer Deformation mit bekannter Frequenz und Amplitude getestet.

Kontrolle der angegebenen Phasenzentrumsoffsets:

Im Rahmen der relativen Auswertung können bei gleicher Antennenbauweise und kurzen Basislinien die Korrekturparameter für Phasenzentrumsoffsets und -variationen vernachlässigt werden, da sich deren Einfluss bei der Differenzbildung eliminiert. Im praktischen Einsatz lassen sich verschiedene Antennentypen jedoch nicht vermeiden, sodass eine Nichtberücksichtigung das Koordinatenergebnis systematisch verfälschen und die Mehrdeutigkeitslösung erheblich erschweren würde.

Die Korrekturparameter für die Phasenzentrumsoffsets der verwendeten kostengünstigen Antennen sind zunächst unbekannt, jedoch gibt ein Aufkleber auf der Unterseite diese Werte für das L1 und L2 Band an (siehe Tabelle 3-6). Mithilfe einer bekannten Basislinie lassen sich diese durch eine Residuenanalyse bzw. anhand der Koordinatenunterschiede näherungsweise validieren. Dazu wurde die Pfeilerstrecke auf dem Dach des Laborgebäudes zunächst terrestrisch bestimmt. Bei der anschließenden Prüfung befindet sich auf einem dieser Pfeiler eine Referenzantenne mit vorhandener Typkalibrierung (navXperience NAX3G+C), die zu prüfenden Antennen werden auf den Pfeilern daneben montiert. Nach 15 Minuten erfolgt eine Drehung der Prüflinge um 180°, um

zumindest grobe Azimutabhängigkeiten aufdecken zu können. Im Rahmen der Untersuchung konnten dabei für einen beschleunigten Kalibriervorgang gleichzeitig zwei Antennen geprüft werden:



Abbildung 3-14: Versuchsaufbau zur Kontrolle der Phasenzentrumsoffsets (2 x AS-ANT2B-SUR und 1 x NAX3G+C)

Die zuvor bestimmten Komponenten des Basislinienvektors werden bei dem Modul RTKPOST im „fixed“-Modus als fehlerfrei eingeführt die Residuen mit und ohne angebrachten PCO betrachtet. Ein Ausschnitt der Ergebnisse ist in Abbildung 3-15 dargestellt:

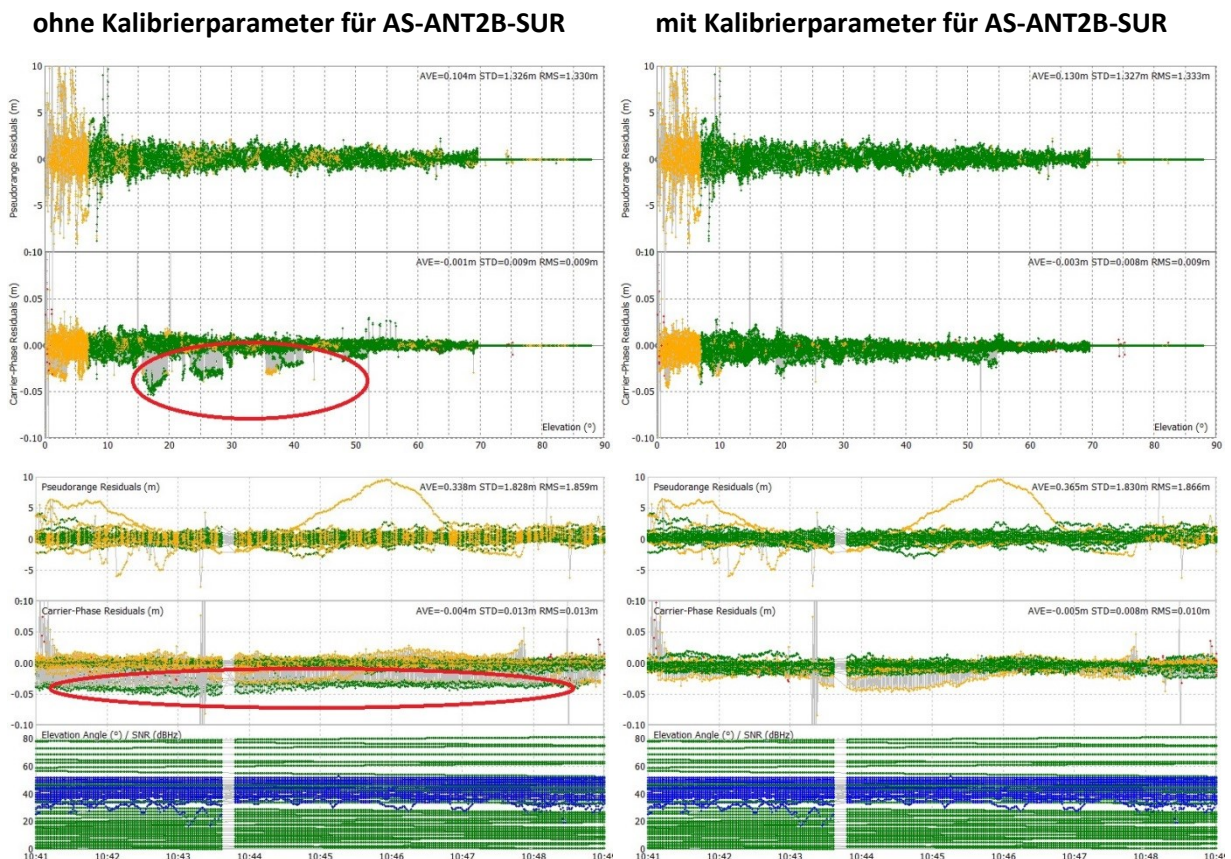


Abbildung 3-15: Residuen bei bekannter Basislinie mit und ohne Kalibrierparameter

Ohne Anwendung der Kalibrierparameter können die Mehrdeutigkeiten insgesamt nur schwer gelöst werden (nur 25 % der Positionslösungen im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Kalibrierung); der Betrag der Residuen liegt im Bereich der aufgedruckten Phasenzentrumsoffsets (rote Markierungen in Abbildung 3-15 links). Mit Einführung der Parameter werden die Mehrdeutigkeiten vollständig gelöst und die verbleibenden Residuen sind weitestgehend zufällig verteilt. Auch nach einer Drehung der Antennen lässt sich keine Richtungsabhängigkeit der Kalibrierparameter nachweisen. Die vorhandenen Phasenzentrumsvariationen können hingegen nur mit erheblichem Mehraufwand in relativen oder absoluten Feldverfahren oder in einer speziellen Antennenmesskammer bestimmt werden, sodass im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Herstellerangabe von 3 mm in Kauf genommen werden muss.

Versuchsmessung mit bekannter Deformation:

Die schon in (Köster, 2016) verwendete Testvorrichtung besitzt bauartbedingt einen konstanten Hub von 22 Millimetern, sodass dessen Sollamplitude 11 Millimeter beträgt. Durch eine Drehung der Vorrichtung um 15° gegen Gitternord wird diese wiederum auf 2,8 mm in der Ost- und 10,6 mm in der Nordkomponente aufgeteilt. Die Frequenz lässt sich dabei mittels eines Labornetzteils stufenlos bis 40 Hertz regeln. Während des Versuchs wird zusätzlich ein Video der Antenne mit gleichzeitiger Erfassung einer Funk-Digitaluhr aufgenommen, um anhand der ausgezählten Schwingungen die Bewegungsfrequenz im gewählten Zeitfenster zu bestimmen. Die lokale Basisstation befindet sich in der Entfernung von 0,7 Meter von der Ostseite des Dachaufbaus, der Rover ist auf der Testvorrichtung mit gleichem Abstand auf der Nordseite montiert. Zwischen beiden Antennen liegen somit rund 4 Meter, wobei die starken Abschattungen und glatten Oberflächen eine schwierige Lösung der Basislinie aufgrund der schlechten Empfangsbedingungen vermuten lässt:



Abbildung 3-16: Versuchsaufbau zur Erfassung von Deformationen unter schwierigen Empfangsbedingungen

Zusätzlich werden die Rohdaten der 50 Kilometer entfernten SAPOS-Referenzstation in Prenzlau herangezogen. Die Ergebnisse der Auswertung mit der lokalen Basis sind exemplarisch für das erste Zeitfenster in Abbildung 3-17 dargestellt:

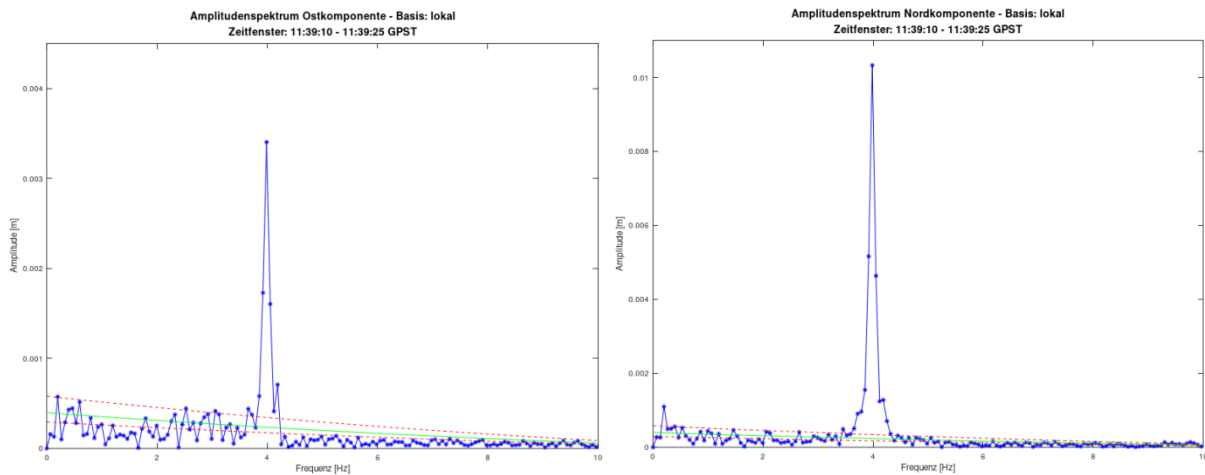


Abbildung 3-17: Amplitudenspektren der Ost- und Nordkomponenten über einen Zeitraum von 15 Sekunden

Das berechnete Amplitudenspektrum zeigt für beide Lagekomponenten signifikante Peaks bei der erwarteten Frequenz an. Auch die Auswertung auf Basis der externen SAPOS-Referenzstation bestätigen diese Ergebnisse sowohl in der Frequenz als auch in den Amplituden:

Tabelle 3-8: Zusammenstellung der Amplituden der Versuchsmessung

	Basis: lokale Referenz	Basis: SAPOS 0006
Zeitfenster 1 (11:34:00 - 11:34:15 GPST) ~ 25 Schwingungen (1,67 Hz)	E: 3,2 mm / 1,66 Hz N: 9,9 mm / 1,66 Hz EN = 10,4 mm	N: 2,0 mm / 1,66 Hz E: 9,4 mm / 1,66 Hz EN = 9,6 mm
Zeitfenster 2 (11:39:10 - 11:39:25 GPST) ~ 60 Schwingungen (4,00 Hz)	E: 3,4 mm / 3,99 Hz N: 10,3 mm / 3,99 Hz EN = 10,8 mm	N: 2,8 mm / 3,99 Hz E: 10,0 mm / 3,99 Hz EN = 10,4 mm

Wie aus der Tabelle 3-8 ersichtlich kann die Sollfrequenz in allen Auswertekombinationen nachgewiesen werden. Durch das kurze Auswertefenster von 15 Sekunden lassen sich die Frequenzen jedoch nur mit einer Auflösung von 0,067 Hertz darstellen, sodass die Amplituden durch den „Leck-Effekt“ beeinflusst sind. Dennoch beträgt die maximale Abweichung der Amplituden nur 1 mm im Bezug zu den Sollwerten, sodass dieses System grundsätzlich für die geplante Messaufgabe verwendbar sein sollte.

3.3 Totalstation

Ein klassisches terrestrisches Messverfahren zur Punktbestimmung in der Geodäsie stellt die Tachymetrie dar. Durch kombinierte Richtungs- und Streckenmessung können im lokalen Standpunktkoordinatensystem die Lage und Höhe des Zielpunktes polar bestimmt werden. Bei modernen Totalstationen sind dabei die Zielerfassung sowie die Ablesung und Reduktion der Messwerte digital möglich, sie lassen sich weiterhin zusätzlich mit einem Zeitstempel versehen. Aufgrund der hohen Qualität dieser professionellen Sensorsysteme soll dessen Einsatz zum Ergebnisvergleich der zuvor beschriebenen kostengünstigen IMU- und GNSS-Messsysteme dienen. Nachfolgend soll auf die technischen Grundlagen der verwendeten Instrumente eingegangen und die Besonderheiten bei der Auswertung mit den Mitteln der Zeitreihenanalyse betrachtet werden.

3.3.1 Tachymeter als Multisensorsystem

Bei modernen Tachymetern sind neben der Richtungs- und Streckenmessung an der Bestimmung von Koordinaten auch zusätzliche Beobachtungen wie Längs- und Querneigungskomponenten und ATR-Ablagen sowie eine Vielzahl interner Auswerteprozesse beteiligt, sodass diese Instrumente auch als „Totalstationen“ bezeichnet werden (Kleemaier, 2018). Mit der Kombination unterschiedlicher Subsysteme hat sich der klassische Einsatzbereich der manuellen Koordinatenbestimmung dieser Instrumente in den letzten Jahren deutlich erweitert. So ist aufgrund der Motorisierung, Prismensuche und der automatisierten Feinzielung in Verbindung mit einer Fernsteuerung der Einsatz als „Ein-Personen-Station“ möglich. Eine Weiterentwicklung stellt auch die Verwendung von Totalstationen im Bereich der kontinuierlichen Überwachungsmessungen z.B. durch die Integration in ein Sensornetzwerk dar. Darüber hinaus sind aufgrund neuer Entwicklungen wie der Integration von 3D-Laserscanning zur flächenhaften Objekterfassung, der Kombination mit GNSS-Empfängern und eine verbesserte automatisierte Zielerfassung (ATRplus) noch weitere Anwendungsmöglichkeiten denkbar.

Die notwendigen Messungen und der Datenfluss innerhalb einer Totalstation hin zum Ergebnis sind vollständig digitalisiert und daher für den Anwender nicht unmittelbar nachzuvollziehen. Sowohl die im Fernrohr verbauten Sensoren für die Distanzmessung und die Kamera der automatischen Feinzielung als auch die in der Alhidade verbauten Teilkreise und Neigungssensoren liefern die Messdaten nach Auslösung der Messung über das Anwendungsboard nicht kontinuierlich, sondern erst auf Abruf. Für ein vollständiges Messergebnis müssen die Uhren der einzelnen Subsysteme

daher sowohl untereinander als auch in Bezug zur übergeordneten instrumenteninternen Betriebssystemzeit synchronisiert werden:

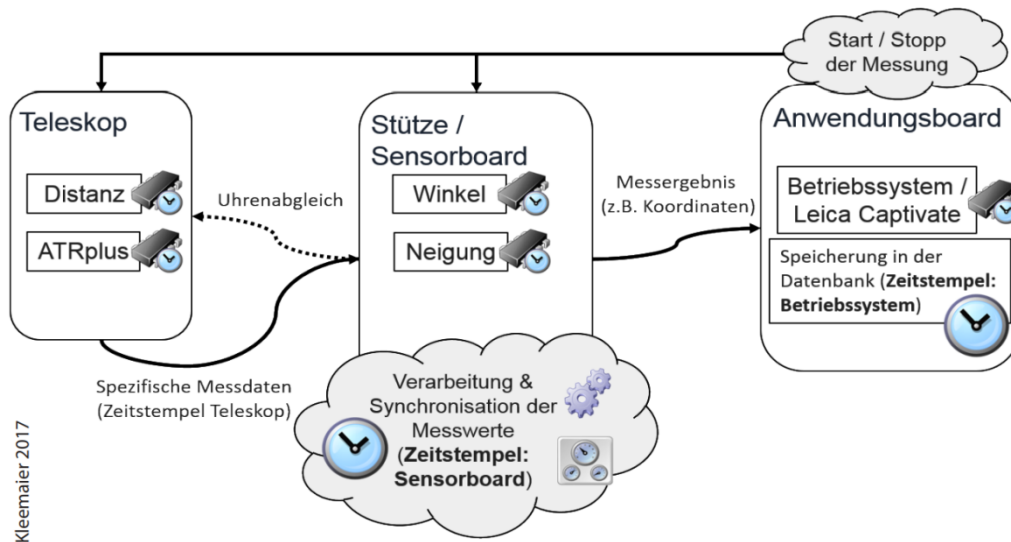


Abbildung 3-18: Schematischer Datenfluss in einer Leica Totalstation (Kleemaier, 2018)

Bei einer kontinuierlichen Messung im „Tracking“-Modus werden die einzelnen Subsysteme mit höchstmöglicher Messrate abgefragt, wobei aufgrund technischer Beschränkungen die Distanzmessung nur mit geringerer Abtastrate als die Winkel- oder Neigungsmessungen zur Verfügung steht. Je nach Geschwindigkeit des beobachteten Objekts kommt es im Ergebnis zu Positions- und Latenzfehlern, die insbesondere bei kinematischen Anwendungen berücksichtigt werden müssen. Der Instrumentenhersteller Leica Geosystems hat für diesen Zweck die EDM-Option „SynchroTrack“ (unter Viva „Dauer+“) geschaffen, wobei für eine Synchronisation die erfassten Winkel- und ATR- und Neigungswerte auf den Zeitpunkt der Distanzmessung interpoliert werden. Eine Weiterentwicklung besteht bei Instrumenten der neueren Generation (TS16, TS60/MS60) unter dem Betriebssystem Captivate mit ATRplus, wobei durch verbesserte Auswertelgorithmen die ATR- und Winkelmesswerte bis zu fünf Mal häufiger als bei bisherigem ATR für die Interpolation zur Verfügung stehen (Grimm, et al., 2015).

3.3.2 Instrumentenauswahl und Messdatenerfassung

Aufgrund der erwarteten relativ kleinen Bewegungsamplituden werden die an der Hochschule Neubrandenburg vorhandenen Präzisionstachymeter TS30 und TM30 des Herstellers Leica Geosystems als Referenzsensoren ausgewählt, diese haben sich auch schon bei vergleichbaren Messungen an der Marienkirche in Neubrandenburg bewährt (Köster, 2016). Die technischen Daten

der verwendeten Instrumente sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst, der wesentliche Unterschied betrifft lediglich die Angaben zur automatischen Feinzielung und den „Lock-Modus“:

Tabelle 3-9: Technische Daten der verwendeten Tachymeter (Leica Geosystems AG, 2011)

	Leica TS30 Nr. 361514	Leica TM30 Nr. 361084
Richtungsmessgenauigkeit allgemein mit ATR (Rundprisma)	0,5" / 0,15 mgon 1" / 0,3 mgon	0,5" / 0,15 mgon 1" / 0,3 mgon
Streckenmessgenauigkeit Standard-Modus Präzisions-Modus Tracking-Modus	1 mm + 1 ppm 0,6 mm + 1 ppm 3 mm + 1 ppm	1 mm + 1 ppm 0,6 mm + 1 ppm 3 mm + 1 ppm
Kompensator Genauigkeit Arbeitsbereich	0,5" / 0,15 mgon 4' / 0,07 gon	0,5" / 0,15 mgon 4' / 0,07 gon
Automatische Feinzielung und Vefolgung Basisgenauigkeit Maximale Entfernung (Rundprisma) Maximale Entfernung Lock-Modus (Rundprisma) Bildwiederholrate	1 mm 1000 800 37 Hz	1 mm 3000 - 29 Hz

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Messdaten nicht der instrumenteninternen Datenbank entnommen, sondern direkt über die GeoCOM-Schnittstelle auf einen Rechner übertragen. Die Funktionsweise dieser herstellereigenen Schnittstellenlösung ist in Abbildung 3-19 zusammengefasst:

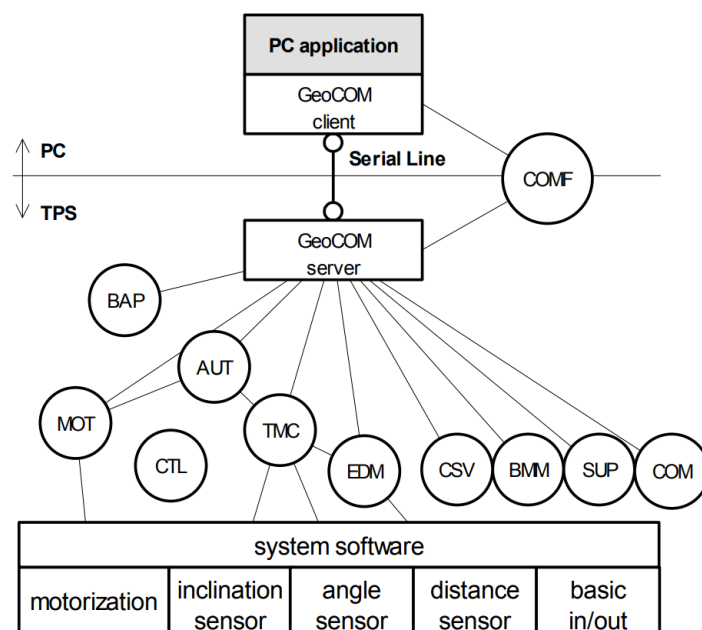


Abbildung 3-19: Systemarchitektur Leica GeoCOM (Leica Geosystems AG, 2006)

Das Instrument dient als „Server“ und ist dabei mit einem Computer („Client“) über eine serielle Schnittstelle verbunden. Es handelt sich um eine synchrone „Request-Response“-Kommunikation, bei der nach einer Client-Anfrage eine Antwort des Servers mit den angeforderten Daten erfolgt. Während dieses Prozesses können aufgrund der Synchronisierung keine weiteren Anfragen verarbeitet werden. Die Ansteuerung und Ausgabe der Ergebnisse via GeoCOM ist entweder über ein einfaches ASCII-Protokoll möglich oder kann über C++ bzw. VBA-Funktionen programmiert werden.

Mithilfe der systeminternen Software werden die im Instrument verbauten Richtungs-, Strecken- und Neigungssensoren sowie die Motorisierung organisiert und angesteuert. Der GeoCOM-Server greift über verschiedene Subsysteme auf die in einzelnen Funktionsgruppen (z.B. „MOT“ = Motorisierung, „TMC“ = Theodolitmesswerte, „EDM“ = Distanzmesswerte) aufgegliederten Messdaten zu und leitet die angeforderten Daten zum verbundenen Client weiter.

Für die Auswertungen wird im Wesentlichen das TMC-Subsystem zum Erhalt der Richtungs- und Neigungsmesswerte verwendet, da diese messtechnisch unabhängig von den Distanzmessungen sind und daher mit einer höheren Abtastrate zur Verfügung stehen. Diese Werte können mit dem Aufruf der GeoCOM-Messfunktion „TMC_GetAngle1“ erhalten werden:

Tabelle 3-10: Parameter für In- und Output der Messfunktion "TMC_GetAngle1" (Leica Geosystems AG, 2006)

ASCII-Request (Input)	ASCII-Response (Output)
%R1Q,2003 : Mode	%R1P,0,0 : RC, Hz, V, AngleAccuracy, AngleTime, CrossIncline, LengthIncline, AccuracyIncline, InclineTime, FaceDef
Erläuterungen zu In- und Output-Parametern:	
<i>Mode</i> : Modus der Neigungsmessung 0 = „TMC_MEA_INC“: Die Neigungskomponenten werden für jeden Zeitpunkt gemessen (langsamer als Berechnung in Bezug zur Ebene) 1 = „TMC_AUTO_INC“: Das Instrument wählt den Modus eigenständig 2 = „TMC_PLANE_INC“: Die Neigungskomponenten werden in Bezug auf eine Ebene berechnet (schneller als Messung, Instrument darf nicht bewegt werden)	<i>RC</i> : Return-code (0 = erfolgreiche Messung)
	<i>Hz, V</i> : Messwerte der Horizontal- und Vertikalteilkreise [rad]
	<i>CrossIncline, LengthIncline</i> : Quer- und Längskomponenten der Neigungsmessung [rad]
	<i>AngleAccuracy, AccuracyIncline</i> : a-priori-Genauigkeit der Richtungs und Neigungsmessung [rad]
	<i>AngleTime, InclineTime</i> : Zeitstempel der Richtungs- und Neigungsmessung [msec]
	<i>FaceDef</i> : Angabe Fernrohrlage (0 = Lage I, 1 = Lage II)

Während der Messung ist die Totalstation an der vorhandenen LEMO-Steckverbindung mit einem Kabel (Leica GEV220) über einen Seriell-USB-Wandler mit einem PC verbunden. Dabei müssen im Instrument die GeoCOM-Schnittstelle aktiviert sein und die RS232-Kommunikationsparameter (Baudrate, Parität, Databits, ...) am Sender und Empfänger gleich konfiguriert werden. Über ein

Terminalprogramm lassen sich anschließend direkt Befehle senden und Antworten empfangen. Eine weitere Möglichkeit ist die serielle Ansteuerung zur Dauermessung per Schleife z.B. mit dem instrument-control-Package von GNU Octave oder der pySerial-Bibliothek in Python. Besonders vorteilhaft zeigt sich die Verwendung eines Python-Programms, da diese Programmiersprache sowohl auf Notebooks als auch auf Einplatinencomputern wie dem Raspberry Pi einsetzbar ist. Nach erfolgreicher Konfiguration des Systems ist damit auch die autonome Durchführung von Messungen möglich; es wird lediglich eine Energieversorgung für den Raspberry Pi benötigt.

3.3.3 Untersuchung der Abtastrate und Äquidistanz

Um einen Überblick zur Genauigkeit und Qualität der Daten bei der Anwendung einer Totalstation als Richtungs- oder Neigungssensor zu erhalten, werden Versuchsmessungen unter Laborbedingungen durchgeführt. Dafür wird ein Leica TM30 auf einem Pfeiler platziert, mit der Dosenlibelle horizontalisiert und seriell mit einem PC verbunden. Die Ansteuerung und das Auslesen der Rohdaten erfolgt über ein Pythonprogramm, die Messwerte stehen daher mit einer höchstmöglichen Abtastrate von etwa 20 Hertz zur Verfügung. In Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 sind die Ergebnisse der Richtungs- bzw. Neigungsmessungen mit den dazugehörigen a-priori-Genauigkeiten für einen Zeitraum von 100 Sekunden dargestellt:

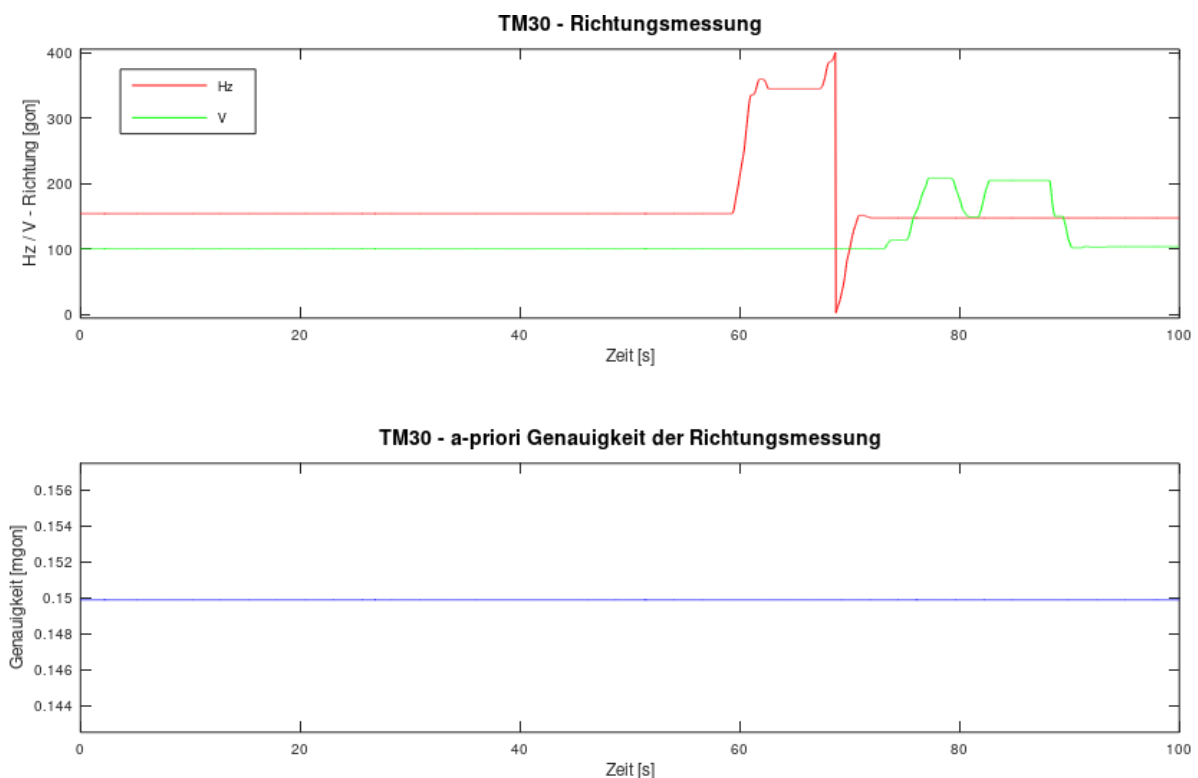


Abbildung 3-20: Richtungsmessung mit Leica TM30

Nach etwa 60 Sekunden wurde die Totalstation zirka 400 Gon manuell um die Stehachse gedreht, anschließend erfolgte eine Kippung und Hebung des Fernrohrs um etwa 100 Gon. Die per GeoCOM ausgelesene a-priori-Genauigkeit für die Richtungsmessung entspricht dabei während der gesamten Versuchsmessung der Herstellerangabe von 0,15 mgon.

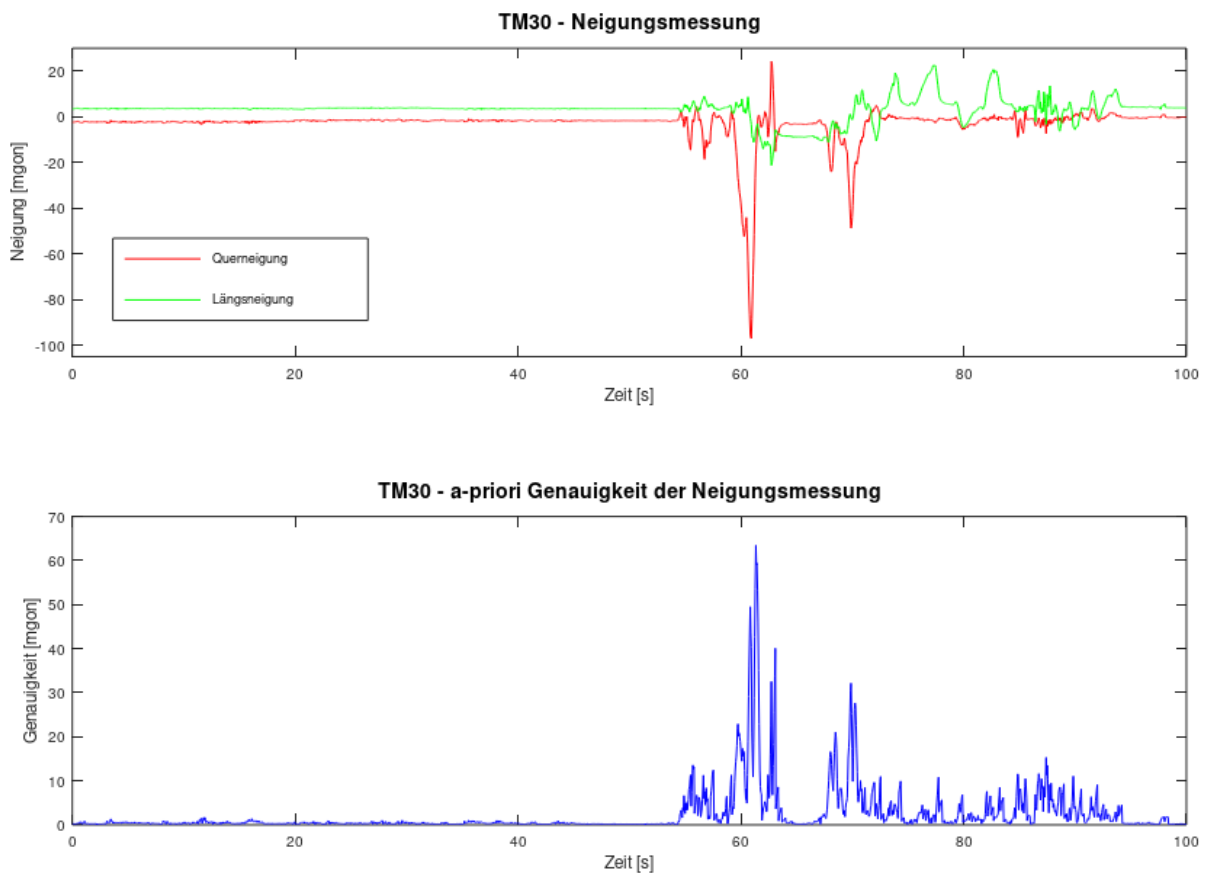


Abbildung 3-21: Neigungsmessung mit Leica TM30

Bei der Neigungsmessung zeigt ein ähnliches Bild wie bei der Richtungsmessung. Während der Drehung der Totalstation neigt sich die Totalstation scheinbar um bis zu 0,1 Gon; gleichzeitig wird die a-priori-Genauigkeit mit 65 mgon während der Bewegung angegeben. Beim verbauten Neigungssensor handelt es sich jedoch um einen flüssigkeitsgefüllten Kompensator, sodass die gemessenen Werte aufgrund der Beschleunigung während der Drehung erfahrungsgemäß zu groß ermittelt werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass auch in der Ruhemessung Änderungen in den a-priori-Genauigkeiten und den Neigungswerten messbar sind. Diese lassen sich wahrscheinlich auf externe Erschütterungen wie dem Straßenverkehr auf der Bundesstraße neben dem Laborgebäude sowie der Konstruktionsweise der Pfeiler in Verbindung mit dem Fußboden zurückführen.

Beim Plot der Abtastrate im Zeitverlauf zeigen sich geringfügige Unterschiede zwischen der Neigungs- und Richtungsmessung. So ist aus Abbildung 3-22 ersichtlich, dass die Rate der Neigungsmessung zwischen 18 und 22 Hertz schwankt, wohingegen sich bei der Richtungsmessung die Bandbreite nur zwischen 19,5 und 20,5 Hertz bewegt. Darüber hinaus treten unregelmäßige

Schwankungen der Zeitstempel beider Sensoren auf, bei denen für einen kurzen Zeitraum weniger Epochen nur eine Abtastrate von 10 Hertz erreicht wird:

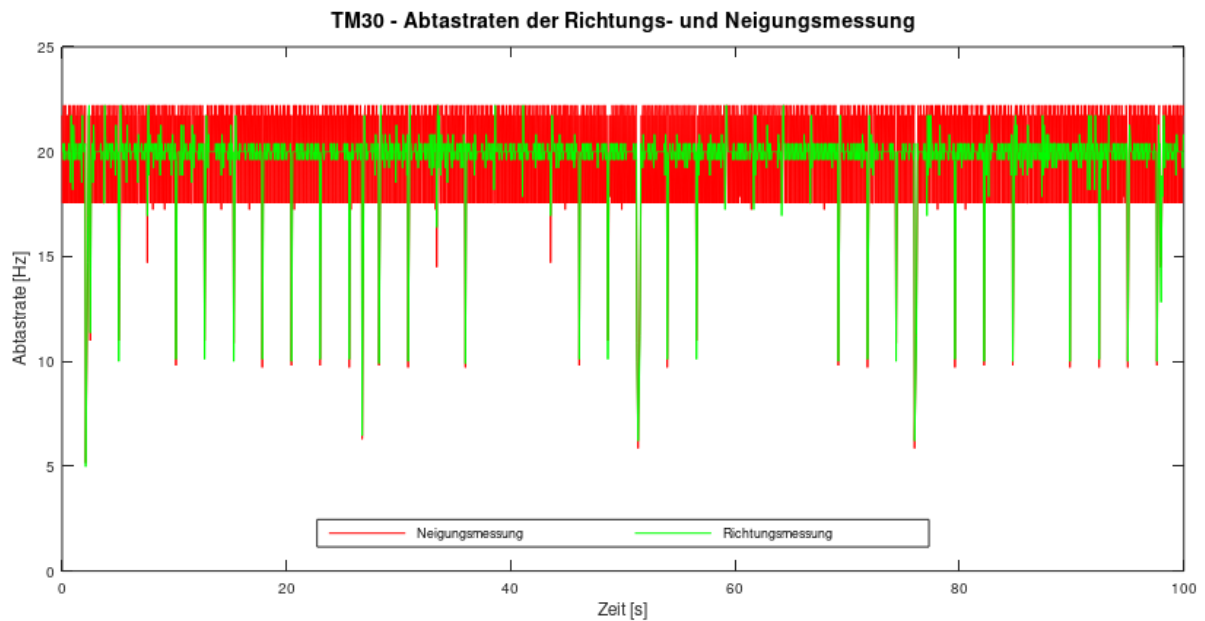


Abbildung 3-22: Vergleich der Abtastraten von Richtungs- und Neigungsmessung

Die Differenz zwischen den Zeitstempeln der Richtungs- und Neigungsmessung zeigen hingegen keine Ausreißer. Im Mittel findet die Richtungsmessung um etwa 0,002 Sekunden früher als die Neigungsmessung statt; sie kann jedoch auch um bis zu 0,005 Sekunden davon abweichen:

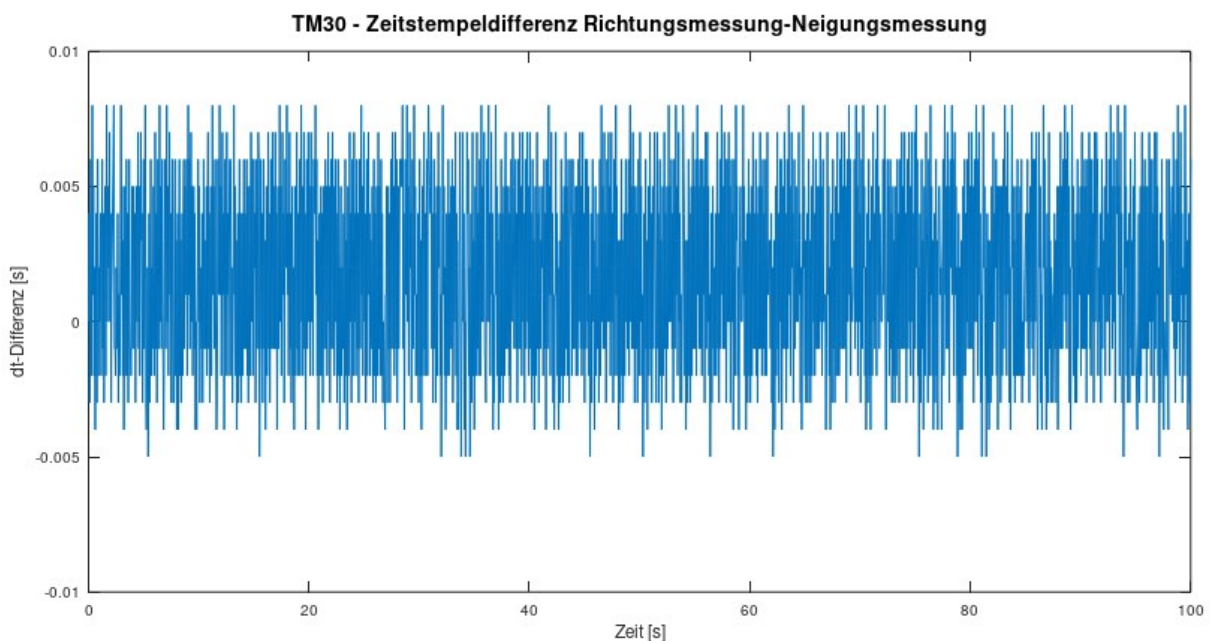


Abbildung 3-23: Zeitdifferenz zwischen Richtungsmessung- und Neigungsmessung

Eine Darstellung der Zeitdifferenzen zwischen der Richtungs- und Neigungsmessung und der Empfangszeit am Client unter Python („Systemzeit“) zeigt, dass diese Ausreißer mit den Zeitstempeln des Rechners korrelieren (siehe Abbildung 3-24). Diese Latenzzeiten werden vermutlich durch den

verwendeten Seriell-USB-Wandler in Verbindung mit dem Rechner und der seriellen Ansteuerung verursacht; die genaue Ursache konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

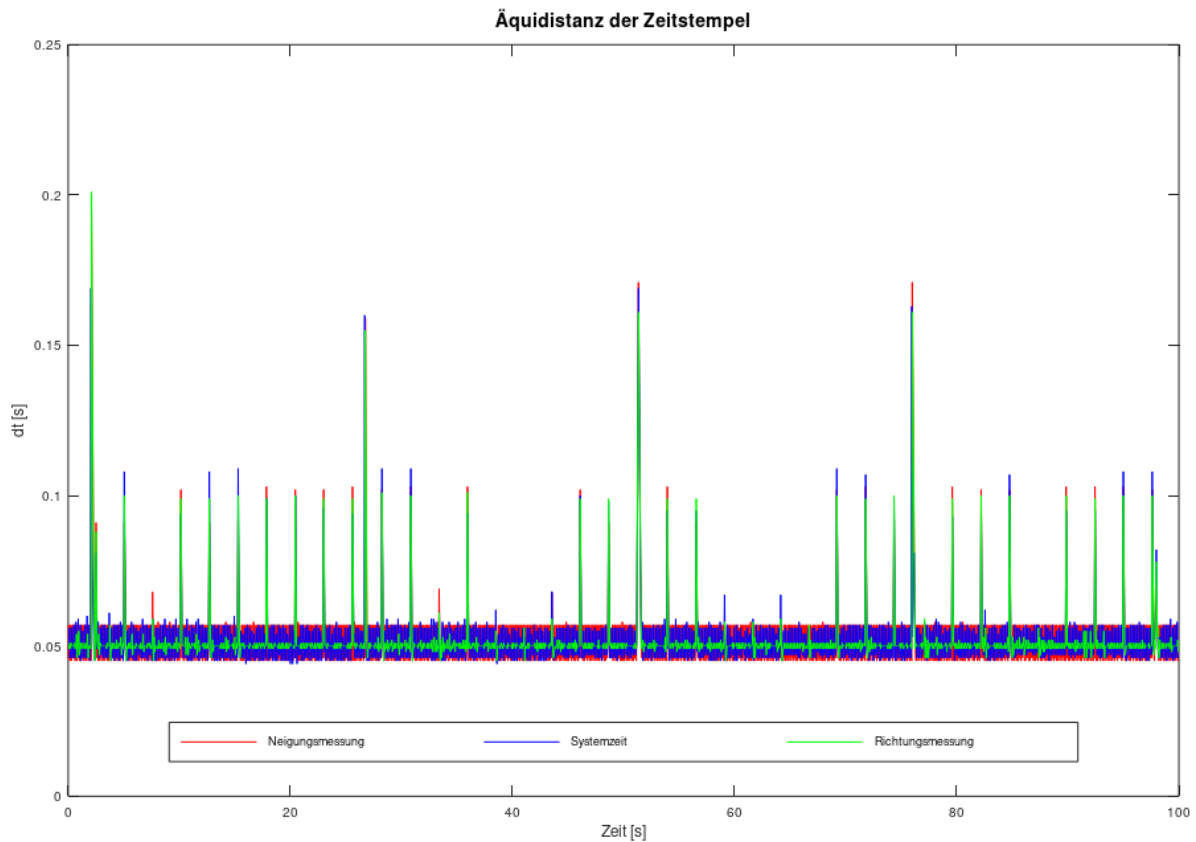


Abbildung 3-24: Äquidistanz der Zeitstempel im TM30

Für den geplanten Anwendungsfall, per Richtung- und Neigungsmessung Schwingungen mit Frequenzen bis etwa 5 Hertz aufzudecken, können diese Abweichungen jedoch vernachlässigt werden. In der Auswertung wird wie auch bei den Beschleunigungssensoren für die mittlere Abtastrate der Median verwendet, sodass mögliche Ausreißer nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis bewirken.

4 Anwendung: Glockengeläut der St. Petri-Kirche Altentreptow

Die Anwendung der zuvor beschriebenen Messsysteme soll anhand von praktischen Überwachungsobjekten evaluiert werden. Aufgrund der bisherigen öffentlichkeitswirksamen Untersuchungen an der Marienkirche in Neubrandenburg hat sich die Kirchengemeinde Altentreptow angeboten auch an eigenen St. Petri-Kirche Messungen durchzuführen. Während des Glockenläutens kommt es hier auf dem Turm ebenfalls zu spürbaren Bewegungen, welche bisher jedoch nur im geringen Umfang untersucht wurden (Köster, 2018). Aufgrund der grundständigen Sanierung des Turmes in den Jahren 2015 bis 2019 ist darüber hinaus eine sehr gute Zugänglichkeit gewährleistet und eine verhältnismäßig einfache Anbringung der Sensoren für die Untersuchungen möglich, sodass dieser ein günstiges Objekt für die Vergleichsmessungen darstellt.

4.1 Übersicht zum Messobjekt

Bei dem Messobjekt handelt es sich um den Kirchturm der St. Petri-Kirche in der Kleinstadt Altentreptow im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern. Neben seiner bau- und kulturhistorischen Bedeutung stellt dieser ein wichtiges Identifikationsmerkmal für die Bevölkerung in der Region dar. Mögliche Bauwerksschäden sind daher nicht nur im Sinne des Denkmalschutzes sondern auch zur Sicherheit der Besucher unbedingt zu vermeiden, wozu eine geodätische Überwachungsmessung ihren Beitrag leisten kann. Nachfolgend soll ein kurzer Abriss über die Geschichte des Gebäudes sowie dem historischen Geläut dargestellt werden.

4.1.1 Geschichte

Die christliche Kirchengemeinde in Altentreptow wurde um 1175 unter königlichem Patronat erstmals erwähnt. Nach schriftlichen Überlieferungen gab es dieser Zeit nur einen Kirchbau aus Holz, an dessen Stelle ab dem 13. Jahrhundert in mehreren Bauabschnitten eine Pfarrkirche im gotischen Stil errichtet wurde. Die dreischiffige Backsteinbauweise mit Kreuzgewölbe und einem quadratischen Turm an der Westseite ist ein typisches Merkmal für die Kirchenbauwerke im vorpommerschen Raum der damaligen Zeit (Lemcke, 1898). Auch die Schmuckelemente wie Friese und Portale wurden vielfach mit diesem Material gestaltet:

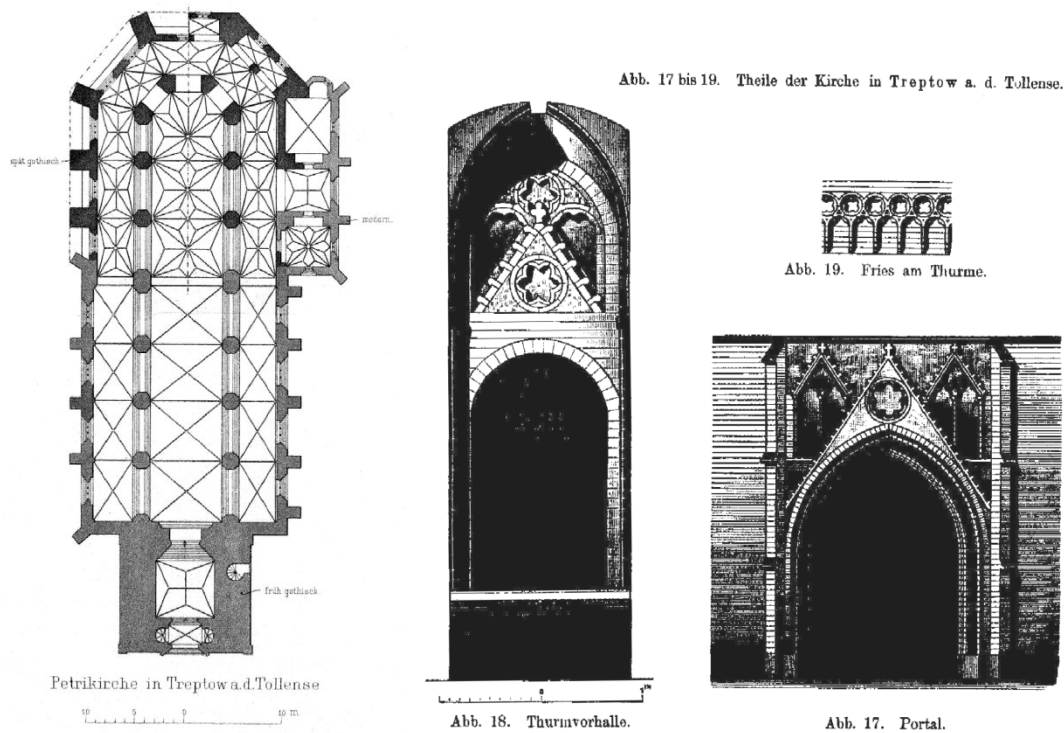


Abbildung 4-1: Grundriss der St. Petri-Kirche und architektonische Details (Lutsch, 1889)

Die Errichtung der Kirche wurde in der Mitte des 15. Jahrhunderts mit dem Turmbau vollendet. Ursprünglich besaß dieser einen spitzen Helm mit einer Gesamthöhe von über 90 Metern mit vier kleineren Ecktürmen. Aufgrund von Schäden durch Blitzschlag und Sturm musste dieser mehrfach erneuert werden; seine heutige Form mit achteckigem Holzaufsatz in barocker Bauweise und einer Gesamthöhe von 65 Metern erhielt der Turm um 1773. In den Jahren 1863 bis 1865 erfolgen umfangreiche Sanierungsarbeiten im Innenraum der Kirche durch den preußischen Baumeister Friedrich August Stüler. Dabei wurde auch die Grüneberg-Orgel von 1812 umgebaut und erweitert. Ab 1981 wurden weitere Arbeiten an der Dachkonstruktion des Kirchenschiffs, dem Gewölbe sowie den historischen Fenstern mit den kunstvollen Glasmalereien ausgeführt. Zuletzt lag die Aufmerksamkeit in der grundständigen Sanierung des Kirchturmes, da insbesondere im Bereich der Fußpunkte am Turmhelm erhebliche Schäden aufgrund eingedrungener Feuchtigkeit aufgetreten waren. Nur dank zahlreicher Spenden und staatlicher Fördermittel konnten die Sanierungsarbeiten 2019 nach 38 Jahren erfolgreich abgeschlossen werden.

4.1.2 Deformationen während des Glockenläutens

Wie in der Marienkirche in Neubrandenburg sind auch an der St. Petri-Kirche während des Glockenläutens deutliche Schwingungen spürbar. Im Vergleich zur neu ausgebauten Konzertkirche ist der Turm in Altentreptow jedoch weitestgehend in seiner historischen Substanz erhalten geblieben.

Zudem ist das vorhandene Geläut erheblich schwerer als in Neubrandenburg, sodass mögliche Deformationen andere Auswirkungen auf die Struktur haben können. Auf die Geschichte und Besonderheiten der Altentrepower Glocken und den daraus entstehenden Belastungen auf das Bauwerk wird in diesem Abschnitt näher eingegangen.

Das Geläut in Altentrepow setzt sich heute aus insgesamt drei Glocken zusammen, zwei weitere wurden leider im Verlauf des ersten Weltkrieges zur Rohstoffgewinnung eingeschmolzen. Die noch erhaltenen Glocken wurden 1431 bzw. 1455 durch die Monkehagen-Werkstatt aus der Nähe von Rostock gegossen und im Zuge des Turmbaus in den noch heute verwendeten Glockenstuhl aus Eichenholz eingebaut. Hier befindet sich auf der Westseite die im Jahre 1431 gegossene „Große Glocke“, welche mit ihrem Gewicht von rund 4,5 Tonnen zugleich die schwerste Glocke im Geläut darstellt. Gemeinsam mit der auf der Ostseite hängenden Apostelglocke von 1451 mit 2,5 Tonnen Gewicht ist sie ein bedeutendes Zeugnis der mittelalterlichen Glockenkunst, da durch die massive Gussform ein hervorragendes Klangbild mit überregionaler Bekanntheit erreicht wird. Zwischen diesen beiden historischen Glocken befindet sich die Sonntagsglocke. Sie wurde ursprünglich ebenfalls 1431 gegossen; im Laufe der Zeit verschlechterte sich das Klangbild jedoch deutlich, sodass sie 1929 vom Turm abgehängt und in der Altentrepower St. Jürgen-Kapelle weiterverwendet wurde. Da die historische Sonntagsglocke in der Kapelle zersprang, wurden die Bruchstücke 1958 zu ihrer heutigen Gestalt mit einer Masse von 770 Kilogramm umgegossen und wieder in der St. Petri-Kirche verwendet. Mit deren Einbau erfolgte zudem das Umhängen aller Glocken an tiefverkröpfte Stahljoche, wobei jedoch deutliche Einbußen im Klangbild und eine erhöhte Sprunggefahr auftraten. Erst mit dem zurückhängen in gerade Holzjoche im Jahr 1996 darf das Geläut wieder in seiner ursprünglichen Vielfalt erklingen.

Die technischen Parameter der Glocken in der St. Petri-Kirche sind in Tabelle 4-1 dargestellt:

Tabelle 4-1: Technische Parameter der Glocken in der St. Petri-Kirche (Peter, 2013)

	Große Glocke	Apostelglocke	Sonntagsglocke
Gussjahr	1431	1455	1958
Gießer	Monkehagen-Werkstatt	Monkehagen-Werkstatt	Schilling, Apolda
Durchmesser	1.786 mm	1.473 mm	1.040 mm
Schlagringstärke	143 mm	110 mm	63 mm
Gewicht	~ 4.500 kg	~ 2.500 kg	770 kg
Schlagton	cis ¹ +3 (277 Hz)	d ¹ ±0 (290 Hz)	fis ¹ +2 (368 Hz)
Schläge / min	~ 45	~ 49	~ 55
Schwingfrequenz (Köster, 2018)	0,374 Hz	0,408 Hz	0,462 Hz

In Abbildung 4-2 sind die Große Glocke, die Sonntagsglocke und die Apostelglocke (von links nach rechts) im historischen Glockenstuhl dargestellt:



Abbildung 4-2: Geläut in der St. Petri-Kirche Altentreptow

Die Schwingung einer Glocke verursacht Reaktionskräfte auf den Glockenstuhl, die auf den gesamten Turm übertragen werden. Die vertikalen Anteile dieser Kräfte sind aufgrund der massiven Bauweise von Kirchtürmen zumeist sehr gering und können daher oftmals vernachlässigt werden, wohingegen die horizontalen Lastanteile erhebliche Deformationen verursachen können. Die Horizontal- und Vertikalkomponenten der durch Glockenschwingungen bewirkten Erregerkräfte lassen sich entsprechend Formel 4-1 berechnen:

$$H(t) = \sum_i H_i(t) = c * G * \sum_i \beta_i^h * \sin(\Omega_i * t), \quad i = 1, 3, 5, \dots$$

$$V(t) = \sum_i V_i(t) = c * G * \sum_i \beta_i^v * \cos(\Omega_i * t), \quad i = 2, 4, 6, \dots$$

Formel 4-1: Berechnung der Horizontalkraft einer schwingenden Glocke nach DIN 4178

Die resultierende Lastschwingung setzt sich aus i harmonischen Teilschwingungen zusammen, wobei in der horizontalen Komponente nur ungerade und in der vertikalen nur gerade Harmonische auftreten. In der Formel 4-1 beschreiben β_i^h und β_i^v die vom Lätewinkel abhängige, bezogene Amplitude der horizontalen bzw. vertikalen Erregerkraft in der i -ten Teilschwingung; zudem sind das Gewicht G der Glocke inklusive Joch und ein individueller Glockenformbeiwert c von Bedeutung. Das im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend betrachtete, aus zusammengesetzten Teilschwingungen bestehende horizontale Lastspiel einer Glocke während zwei Anschlägen (bzw. einer gesamten Schwingung) ist schematisch in Abbildung 4-3 dargestellt:

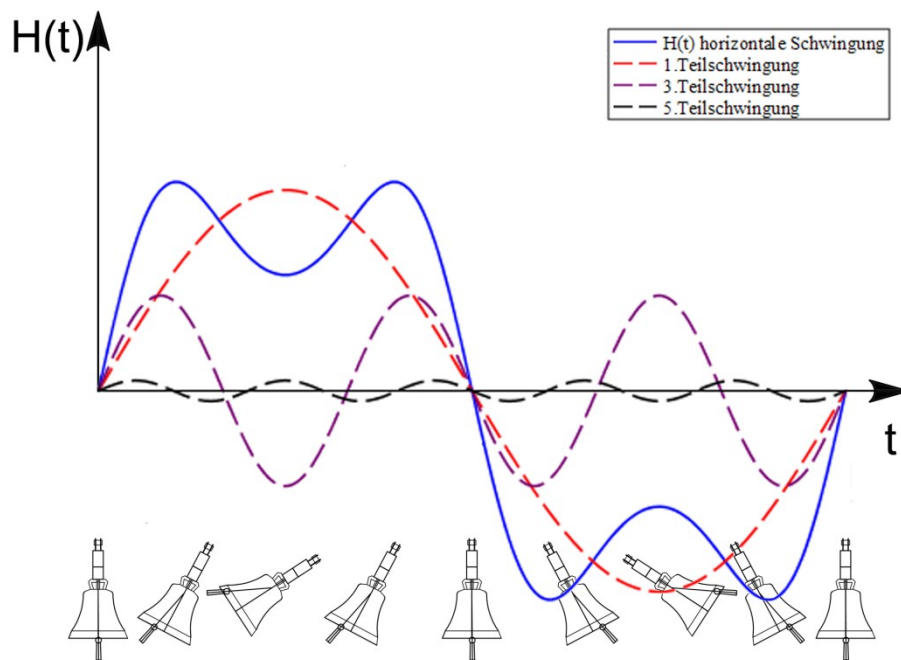


Abbildung 4-3: horizontales Lastspiel einer Glocke im Betriebszustand (Bachevskiy, 2017)

Die auftretende Lastschwingung wird insbesondere dann problematisch, wenn es zu Resonanzen mit der Gebäudeeigenfrequenz kommt. Befindet sich diese der Nähe der dritten Teilschwingung (Resonanzabstand kleiner 10%) ist eine additive Verstärkung über den zulässigen Grenzwert hinaus möglich. Je nach Konstruktion und Dauer des Läutebetriebs können dann erhebliche Schwingungsamplituden auftreten; im schlechtesten Fall sind dabei dauerhafte Schäden am Bauwerk nicht auszuschließen. Aus diesem Grund wurde 1978 die DIN 4178 „Glockentürme“ erarbeitet und bietet in der aktuellen Fassung vom April 2021 unter anderem Hinweise zur Bauausführung von Glockentürmen, Durchführung von Schwingungsmessungen und weitere Berechnungsgrundlagen.

4.2 Aufbau des Messsystems

Auf Grundlage der Vorbetrachtung wird eine horizontale Deformation in Nord-Süd-Ausrichtung, rechtwinklig zur Drehachse der Glocken erwartet. Dementsprechend wird mit der Auswahl der Messstellen das Objekt räumlich diskretisiert. Weiterhin findet die zeitliche Diskretisierung einerseits durch die Konfiguration der Abtastraten in Verbindung mit der ereignisbasierten Synchronisierung aller Systeme statt. Diese Aspekte sollen im vorliegenden Abschnitt näher behandelt werden.

4.2.1 Messaufbau

Beim Aufbau der Messsysteme müssen für jeden Sensor möglichst optimale Bedingungen geschaffen werden. So sind die Antennen der GNSS-Empfänger zwangsläufig im Außenbereich mit möglichst

guter Horizontfreiheit zu montieren. Beim Einsatz der Totalstation für die Richtungsmessung muss das Prisma sicher am Objekt befestigt sein und eine direkte Sichtverbindung zum möglichst erschütterungsfreien Instrumentenstandpunkt aufweisen. Auch bei der Neigungsmessung ist der sichere Stand des Instruments auf dem Dreifuß auf einer nahezu horizontalen Fläche notwendig. Die geringsten Einschränkungen ergeben sich für die Smartphones, da diese eine geringe Baugröße besitzen und keine externen Anschlüsse (Datenkabel, Energieversorgung, ...) berücksichtigt werden müssen. Bei allen Messsystemen gilt jedoch, dass für eine einfachere Auswertung die Sensorachsen auf die vermuteten Bewegungsrichtungen des Objekts ausgerichtet werden sollten. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen werden an der St. Petri-Kirche die Messsysteme auf insgesamt vier Ebenen im gemauerten Turm und im Helmaufsatz durchgeführt:

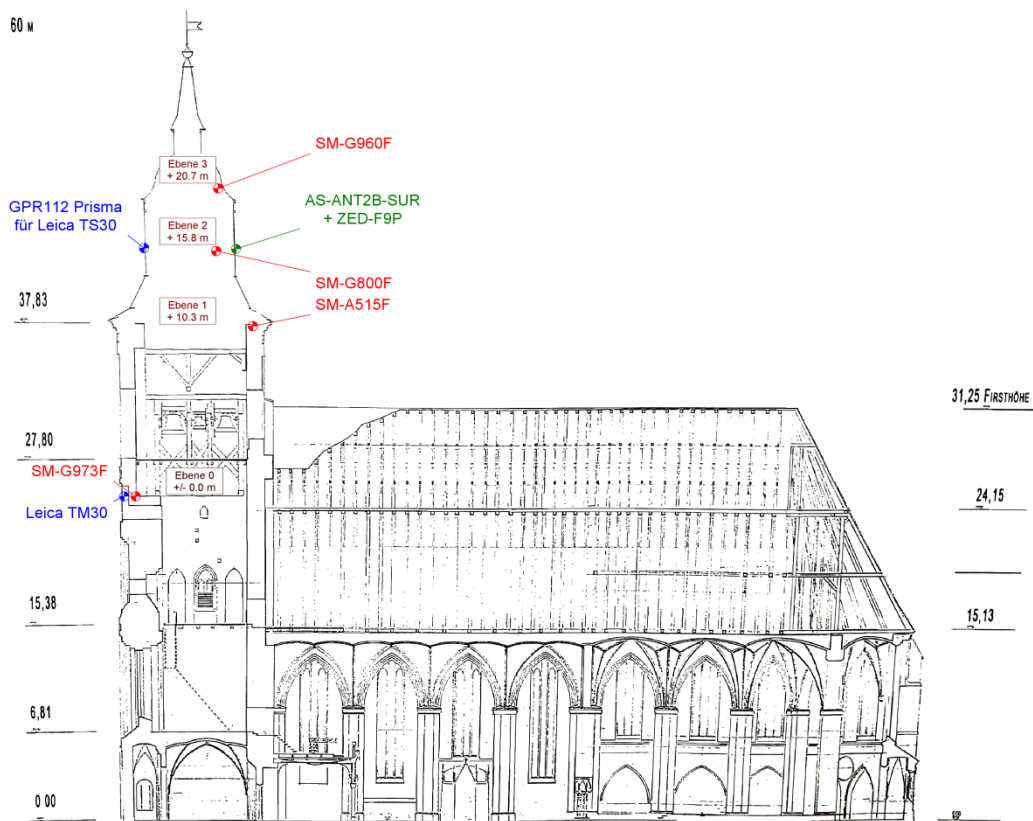


Abbildung 4-4: Längsschnitt durch die St. Petri-Kirche mit Messebenen

Die Drehachse der Glocken befindet sich etwa auf Firsthöhe in der Mitte des Turmes. Die tiefste Messebene befindet sich rund 3,5 Meter darunter in Höhe des Glockenbodens; hier sind das Leica TM30 für die Neigungsmessung und das S10 auf dem Boden einer Schallluke positioniert (siehe Abbildung 4-5 rechts). Die nächste Ebene wird durch die Oberkante der Mauerkrone rund 10,3 Meter über dem Glockenboden definiert, aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse ist dort nur die Messung mit einem Smartphone (A51) möglich. Weitere 5,5 Meter darüber befinden sich die Turmluken. Hier sind einerseits ein Smartphone (S5 mini), das Prisma für die Richtungsmessung und

das GNSS-Messsystem angebracht. In einer Höhe von 20,7 Metern über dem Glockenboden ist auf einem Balken schließlich die höchste Messebene mit einem weiteren Smartphone (S9) bestückt.



Abbildung 4-5: Richtungsmessung vom Leica TS30 zum GPR112-Prisma und Leica TM30 für Neigungsmessung

Die Antennen des GNSS-Messsystems sind über ein 5/8“-Gewinde an 2 Meter langen Stahl-Vierkantrohren befestigt. Diese Konstruktion liegt auf der Unterkante der Turmaussicht auf und ist an vier Punkten mittels Schraubzwingen fest am Bauwerk eingespannt. Da sich die Turmluken nicht vollständig öffnen lassen, sind diese während der Messung mit einem Spanngurt gegen umschlagen gesichert und liegen an den Antennenhalterungen an. Der Abstand zwischen der Antenne und den Luken beträgt rund 50 Zentimeter, sodass Mehrwegeeffekte nicht auszuschließen sind.



Abbildung 4-6: Aufbau des GNSS-Messsystems

4.2.2 Konfiguration

Eine Konfiguration der Instrumente dient zur Anpassung an den jeweiligen Messzweck. Besonders im Hinblick auf die Datenmenge sollte durch Wahl einer sinnvollen Abtastrate die zeitliche Diskretisierung so erfolgen, dass die erwarteten Schwingungen mit mindestens 5 Messwerten erfasst werden. Weiterhin sind Aspekte der Genauigkeitssteigerung durch Mittelbildung, Redundanz der Messdaten und die Definition der Exportformate für die weiteren Auswertungen zu berücksichtigen. Für die Messaufgabe an der St. Petri-Kirche werden in diesem Abschnitt für die vorgestellten Messverfahren die Grundzüge der Konfiguration dargestellt.

Das aufgebaute GNSS-Messsystem dient primär zur Erfassung der Rohdaten für das spätere Postprocessing. Die durchgeführten Messungen finden jedoch im Zusammenhang mit einem Projekt der hochschulinternen Forschungsförderung statt, in welchem die Echtzeitfähigkeit der Erfassung von Relativbewegungen bewertet werden sollte. Daher wurden insgesamt drei Empfänger gemeinsam am Turm befestigt und angesteuert, wovon einer als Echtzeitreferenz dient; diese Konfiguration ist in Abbildung 4-7 wiedergegeben. Auf die ausführliche Darstellung der Ergebnisse soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden; zur Auswertung kommen jedoch die binären Rohdaten der Echtzeiterfassung sowie einer eigenen lokalen Basis in unmittelbarer Nähe zum Messobjekt. Zusätzlich stehen Beobachtungsdaten des SAPOS®-GPPS Korrekturdienstleisters von der Referenzstation in Altentreptow zur Verfügung.

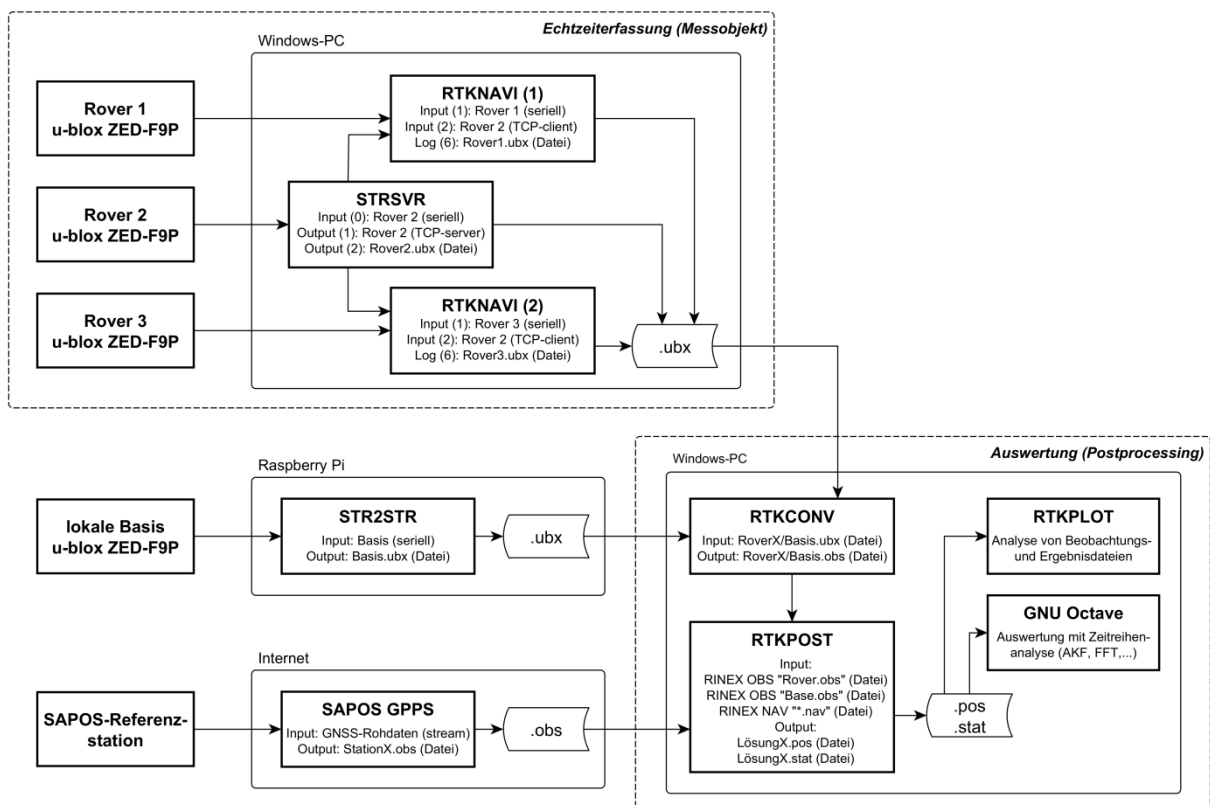


Abbildung 4-7: Konfiguration des GNSS-Messsystems mit drei Empfängern

Die GNSS-Empfänger am Messobjekt sowie die eigene lokale Basisstation geben die Beobachtungsgrößen Pseudoentfernung, Doppler- und Phasenmessung für alle Satellitensysteme auf zwei Frequenzen gemeinsam mit dem Zeitstempel im herstellereigenen Binärformat mit der höchstmöglichen Rate von 20 Hertz aus. Für die Echtzeiterfassung erfolgt die Ansteuerung der Empfänger über einen Windows-PC, da hierbei die Vorteile der sofortigen Visualisierung mit RTKLIB genutzt werden können. Die lokale Referenzstation hingegen arbeitet autonom auf einem Raspberry Pi Einplatinencomputer, welcher im headless-modus lediglich eine Energieversorgung benötigt und alle erforderlichen Kommandos (System hochfahren, Messdaten erfassen und abspeichern, ...) selbstständig durchführt. Für das Postprocessing werden die Rohdaten, sofern diese noch nicht im unabhängigen RINEX-Format vorliegen, mit dem Modul RTKCONV konvertiert. Die Auswertung findet im Modul RTKPOST statt; die Ergebnisse werden als Textdatei zur Weiterverarbeitung ausgegeben.

Auf den Smartphones werden die Messdaten mithilfe der Anwendung Phypnox[®] erfasst. Da Beschleunigungs- und Drehratensensor durch die App getrennt behandelt werden, ist für eine gemeinsame Aufzeichnung die Erstellung eines „eigenen Experiments“ notwendig, wobei dort auch die Abtastrate und weitere Funktionalitäten wie ein Echtzeitplot definiert werden können. Um für alle beteiligten Geräte eine identische Konfiguration zu gewährleisten lässt sich diese zwischen den Smartphones teilen. Mittels eines generierten QR-Codes kann bei vorhandener Internetverbindung das Experiment auf jedem Endgerät mit installiertem Phypnox[®] geladen und sofort verwendet werden:

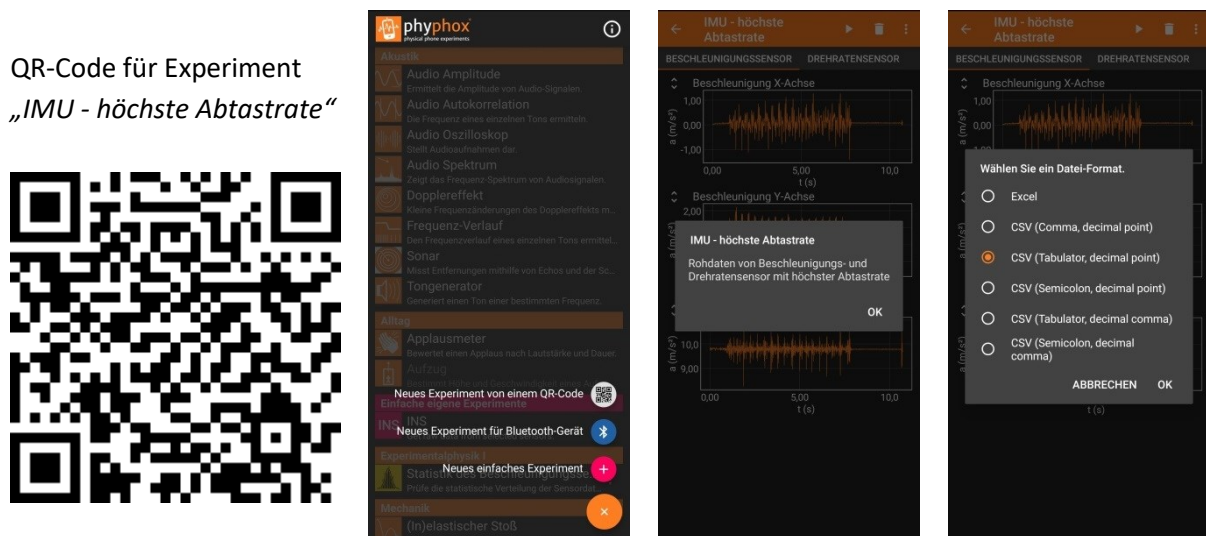


Abbildung 4-8: Konfiguration und Rohdatenaufzeichnung mit Phypnox[®]

Der Export erfolgt als CSV-Textdatei, wobei Komma- und Trennzeichendefinitionen selbstständig festgelegt werden können. Neben den Rohdaten befindet sich im erstellten Verzeichnis ein zusätzlicher Metadatenordner, worin Angaben zur eingesetzten Hardware sowie Zeitstempel (Umrechnung Systemzeit - Experimentzeit) enthalten sind.

Die Totalstationen werden wie im Abschnitt 3.3 beschrieben über die RS232-Schnittstelle mit einem Rechner verbunden und per GeoCOM angesteuert. Die erreichbaren Abtastraten betragen rund 20 Hertz für die Neigungsmessung; die Richtungsmessung kann aufgrund der Bildverarbeitung beim aktivierten ATR im Lock-Modus (ohne Nachführung des Fernrohrs durch die Motorisierung) hingegen nur mit etwa 13,6 Hertz ausgeführt werden. Über das Python-Programm werden die Daten als Textdatei auf dem Rechner abgespeichert und stehen für die weiteren Auswertungen zur Verfügung.

4.3 Auswertungen und Ergebnisse

Die unterschiedlichen Messsysteme lassen nur bedingt eine Echtzeitauswertung zu. So können die Smartphone-Messungen auf dem Display zwar sehr gut visualisiert werden, eine sinnvolle Auswertung ist jedoch aufgrund der Datenmenge erst nach der Messung möglich. Bei GNSS-Verfahren liegen schon in Echtzeit erste Positionsergebnisse vor, für die Generierung aussagekräftiger Ergebnisse sind jedoch mehrere lokale Empfänger oder eine Datenverbindung zu einer externen Referenzstation notwendig. Auch die Richtungs- und Neigungsmessung lassen sich grundsätzlich automatisieren bzw. permanent installieren. Da die Messung an der St. Petri-Kirche jedoch nur im Zeitraum von rund 30 Minuten stattfand, wurde auf die aufwändige Einrichtung entsprechender Infrastruktur verzichtet und alle Daten zunächst lokal erfasst. Die Auswerteschritte und Ergebnisse werden im vorliegenden Abschnitt dargestellt. Zusätzlich werden diese vergleichend zusammengefasst und eine Bewertung im Hinblick auf die DIN 4178 „Glockentürme“ unternommen.

4.3.1 Vorbereitung der Daten

Die Rohmessdaten liegen nach der Messung zunächst lokal auf den einzelnen Messsystemen bzw. den angeschlossenen Rechnern vor. Für die weitere Auswertung ist daher eine Zusammenführung und Synchronisierung notwendig.

Die Daten aus den inertialen Messeinheiten der Smartphones besitzen einen eigenen lokalen Zeitstempel der jeweils zum Anfang der Messung beginnt. In den Metadaten wird für den Start und das Ende der Messung auch ein Bezug zur Systemzeit hergestellt, aufgrund der unsicheren absoluten Zeitstempel der Smartphones kann dieser jedoch nur informativ herangezogen werden, sodass für die Auswertung die ereignisbasierte Synchronisierung Anwendung findet. Am Anfang und Ende der Messreihe werden dazu bei jedem Smartphone kurze Ereignisse (Schläge auf Unterlage) zu definierten Zeitpunkten durchgeführt. Diese Zeitpunkte werden manuell mithilfe einer zuvor gegen

die GNSS-Systemzeit abgeglichenen Funkuhr erfasst. Unter Berücksichtigung der Reaktionszeiten und weiteren Einflüssen lässt sich die absolute Synchronisierung mit besser als eine Sekunde abschätzen.

Gleichermaßen wird auch bei den Tachymetern vorgegangen. Die benötigten „Ereignisse“ lassen sich durch eine manuelle Drehung um die Stehachse bzw. einer kurzzeitigen Neigung/ Erschütterung generieren, wobei wiederum eine Erfassung der absoluten Zeit durchgeführt wird.

Bei GNSS ist diese Art der Synchronisierung hingegen nicht notwendig, da im Rahmen der Basislinienauswertung für jede Epoche automatisch Zeitstempel im einheitlichen GPS-Zeitsystem generiert werden; zudem wird dadurch eine konstante Abtastrate von 20 Hertz gewährleistet.

4.3.2 Auswertungen der Messverfahren

Die Messung an der Kirche erfolgte in zwei Feldkampagnen. Im Rahmen der ersten Kampagne kamen die Verfahren GNSS und IMU zum Einsatz, bei der zweiten wurden zusätzlich die Tachymeter für eine Richtungs- und Neigungsmessung verwendet. Leider konnte aus technischen Gründen während der zweiten Kampagne die Apostelglocke nicht geläutet werden, sodass die Auswertungen im Hinblick auf die möglichen Deformationen während des Vollgeläutes nicht vollständig miteinander vergleichbar sind.

Nachfolgend sind die wesentlichen Auswerteschritte und Ergebnisse der Messungen mit den kostengünstigen Smartphone-Inertialsensoren, dem GNSS-Messsystem und der tachymetrischen Verfahren bzw. der Neigungsmessung dargestellt.

4.3.2.1 IMU

Ein Überblick der erfassten Rohdaten der an der Messung beteiligten Smartphones ist in Abbildung 4-9 enthalten. Allein aus diesen Daten lassen sich schon die Zeitfenster der einzelnen Glockenkombinationen durch erhöhte Beschleunigungswerte sowie ein zeitlicher Versatz zwischen den Messreihen erahnen; wesentliche Ausreißer oder Trendercheinungen mit Ausnahme der Offsets sind hingegen über den gesamten Zeitraum der Messung zunächst nicht offensichtlich. Die Vorauswertung der zusätzlich erfassten Drehraten zeigte aufgrund der sehr geringen Deformationen keine Ergebnisse, sodass an dieser Stelle nur auf die Bestimmung translatorischer Bewegungen anhand der Beschleunigungsmessung eingegangen wird.

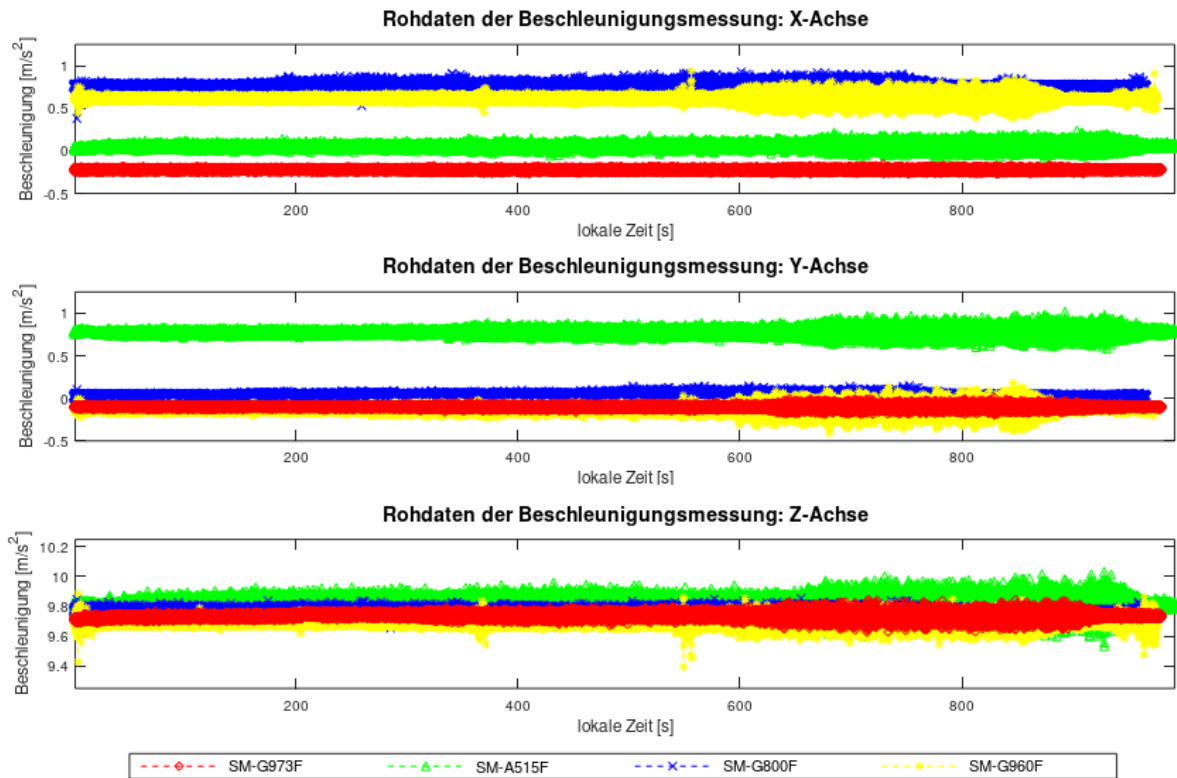


Abbildung 4-9: Rohdaten der Smartphone-Beschleunigungssensoren

Nach der ereignisbasierten Synchronisierung erfolgt für die Zeitreihen der Nordkomponente eine Trendbereinigung durch Abzug einer Polynomfunktion erster Ordnung von den Rohdaten:

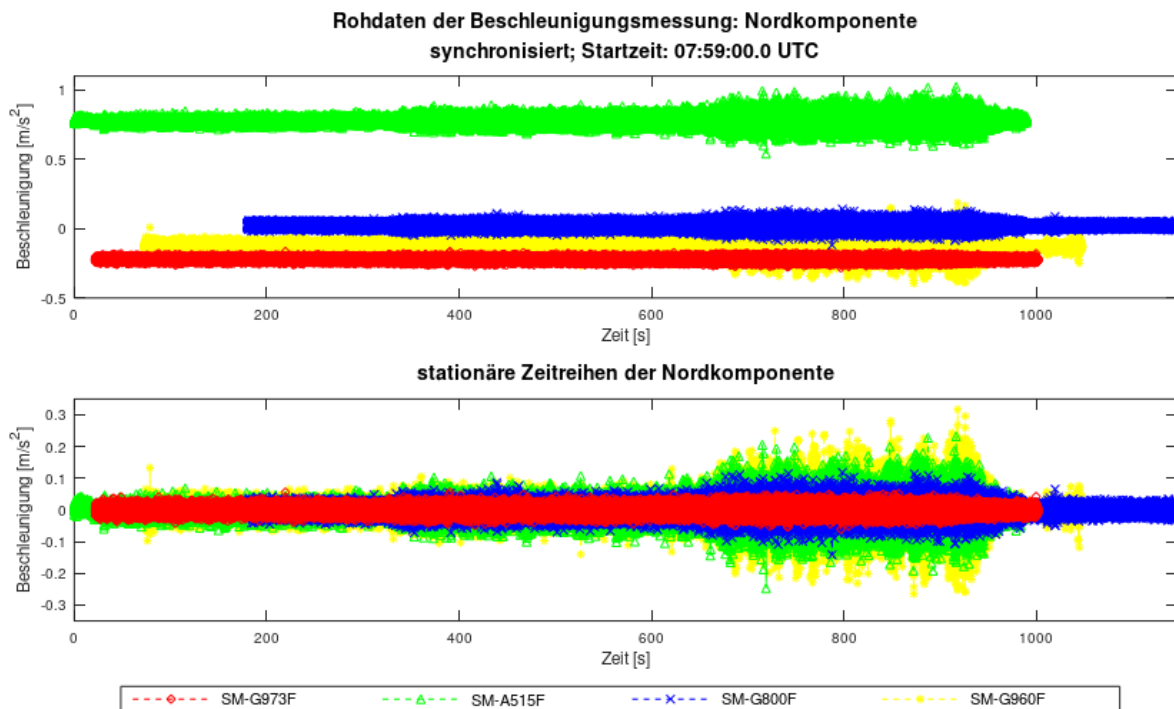


Abbildung 4-10: Synchronisierte Rohdaten und stationäre Zeitreihen der Nordkomponente

Vor der detaillierten Auswertung sollen zunächst die in den Daten vorliegenden Periodizitäten mit einem Spektrogramm aus der Beschleunigungsmessung mit dem Samsung A51 visualisiert werden:

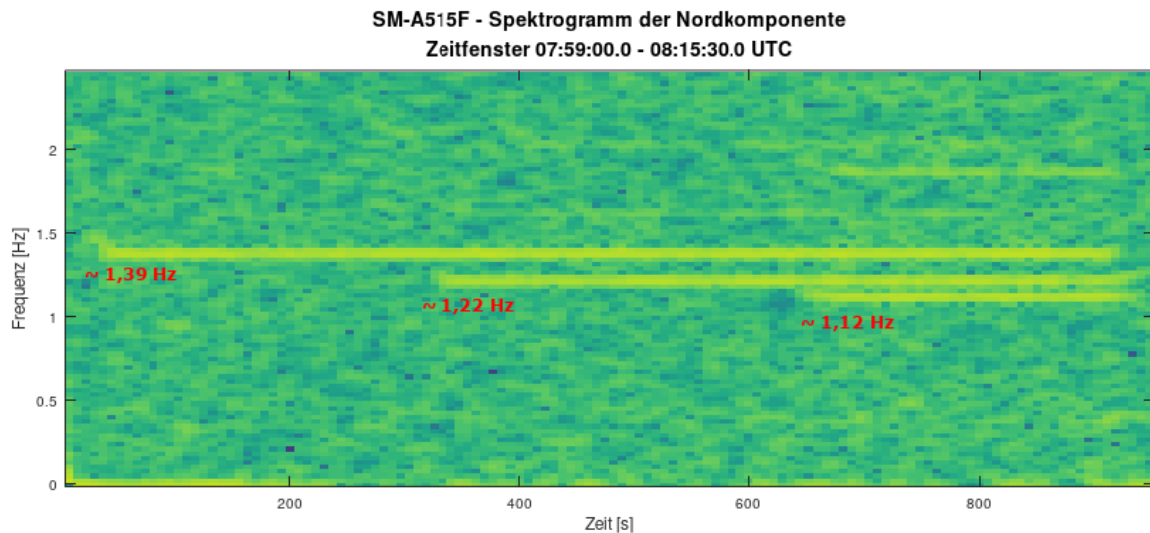
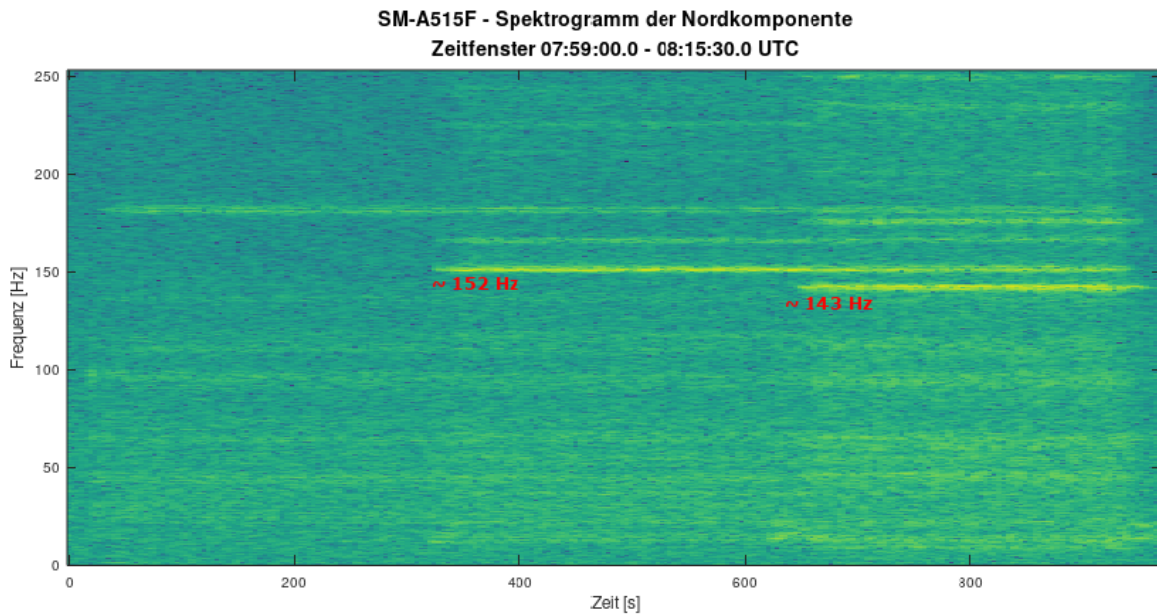


Abbildung 4-11: Spektrogramm der Beschleunigungszeitreihe mit dem Samsung A51

Aus der Abbildung 4-11 lässt sich die Reihenfolge des Lätens wiedergeben: Zuerst wurde die Sonntagsglocke eingeschaltet, sodass deren verstärkte dritte Teilschwingung bei 1,39 Hertz über den gesamten Messzeitraum erscheint. Nach rund 300 Sekunden wird die Apostelglocke hinzugeschaltet, wobei dessen Gebäudeantwort bei 1,22 Hertz liegt. Nach weiteren 5 Minuten wird das Geläut mit der Großen Glocke komplettiert, sodass auch deren verstärkte dritte Harmonische bei 1,12 Hertz im Spektrogramm sichtbar wird. Darüber hinaus lassen sich nach dem Einschalten der Apostelglocke bei etwa 152 Hertz und zusätzlich nach der Großen Glocke bei rund 143 Hertz breitbandige Periodizitäten mit einer hohen Energie im Spektrum nachweisen. Diese fallen praktisch mit den in (Peter, 2013) aufgeführten Untertönen der Glocken ($d^0 -5 \approx 142,6$ Hertz und $es^0 -4 \approx 151,6$ Hertz) zusammen, welche vermutlich per Körperschall auf das gesamte Bauwerk und die Sensoren übertragen wurden.

Aus den stationären und synchronisierten Zeitreihen lassen sich die Amplitudenspektren der Beschleunigung für einen Zeitraum von 4,5 Minuten während des Vollgeläutes berechnet. Diese sind für die einzelnen Messebenen in den Abbildungen 4-12 und 4-13 zusammengestellt:

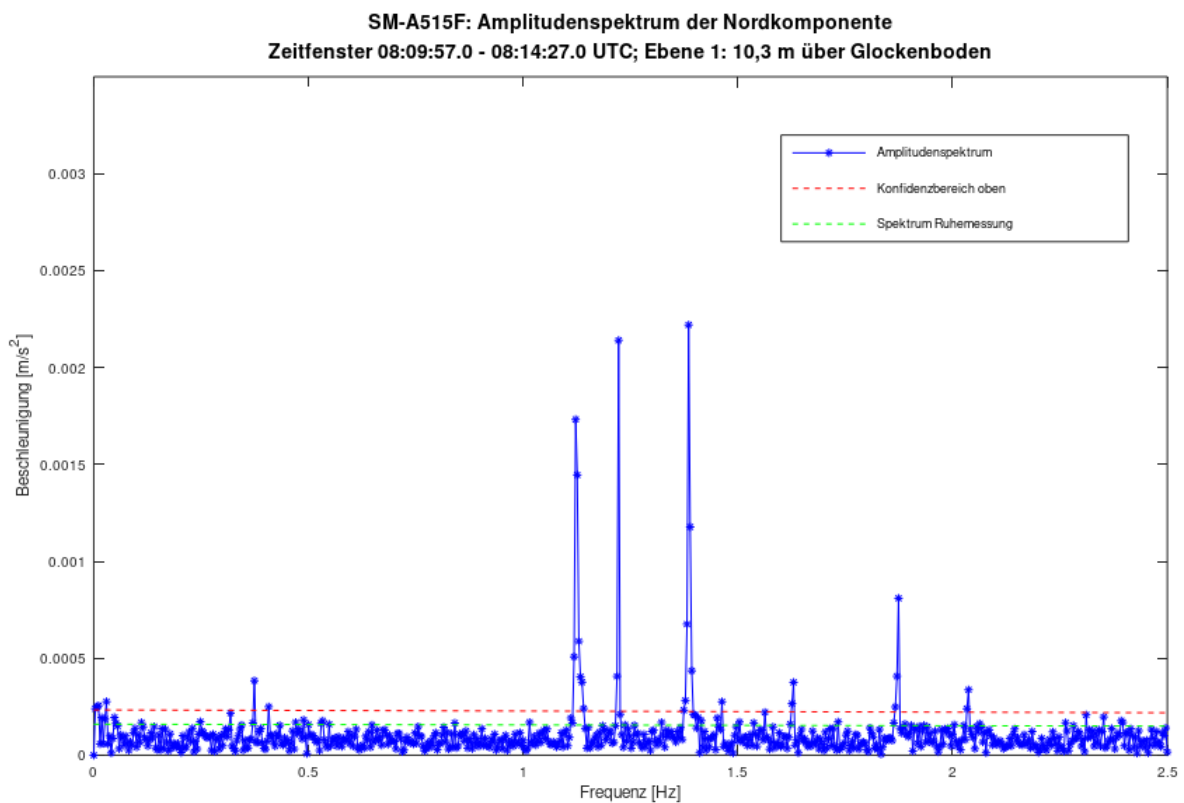
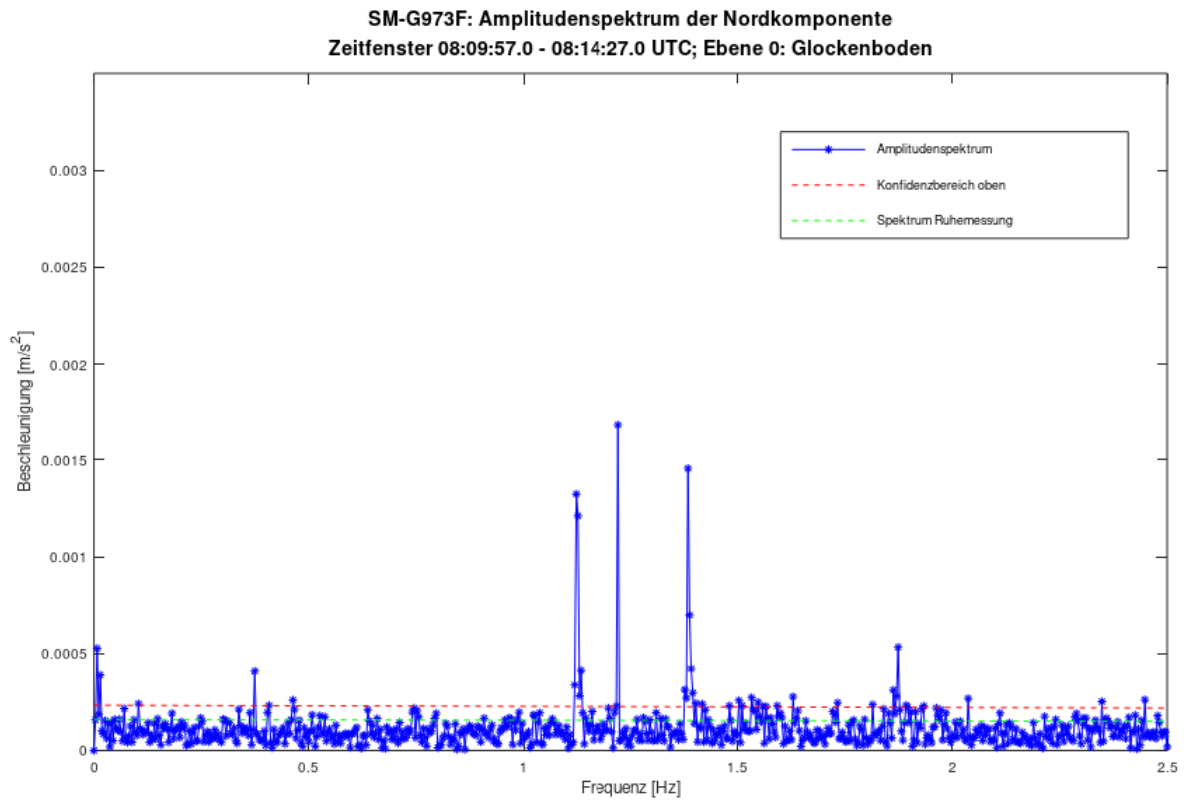


Abbildung 4-12: Amplitudenspektrum der Beschleunigung im gemauerten Kirchturm (Messebene 0 und 1)

Im gemauerten Teil des Kirchturmes sind die Gebäudeantworten der dritten und teilweise auch der fünften Harmonischen deutlich sichtbar; selbst die Glockenschwingungen der Apostelglocke und Großen Glocke sind noch als signifikant zu bewerten. Auch im Turmhelm setzt sich dieses Bild fort:

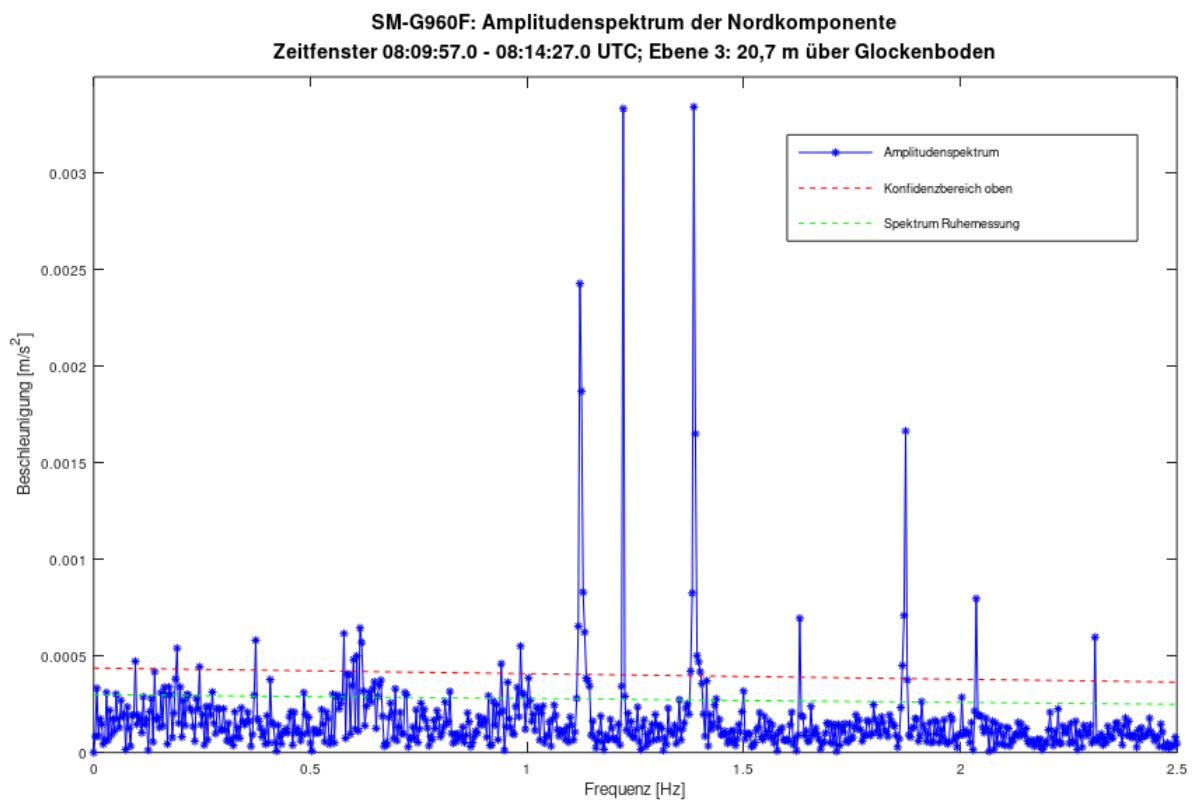
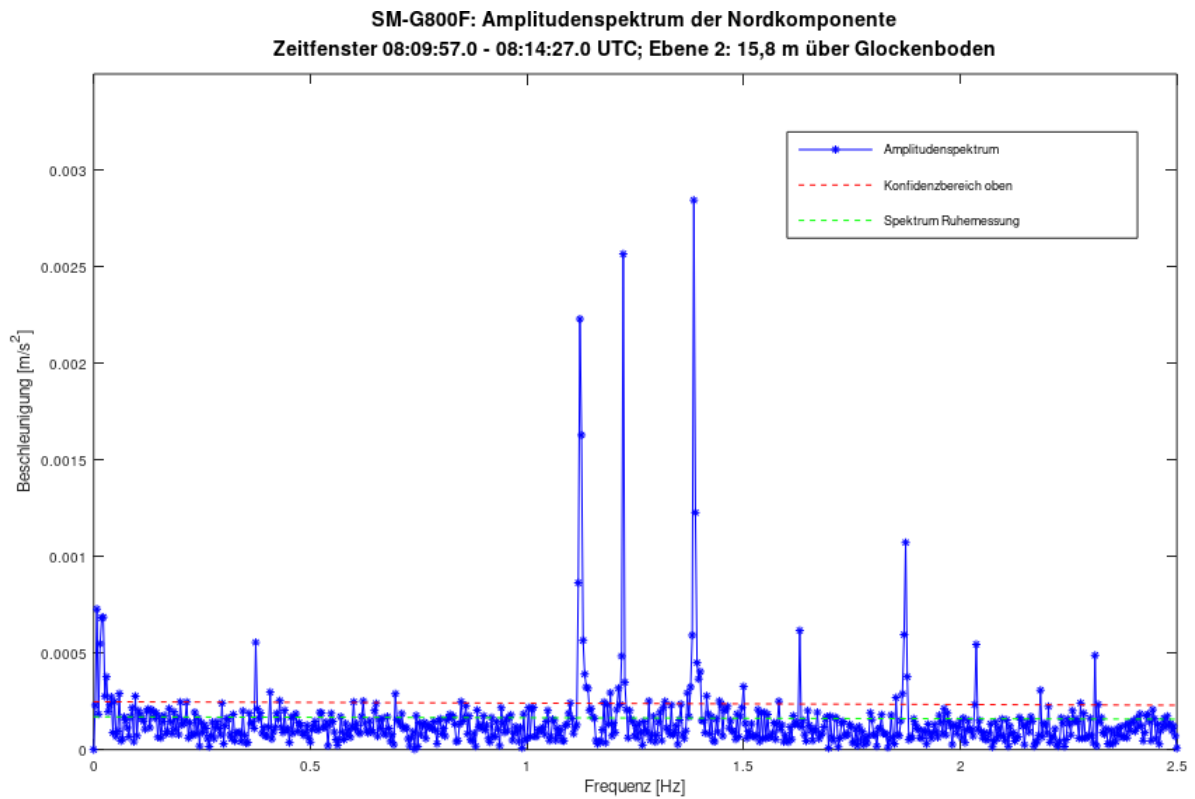


Abbildung 4-13: Amplitudenspektrum der Beschleunigung im Turmhelm (Messebene 2 und 3)

Mit zunehmender Höhe über den Glockenboden vergrößern sich auch die Amplituden, gleichzeitig nimmt jedoch das Grundrauschen im Turmhelm leicht zu. Für eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Verfahren lassen sich die Spektren der Beschleunigung in Wege umrechnen und gemeinsam in einer Grafik für den Bereich der ersten bis fünfte Teilschwingung darstellen:

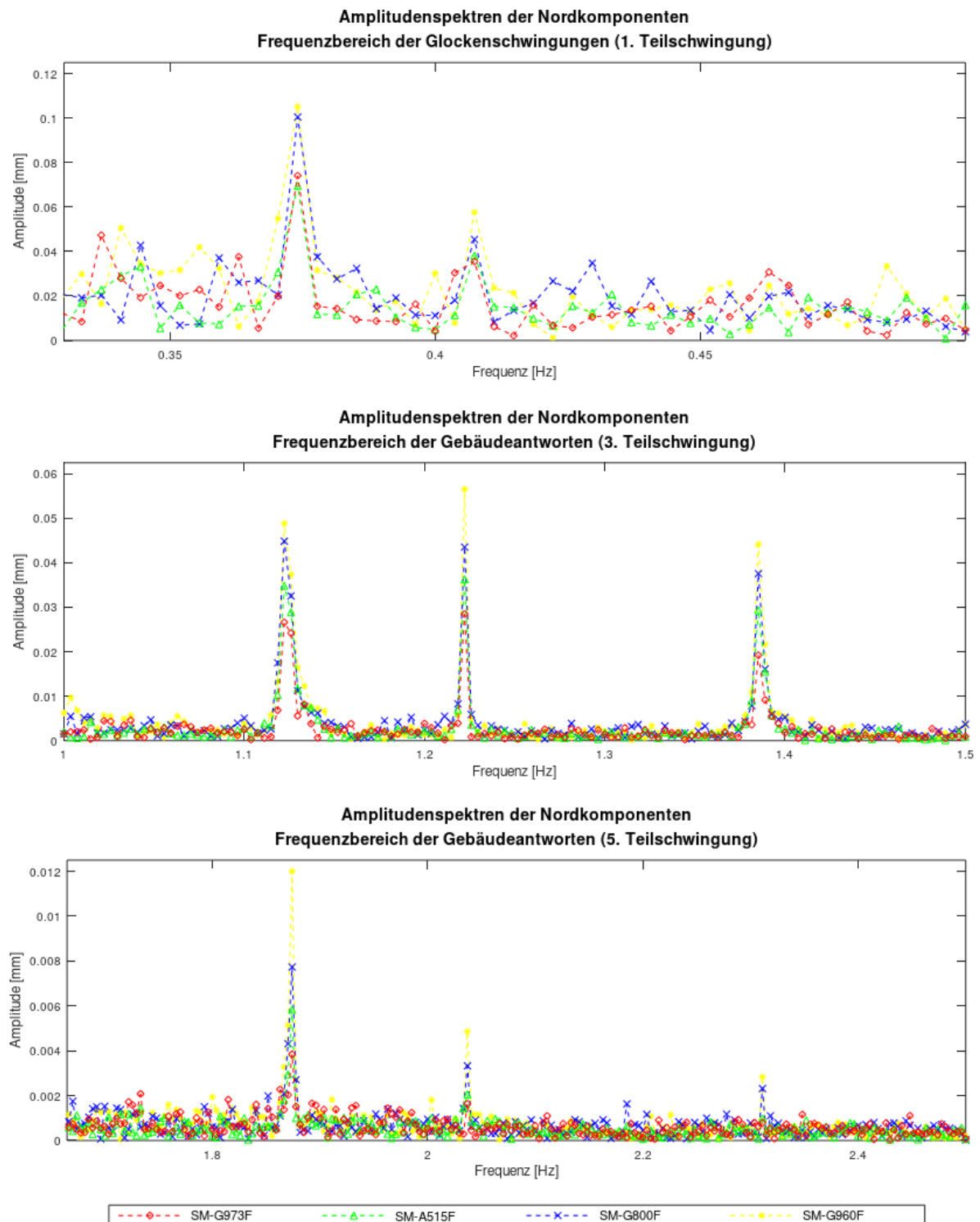


Abbildung 4-14: zusammengefasste Amplitudenspektren der Wege aus Beschleunigungen für die 1. bis 5. Teilschwingung

Die jeweiligen Peaks liegen in Reihenfolge der Messebenen direkt übereinander, was die hohe Konsistenz der nachgewiesenen Frequenzen und Amplituden unterstreicht. Erwartungsgemäß werden durch die Umrechnung der Beschleunigungen in Wege die niederfrequenten Periodizitäten verstärkt und die hochfrequenten Anteile verringert. Da dies auch auf das Grundrauschen zutrifft, dürfen im Spektrum der Wegamplituden nur diejenigen Peaks betrachtet werden, welche schon im Beschleunigungsspektrum als signifikant nachgewiesen wurden. Die Sensitivität der Schwingwege ist daher stark frequenzabhängig, was auch anhand der unterschiedlich gewählten Maßstäbe der Amplitudenachse in Abbildung 4-14 deutlich wird.

Die Gesamtergebnisse der aus Beschleunigungsmessungen abgeleiteten Wegamplituden für die Glockenschwingung und die Gebäudeantworten bei der dritten und fünften Harmonischen sind in Tabelle 4-2 zusammengestellt:

Tabelle 4-2: Ergebnisse der IMU-Messung

	Sonntagsglocke	Apostelglocke	Große Glocke
SM-G973F Ebene 0 (Glockenboden)	(1.) 0,463 Hz / 0,030 mm (3.) 1,385 Hz / 0,018 mm (5.) (nicht nachweisbar)	(1.) 0,407 Hz / 0,035 mm (3.) 1,222 Hz / 0,028 mm (5.) 2,037 Hz / 0,001 mm	(1.) 0,374 Hz / 0,073 mm (3.) 1,122 Hz / 0,026 mm (5.) 1,874 Hz / 0,004 mm
SM-A515F Ebene 1 (OK Mauerwerk)	(1.) (nicht nachweisbar) (3.) 1,385 Hz / 0,028 mm (5.) (nicht nachweisbar)	(1.) 0,407 Hz / 0,038 mm (3.) 1,222 Hz / 0,035 mm (5.) 2,037 Hz / 0,002 mm	(1.) 0,374 Hz / 0,069 mm (3.) 1,122 Hz / 0,035 mm (5.) 1,874 Hz / 0,006 mm
SM-G800F Ebene 2 (Turmluken)	(1.) (nicht nachweisbar) (3.) 1,385 Hz / 0,036 mm (5.) 2,311 Hz / 0,002 mm	(1.) 0,407 Hz / 0,045 mm (3.) 1,222 Hz / 0,043 mm (5.) 2,037 Hz / 0,003 mm	(1.) 0,374 Hz / 0,100 mm (3.) 1,122 Hz / 0,044 mm (5.) 1,874 Hz / 0,008 mm
SM-G960F Ebene 3 (Helmspitze)	(1.) (nicht nachweisbar) (3.) 1,385 Hz / 0,043 mm (5.) 2,311 Hz / 0,003 mm	(1.) 0,407 Hz / 0,057 mm (3.) 1,222 Hz / 0,056 mm (5.) 2,037 Hz / 0,005 mm	(1.) 0,374 Hz / 0,105 mm (3.) 1,122 Hz / 0,049 mm (5.) 1,874 Hz / 0,012 mm

4.3.2.2 GNSS

Anders als bei den inertialen Sensoren ist bei der GNSS-Messung zunächst eine Vorverarbeitung der binären Rohdaten notwendig, da erst nach der Berechnung von Basislinien die jeweiligen Positionsunterschiede mit den Werkzeugen der Zeitreihenanalyse analysiert werden können. Mit einer Datenverbindung zu einer externen Referenzstation und festgesetzten Mehrdeutigkeiten könnten grundsätzlich auch die Ergebnisse der Echtzeitpositionierung für die Auswertungen genutzt werden.

Die mit dem Modul RTKCONV in das RINEX-Format überführten Rohdaten können mithilfe von RTKPLOT analysiert werden. So lassen sich beispielsweise ein Skyplot und das Signal-Rausch-Verhältnis bzw. die Mehrwegeeffekte in Abhängigkeit vom Elevationswinkel visualisieren. In der Abbildung 4-15 sind die erfassten Daten der östlichen GNSS-Empfangsanlage am Turm dargestellt:

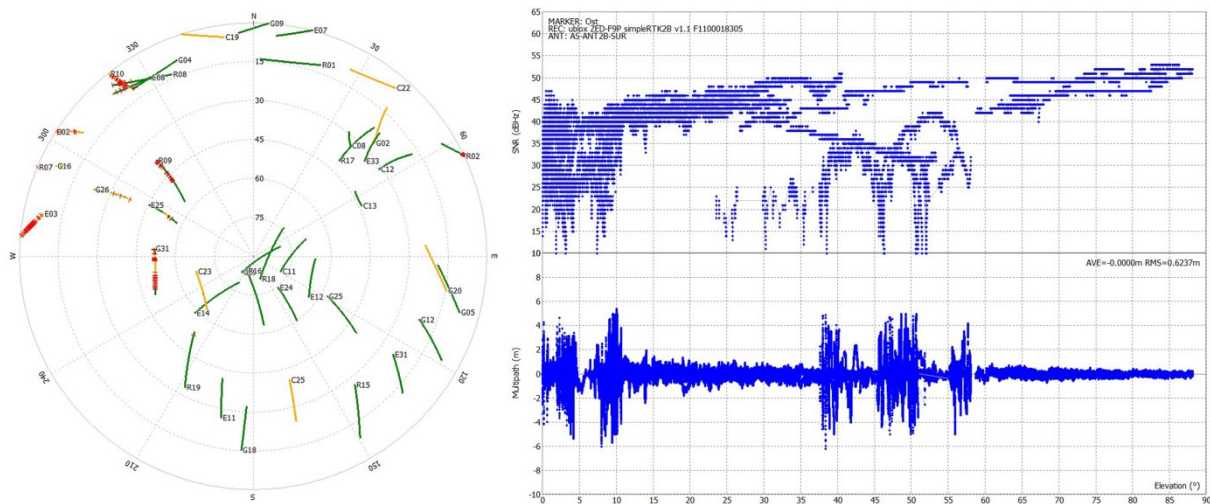


Abbildung 4-15: Skyplot und SNR/Multipath für den östlichen Empfänger

Von den insgesamt 43 sichtbaren Satelliten werden 30 ohne Signalunterbrechung empfangen. Die Cycle-Slips treten vorwiegend im Westen bis zu einem Elevationswinkel von 60° auf, was durch die Abschattung des Kirchturmes zu erklären ist. Zudem weisen diese Signale aufgrund der Beugungseffekte ein deutlich schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zum ungestörten Empfang auf. Ein ähnliches Bild ist auch für die Rohdaten des südlichen Empfängers zu erkennen:

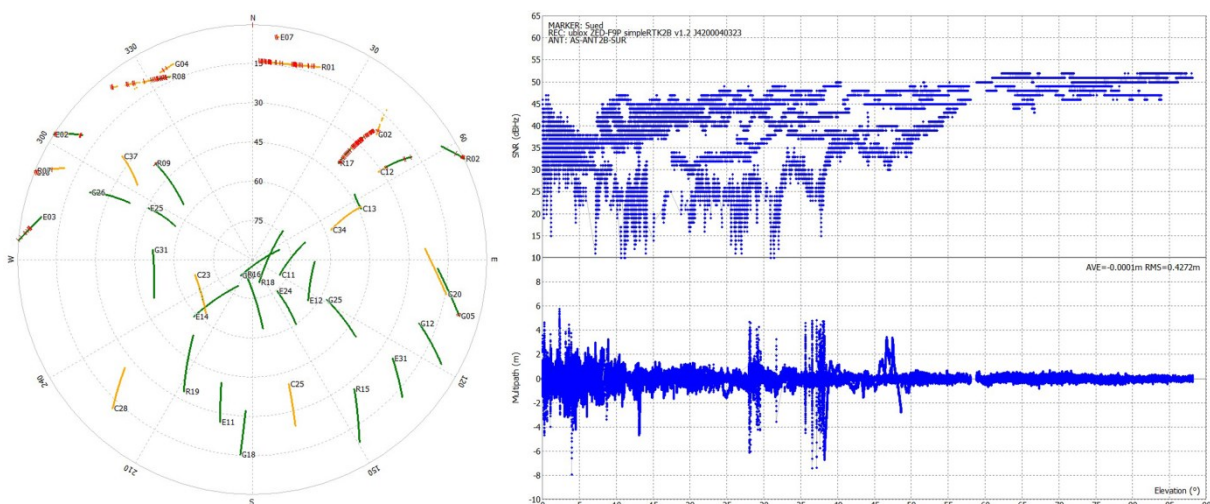


Abbildung 4-16: Skyplot und SNR/Multipath für den südlichen Empfänger

Beim südlichen Empfänger werden von 37 Satelliten nur 26 ungestört empfangen. Die Abschattung befindet sich nun im Norden, sodass im Vergleich zu Abbildung 4-15 nun mehr Satelliten im Westen verarbeitet werden können (bessere DOP-Werte). Dennoch sind deutliche Fehlereinflüsse durch Signalbeugung und Mehrwegeeffekte bis zu einer Elevation von 60° sichtbar.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden die Auswerteparameter für RTKPOST angepasst:

Tabelle 4-3: GNSS-Auswerteparameter für RTKPOST

Parameter	Wert	Erläuterung/ Begründung
<u>Setting1:</u>		
Positioning Mode	Kinematic	kinematischer Auswertungsmodus
Frequencies	L1+L2/E5b	Verwendung aller aufgezeichneten Frequenzen
Filter Type	Forward	Vorwärtsberechnung, wie bei Echtzeitpositionierung
Elevation Mask	10°	Ausschluss von Satelliten mit geringer Elevation
SNR Mask	Rover	Verwendung einer an die AS-ANT2B-SUR angepassten SNR-Maske für den Rover
Rec Dynamics	OFF	Keine Erweiterung des Auswertemodells um Dynamiken
Iono Correction Topo Correction	Broadcast Saastamoinen	Nutzung der empfangenen Korrekturen bzw. Standardmodelle, wie bei Echtzeitpositionierung
Sat Ephemerides/Clock	Broadcast	Nutzung der empfangenen Bahndaten und Uhrkorrekturen, wie bei Echtzeitpositionierung
Sat Systems	GPS + GLO + GAL + BDS	Verwendung von Beobachtungsdaten aller GNSS
<u>Setting2:</u>		
Int Amb Res GPS Int Amb Res GLO Int Amb Res BDS	Continuous ON ON	Kontinuierliche Mehrdeutigkeitslösung mit Aufdatierung für alle GNSS
Min Ratio to Fix	3	Standardwert für Ratio-Test, siehe auch (Bauer, 2018)
Max Pos Var for AR	0.100	Standardeinstellung, optimiert für low-cost Empfänger
AR-Filter	ON	Qualifizierung neuer Satelliten vor Verwendung zur Mehrdeutigkeitslösung
<u>Output:</u>		
Solution Format	E/N/U- Baseline	Ausgabe der Positionsunterschiede im Horizontsystem des Rovers
<u>Statistics:</u>		
Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	200/200	für ZED-F9P empirisch ermittelt mit RTKPLOT
Carrier-Phase Error a+b/sin(EI)	a: 0.003 m b: 0.005 m	Standardeinstellung, optimiert für low-cost Empfänger
Receiver Accel Horizontal/Vertical	-	keine Definition eines zusätzlichen Systemrauschen mit Beschleunigungen (siehe Rec Dynamics: „OFF“)
<u>Positions:</u>		
Antenna Type (bei Rover und Base)	*	automatische Verwendung der Antennenbezeichnung und Offsets für Korrektur aus RINEX-Dateikopf
Position (bei Base)	RINEX Header	Verwendung der Position aus RINEX-Dateikopf
<u>Files:</u>		
Receiver Ant PCV	igs14_indiv.atx	PCO/PCV-Kalibrierdaten der Empfangsantennen (Datei um AS-ANT2B-SUR und SAPOS-Referenzstation erweitert)
<u>Misc:</u>		
Time Interpolation of Base Station Data	ON	Interpolation sinnvoll, da Datenrate der Basis (z.B. 1 Hz) vom Aufzeichnungsintervall des Rover (20 Hz) abweicht

Die Basislinien aus RTKPOST weisen deutliche Unterschiede in ihrer Lösungsqualität auf. So liegt bei der eigenen Referenz der Anteil der Positionslösungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten für den östlichen Empfänger bei nur 81,8% (grün); beim südlichen werden 99,4% (blau) der Epochen gelöst:

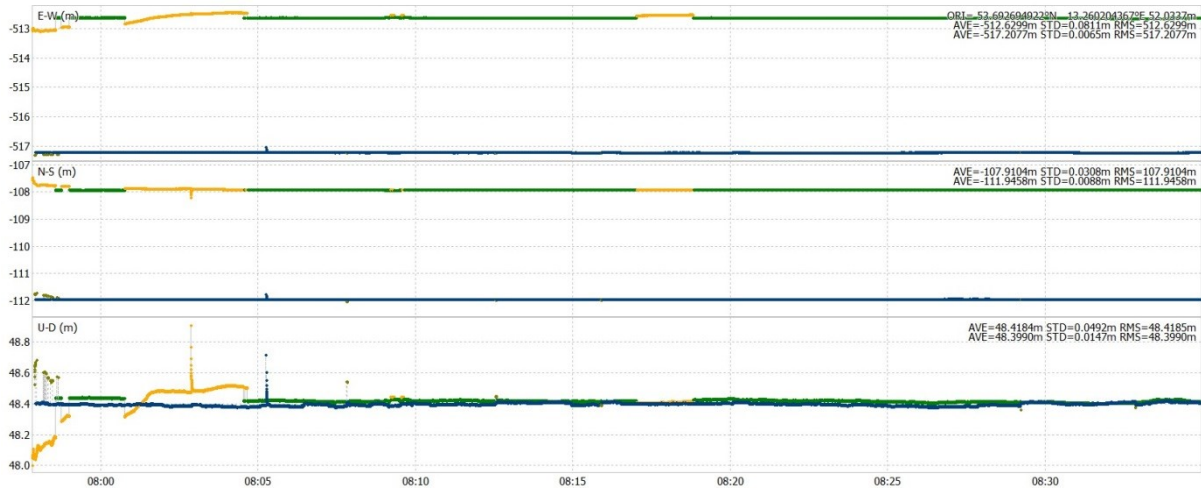


Abbildung 4-17: Ergebnis der Basislinienprozessierung (Basis: eigene Referenz)

Zum Vergleich werden die Basislinien in Bezug zu einer etwa 800 Meter entfernten SAPOS-Referenzstation ausgewertet. Der Anteil der Epochen mit gelösten Mehrdeutigkeiten beträgt nun 99,9% für den östlichen und 99,8% für den südlichen Empfänger:

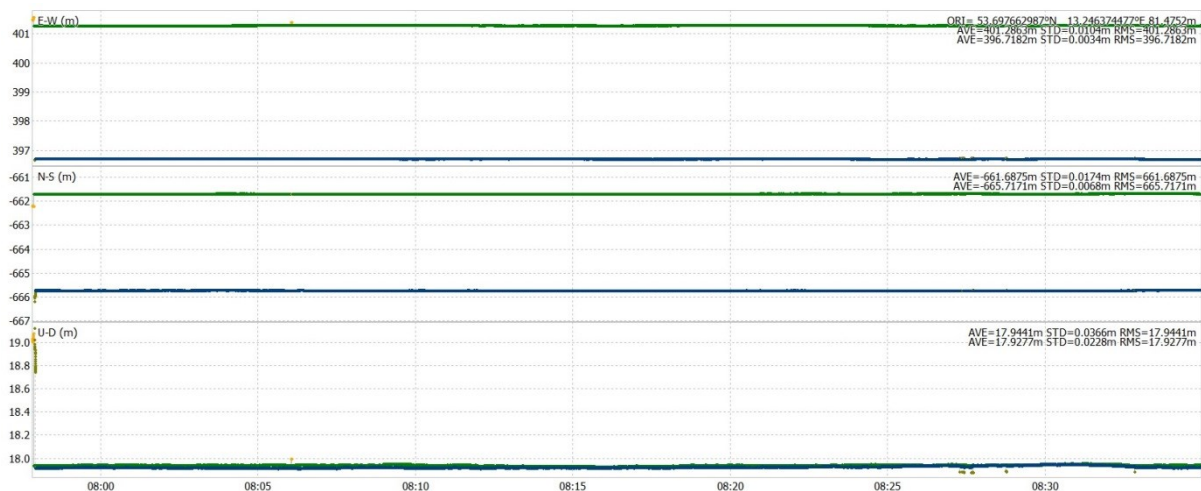


Abbildung 4-18: Ergebnis der Basislinienprozessierung (Basis: SAPOS 0789)

Für die weitere Auswertung mit den Werkzeugen der Zeitreihenanalyse werden die Textdateien an GNU-Octave übergeben. Die Analyse erfolgt für den identischen Zeitraum für 4,5 Minuten während des Vollgeläutes, sodass das maximale Lastspiel vorliegt. Entsprechend der maximalen Deformationsrichtung wird nur die Nordkomponente der Basislinie in der Auswertung betrachtet.

Die Messwerte weisen trotz der festgesetzten Mehrdeutigkeiten aufgrund nicht kompensierbarer Störeinflüssen teilweise noch Sprungstellen auf, daher wird zum Erreichen der Stationarität anstelle

einer polynombasierten Trendbeseitigung ein gleitender Mittelwert mit einer Fensterlänge von 3 Sekunden berechnet und von den Messwerten abgezogen. Somit können tiefe Frequenzen ($< 0,3$ Hertz) im Amplitudenspektrum weitestgehend eliminiert werden und die interessierenden Effekte der Gebäudeantwort treten deutlicher aus den verrauschten Daten hervor.

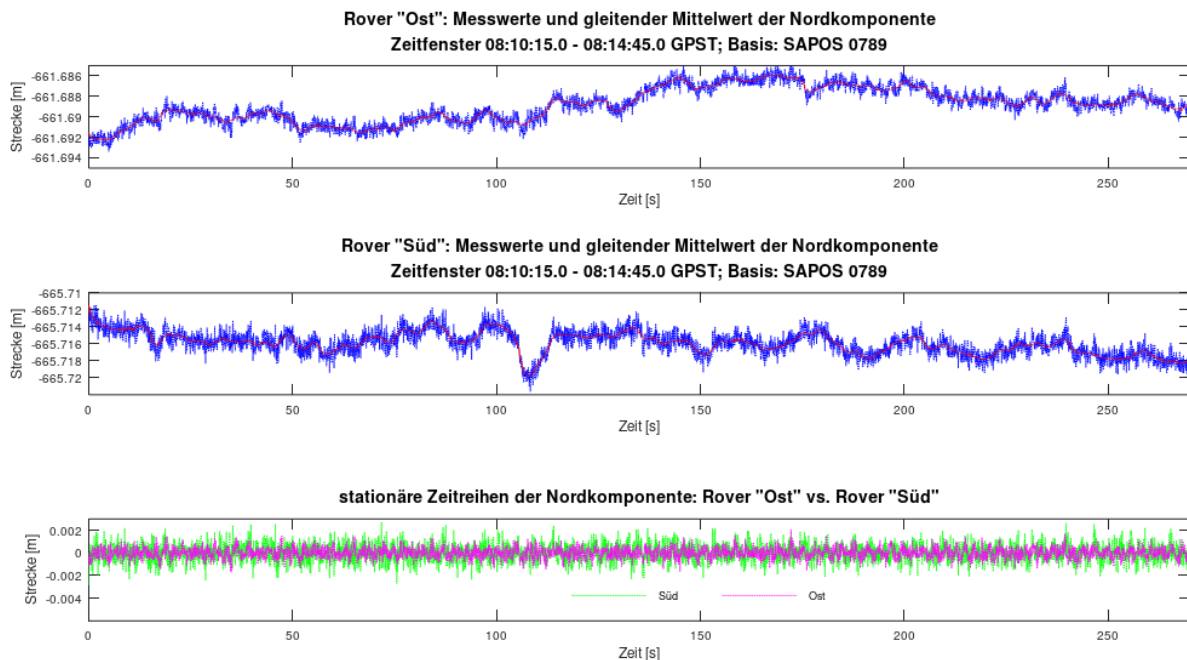


Abbildung 4-19: Trendbeseitigung der Nordkomponenten für beide Rover (Basis: SAPOS 0789)

Die Ergebnisse der Trendbeseitigung und die stationären Zeitreihen sind in den Abbildungen 4-19 und 4-20 zusammenfassend dargestellt.

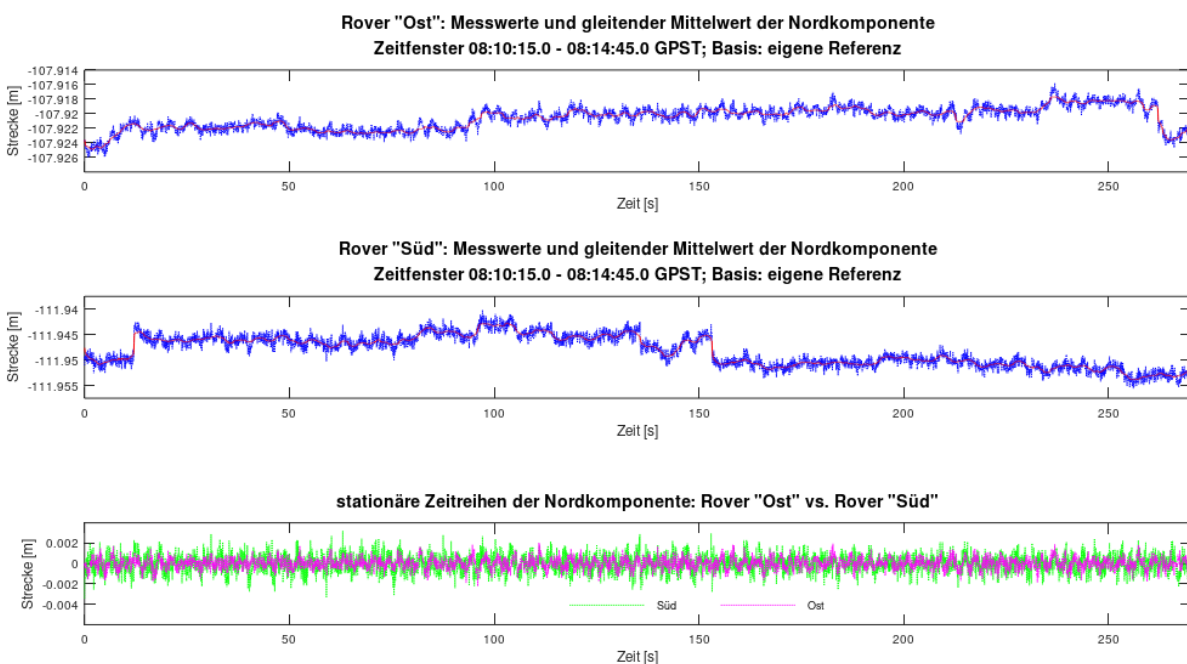


Abbildung 4-20: Trendbeseitigung der Nordkomponenten für beide Rover (Basis: eigene Referenz)

Die somit berechneten Amplitudenspektren für den Frequenzbereich der Gebäudeantworten von 1 bis 1,5 Hertz zeigen bei allen Auswertekombinationen gleiche Peaks bei den erwarteten Frequenzen an. In Bezug auf eine angenommenes weißes Rauschen aus der Ruhemessung für ein Zeitfenster gleicher Länge in diesem Frequenzbereich sind die Amplituden zumeist als signifikant zu bewerten:

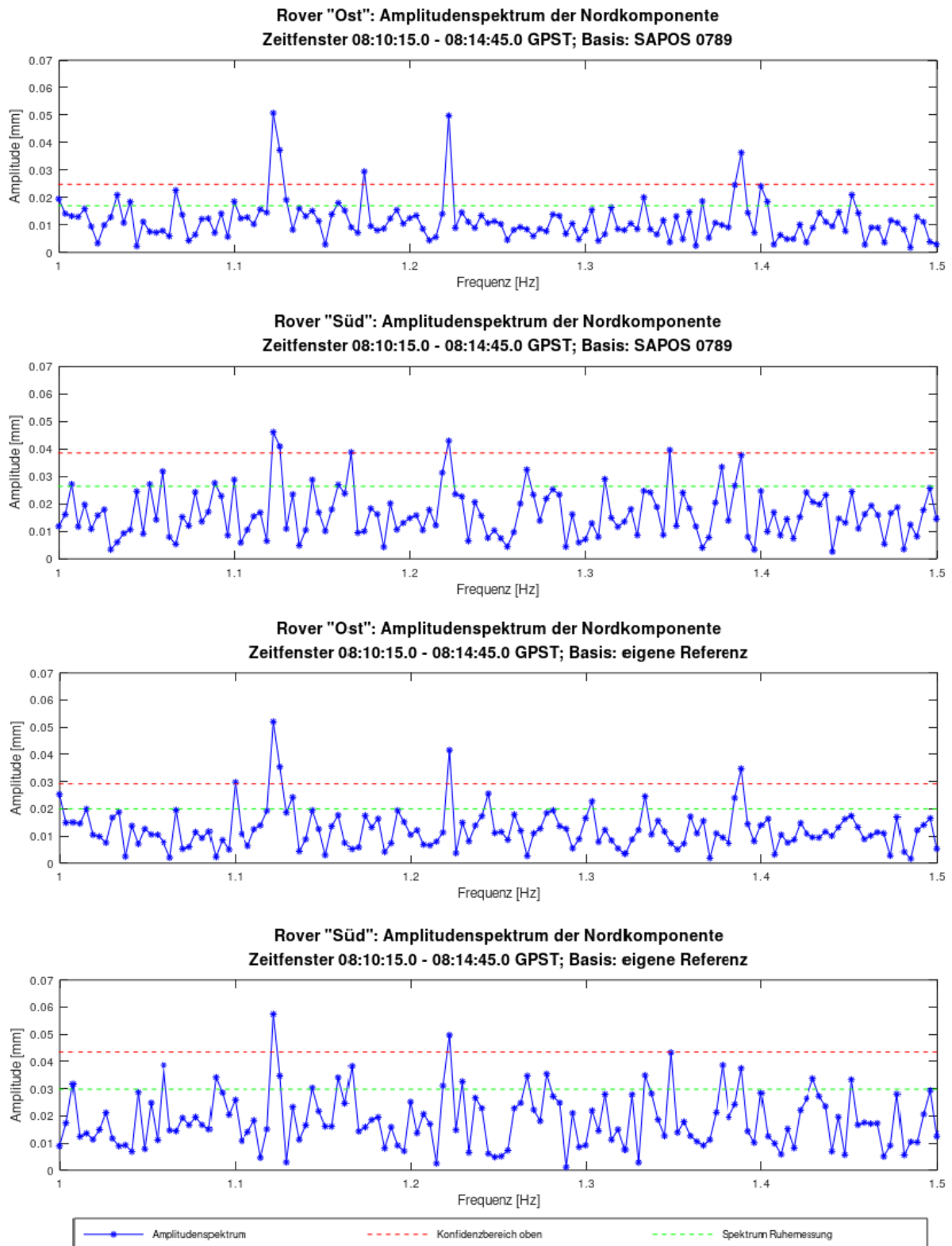


Abbildung 4-21: Amplitudenspektren der Nordkomponenten für Rover „Ost“ und „Süd“

Aus Abbildung 4-21 lässt sich weiterhin erkennen, dass das Rauschen der Amplitudenspektren außerhalb der erwarteten Frequenzen weitestgehend zufällig verläuft, durch eine Mittelbildung kann daher ein noch deutlicheres Ergebnis erzielt werden:

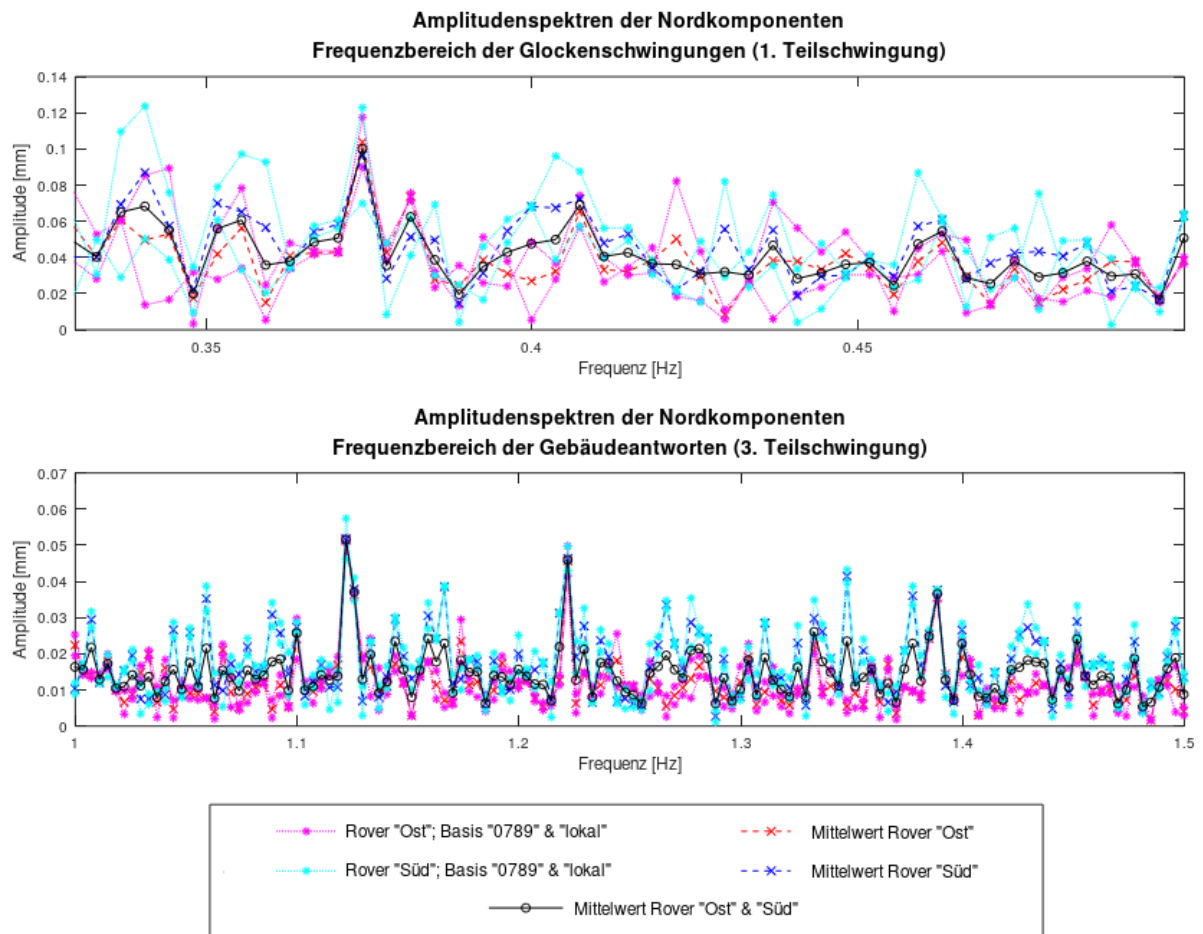


Abbildung 4-22: Darstellung der Amplitudenspektren und Mittelbildung

Die Gebäudeantworten können aus der Grafik in Frequenz und Amplitude sicher ermittelt werden; weiterhin lassen sich auch die zugehörigen Peaks der ersten Teilschwingungen (Glockenschwingung) am Rande der Signifikanz erahnen. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst, wobei zusätzlich in Klammern die nicht signifikanten Werte der Mittelbildung informativ dargestellt sind:

Tabelle 4-4: Ergebnisse der GNSS-Messung

	Basis: SAPOS 0789		Basis: lokale Referenz		Ergebnisse aus der Mittelbildung
	Ost	Süd	Ost	Süd	
Sonntagsglocke	1,389 Hz / 0,036 mm	(1,389 Hz / 0,038 mm)	1,389 Hz / 0,035 mm	(1,389 Hz / 0,036 mm)	1,389 Hz / 0,036 mm (0,463 Hz / 0,054 mm)
Apostelglocke	1,222 Hz / 0,050 mm	1,222 Hz / 0,043 mm	1,222 Hz / 0,042 mm	1,222 Hz / 0,050 mm	1,222 Hz / 0,046 mm (0,407 Hz / 0,069 mm)
Große Glocke	1,122 Hz / 0,051 mm	1,122 Hz / 0,046 mm)	1,122 Hz / 0,052 mm	1,122 Hz / 0,057 mm	1,122 Hz / 0,052 mm 0,374 Hz / 0,100 mm

4.3.2.3 Totalstationen

Beim Einsatz der Totalstationen sind einerseits die Richtungsmessung mit dem TS30 und die Neigungsmessung mit dem TM30 gesondert auszuwerten.

Richtungsmessung:

Nach erfolgter Trendbeseitigung wird zunächst mittels Fouriertransformation das Spektrum der Richtungsmessung für die Horizontalrichtung berechnet. Dieses lässt sich für eine bessere Interpretation der Winkelamplituden mithilfe der Bogenformel in das metrische Maß zum Spektrum der Wegamplituden aus Querabweichungen überführen. Bei einer Entfernung von 84 Metern muss somit der Faktor 1,32 angebracht werden, damit eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegenüber den IMU und GNSS-Messungen erreicht wird.

Die Auswertung erfolgt für ein Zeitfenster von jeweils drei Minuten für die einzelnen Lastfälle. Das aus der Ruhemessung abgeleitete Grundrauschen für einen gleichen Zeitraum liegt bei etwa 0,025 Millimetern und nimmt mit zunehmender Frequenz exponentiell ab und liegt somit deutlich unter der Herstellerangabe von 0,3 mgon der Richtungsmessung bei der Verwendung der automatisierten Zielerfassung.

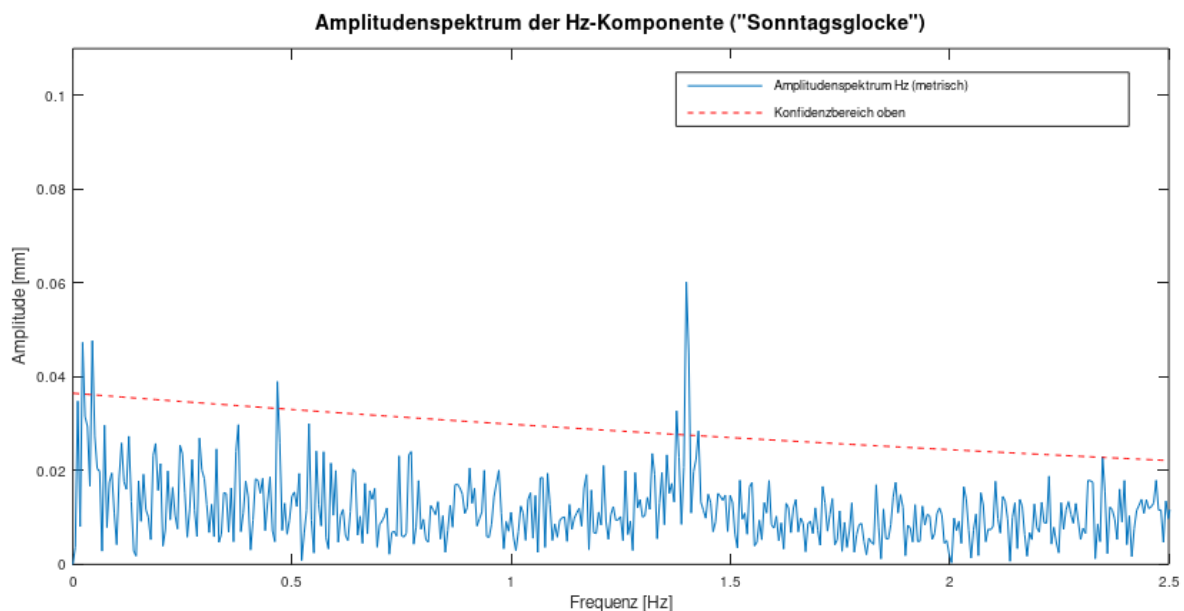


Abbildung 4-23: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Sonntagsglocke)

Für die Sonntagsglocke lassen sich signifikante Periodizitäten bei 0,466 Hertz (Glockenschwingung) und 1,399 Hertz (Gebäudeantwort in der 3. Harmonischen) nachweisen. Die sichtbaren niederfrequenten Peaks ($< 0,1$ Hertz) stellen für die Analyse unbedeutende Resteinflüsse aus deterministischen Trendercheinungen dar.

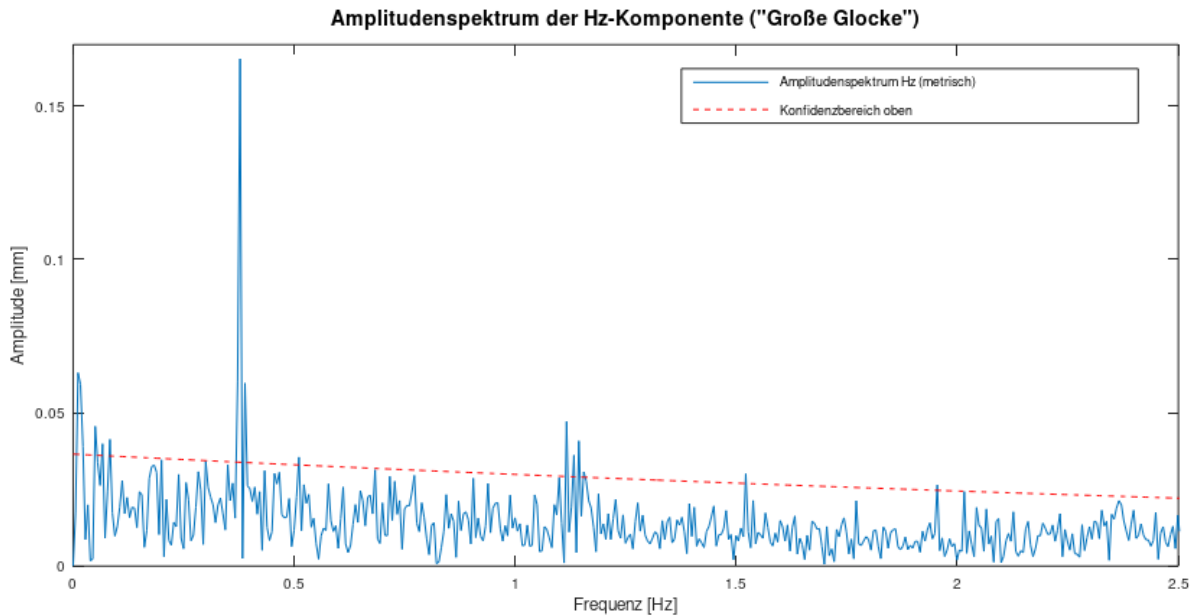


Abbildung 4-24: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Große Glocke)

Auch für die Große Glocke zeigt sich ein vergleichbares Bild. Die erste Teilschwingung bei 0,377 Hertz wird mit einer verstärkten Amplitude von 0,16 mm dargestellt; der Betrag der Gebäudeantwort bei 1,116 Hertz erscheint hingegen geringer, da sich die Amplitudenspitzen breitbandig aufteilen. Für das kombinierte Läuten der Sonntagsglocke und Großen Glocke können die einzelnen Lastfälle wieder gemeinsam nachgewiesen werden:

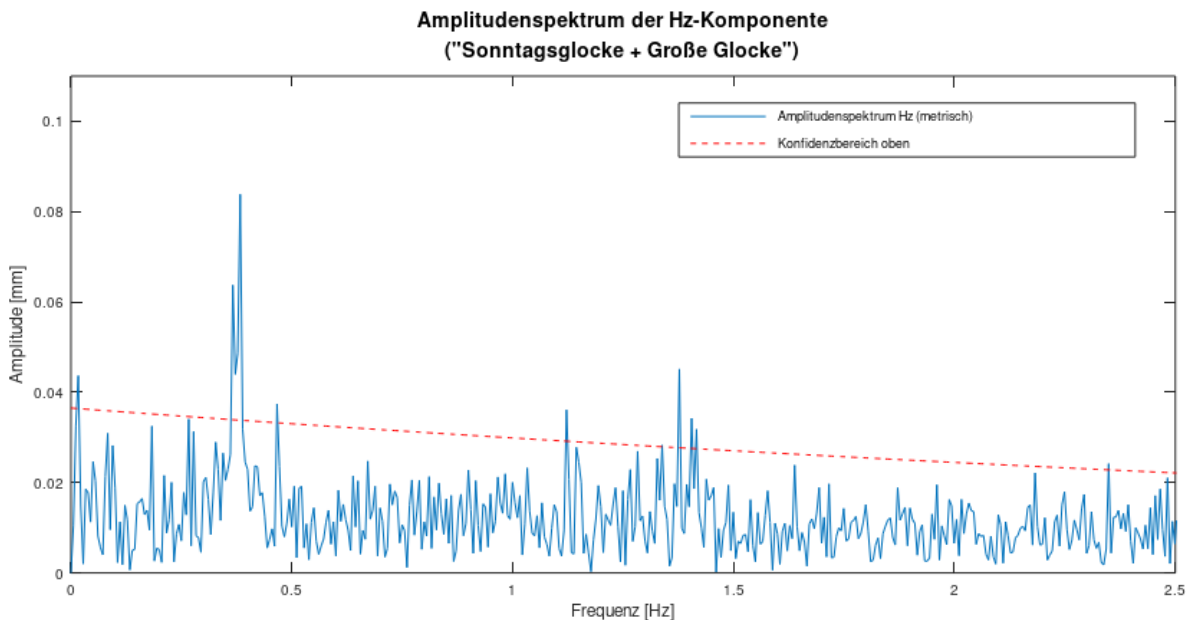


Abbildung 4-25: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Sonntagsglocke und Große Glocke)

Neigungsmessung:

Schon aus den Rohdaten der Neigungsmessung lassen sich Bewegungen während des Glockenläutens sowohl in Längs- als auch in Querrichtung erahnen. Dabei wird die a-priori-Genauigkeit der Neigung mit bis zu 14 Milligon (gemeinsames Läuten der Sonntagsglocke und Großen Glocke) angegeben.

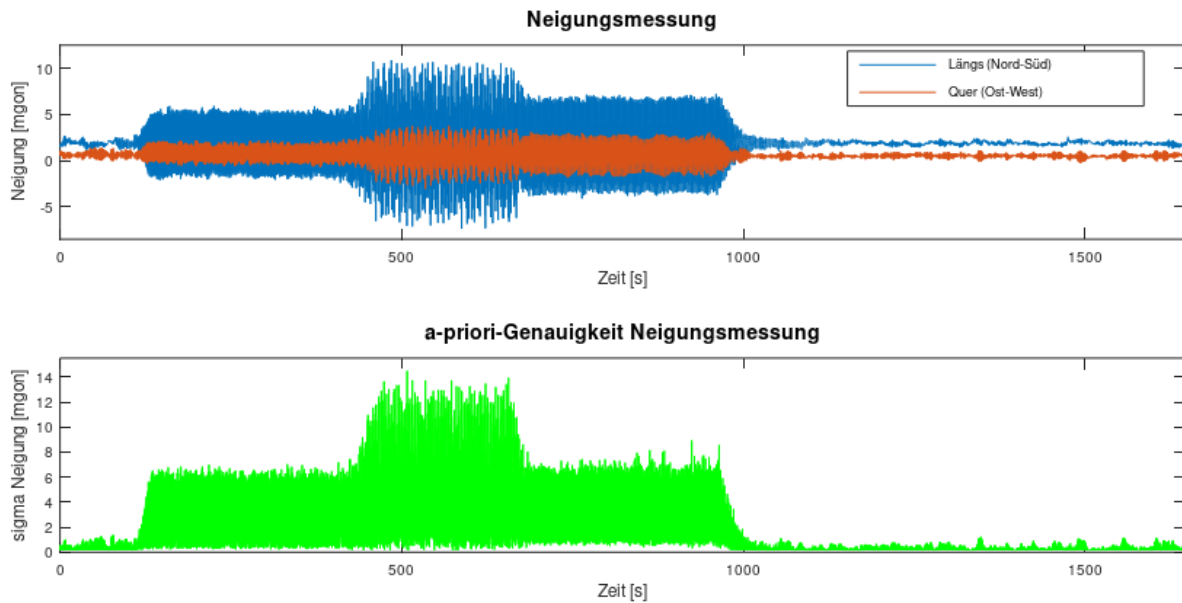


Abbildung 4-26: Messwerte der Neigungsmessung mit a-priori-Genauigkeit

Eine anschauliche Darstellung zu den Frequenzen im Zeitverlauf bietet die Analyse mit der Kurzzeit-Fouriertransformation. Aus der Abbildung 4-27 lässt sich der Läuteplan wiedergeben: Die Sonntagsglocke wurde von im Zeitfenster von 110 Sekunden für 9 Minuten (bis Sekunde 650) geläutet; ab Sekunde 430 kommt die Große Glocke für ebenfalls 9 Minuten (bis Sekunde 970) dazu. Dabei sind neben der Glockenschwingung insbesondere die dritten Harmonischen als Gebäudeantwort sichtbar:

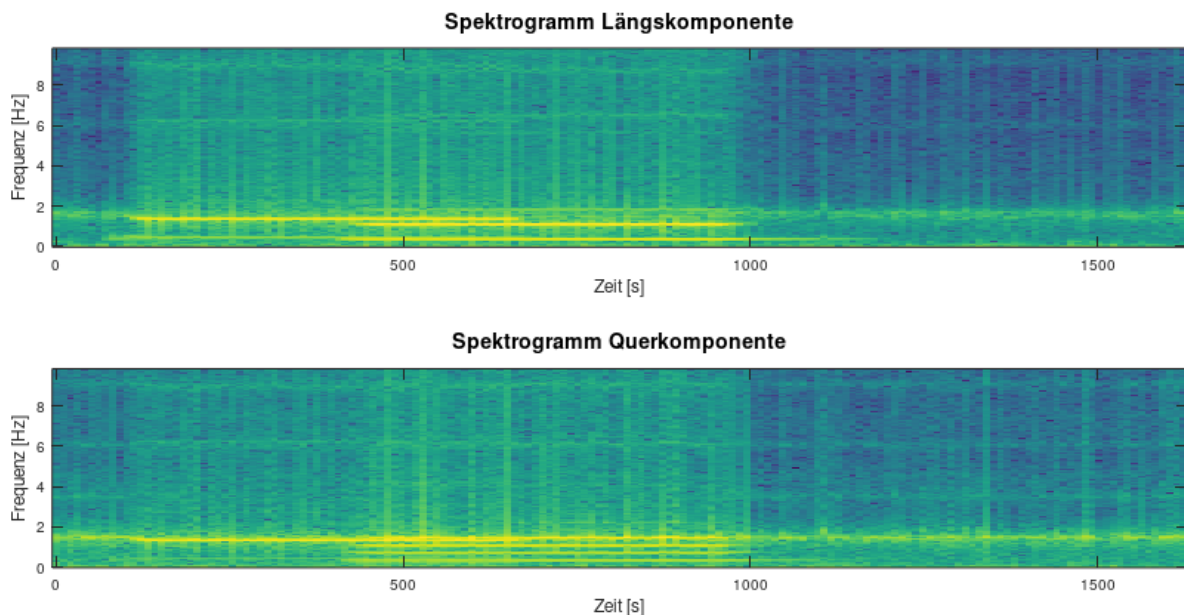


Abbildung 4-27: Spektrogramme der Neigungsmessung

Für die gleichen Zeitfenster wie bei der Richtungsmessung mit dem TS30 werden anschließend die Amplitudenspektren sowohl für die Längs- als auch für die Querkomponente berechnet. Aufgrund

der hohen Genauigkeit der Neigungsmessung treten die Peaks bei den jeweils gesuchten Frequenzen deutlich hervor und sind als signifikant zu bewerten:

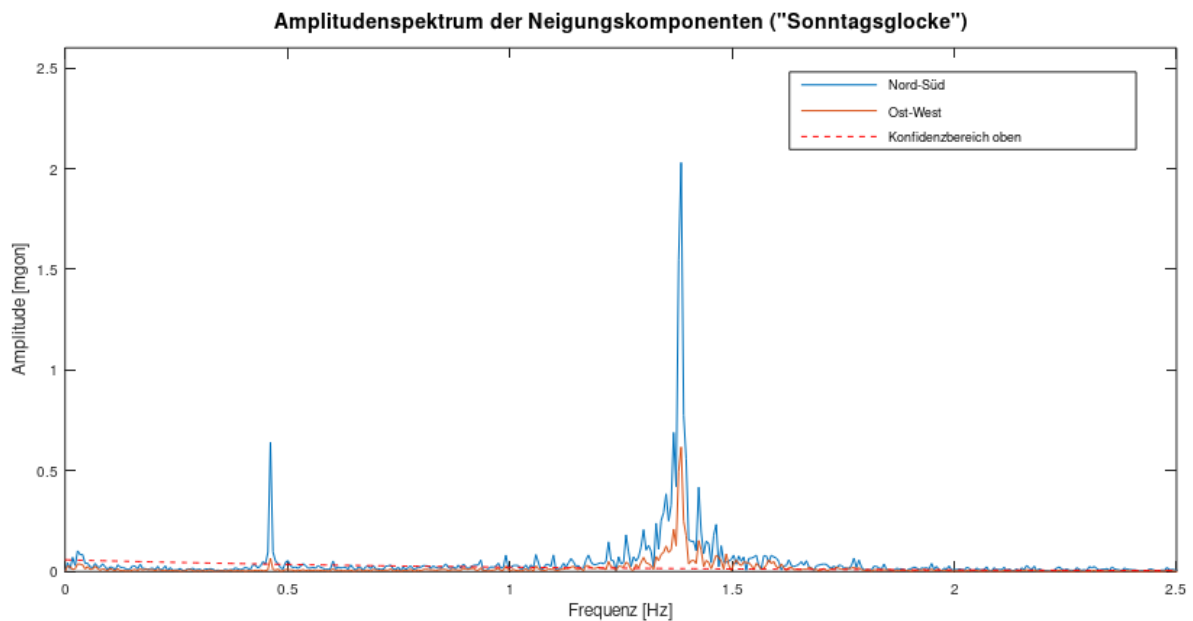


Abbildung 4-28: Amplitudenspektrum aus der Neigungsmessung (Sonntagsglocke)

Für die Sonntagsglocke lassen sich die Schwingfrequenz der Glocke mit 0,462 Hertz und die verstärkte Gebäudeantwort der dritten harmonischen Teilschwingung (1,386 Hertz) in beiden Komponenten nachweisen. Gleiches gilt auch für die Auswertung der Großen Glocke:

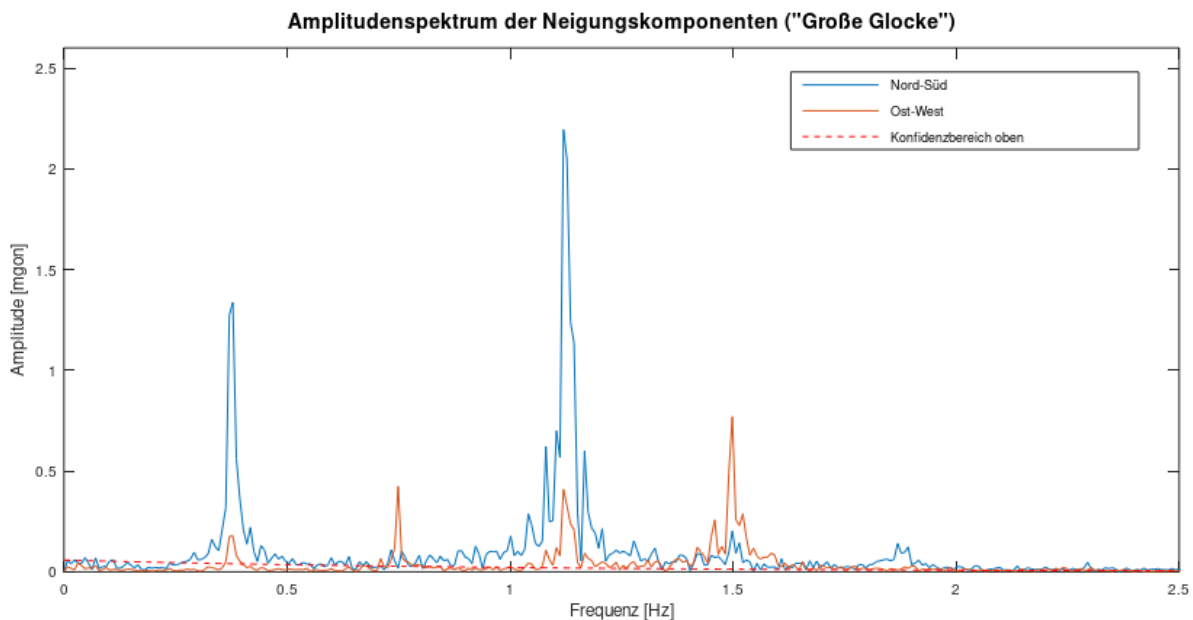
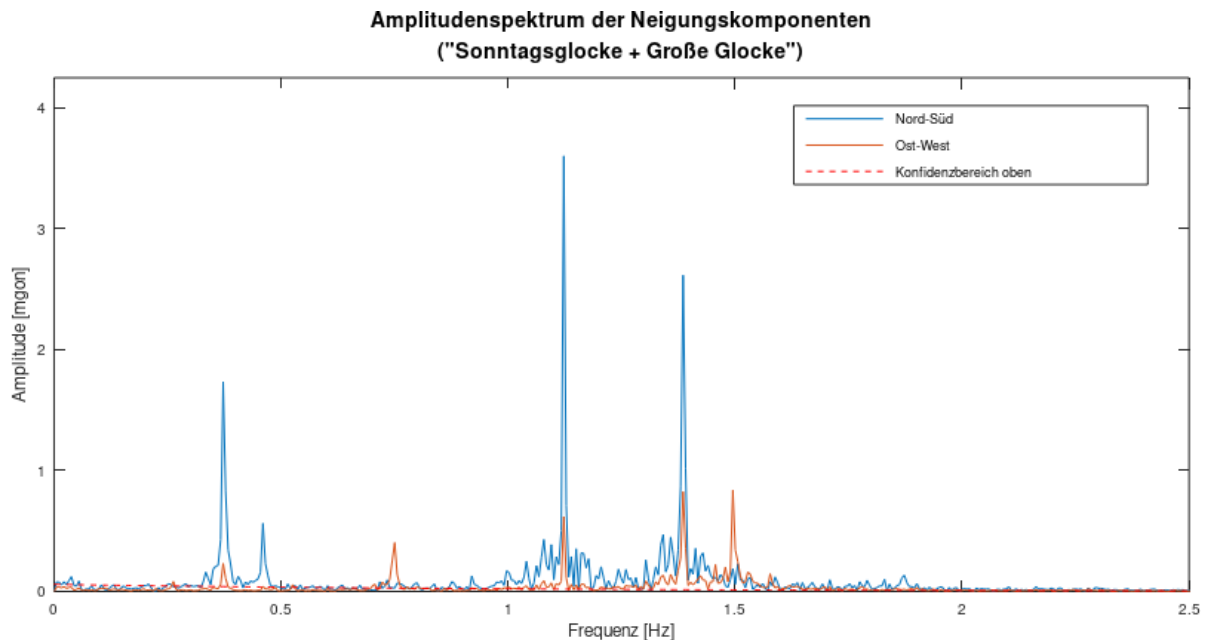


Abbildung 4-29: Amplitudenspektrum aus der Neigungsmessung (Große Glocke)

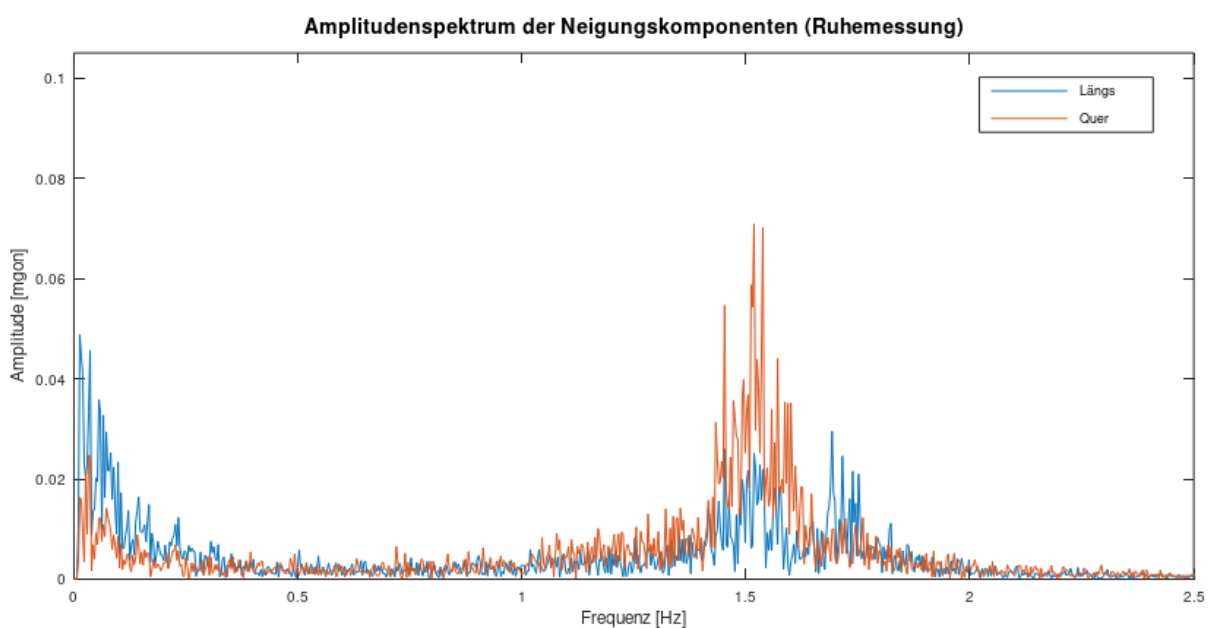
In Glockenschwingrichtung sind sowohl die erste Teilschwingung (0,378 Hertz) und die Gebäudeantworten mit Faktor 3 bei rund 1,12 Hertz sowie bei 1,86 Hertz (~ 5 . Teilschwingung) ersichtlich. Aus der Querkomponente lassen sich zudem Periodizitäten bei Faktor 2 und 4 ableiten,

welche vermutlich aus der vertikalen Lastkomponente stammen und in der Gebäudeantwort aufgrund der Nähe zur Turmeigenfrequenz verstärkt wiedergegeben werden.

Auch in der Kombination mehrerer Glocken stimmen die Frequenzen mit den Einzelmessungen überein, die Neigungsamplituden der Gebäudeantworten fallen hingegen größer als zuvor aus:



Weiterhin ist durch die hohe Sensitivität des Neigungssensors die näherungsweise Ermittlung der Eigenfrequenz möglich. Dazu wird ein Zeitfenster von 5 Minuten ohne Glockengeläut ausgewertet, wobei der Turm nur durch natürliche Einflüsse (Wind, Erschütterungen, ...) angeregt wird. Diese Effekte sind auch schon in den Spektrogrammen (Abbildung 4-27) ersichtlich.



In der Abbildung 4-31 sind im breitbandige Periodizitäten zwischen 1,40 bis 1,60 Hertz in der Ost-West-Richtung sowie 1,50 bis 1,60 Hertz und 1,65 bis 1,75 Hertz für die Nord-Süd-Komponente sichtbar. Im Frequenzbereich bis 0,25 Hertz liegen ebenfalls Periodizitäten vor, diese spiegeln jedoch wie auch bei der Richtungsmessung die restlichen deterministischen Anteile in der Zeitreihe wieder. Zudem ist es bemerkenswert, dass das Grundrauschen der Neigungsmessung zumeist weniger als 5 % der a-priori-Genauigkeit von 0,15 mgon beträgt.

Tabella 4-5: Ergebnisse der Richtungs- und Neigungsmessungen

	Sonntagsglocke	Große Glocke	Apostelglocke
Richtungsmessung mit Leica TS30 Fensterlänge je 3 min, Höhe Turmluken	(1.) 0,466 Hz; 0,039 mm (3.) 1,399 Hz; 0,060 mm	(1.) 0,377 Hz; 0,164 mm (3.) 1,116 Hz; 0,047 mm	(nicht gemessen)
Neigungsmessung mit Leica TM30 Fensterlänge je 3 min, Höhe Glockenboden	(1.) 0,462 Hz; 0,64 mgon (3.) 1,386 Hz; 2,03 mgon	(1.) 0,378 Hz; 1,34 mgon (3.) 1,120 Hz; 2,20 mgon (5.) 1,873 Hz; 0,14 mgon	(nicht gemessen)
	(1.) 0,462 Hz; 0,07 mgon (3.) 1,386 Hz; 0,61 mgon	(1.) 0,378 Hz; 0,18 mgon (2.) 0,749 Hz; 0,42 mgon (3.) 1,121 Hz; 0,41 mgon (4.) 1,50 Hz; 0,77 mgon	(nicht gemessen)

4.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Zusammenstellung der ermittelten Frequenzen zeigt ein sehr konsistentes Bild zwischen den Messverfahren. So liegen die Frequenzabweichungen der Peaks über alle Verfahren bei maximal 0,004 Hertz. Im Vergleich zu den berechneten Teilschwingungen aus den von (Köster, 2018) ermittelten Glockenschwingungen weichen die Ergebnisse um maximal 1 % bei der Richtungsmessung für die kleinste Glocke bzw. der Neigungsmessung der Großen Glocke ab:

Tabella 4-6: Vergleich der ermittelten Frequenzen für die 1. bis 5. Teilschwingung

	Sonntagsglocke [Hz]			Apostelglocke [Hz]			Große Glocke [Hz]		
	(1.)	(3.)	(5.)	(1.)	(3.)	(5.)	(1.)	(3.)	(5.)
	0,462	1,386	2,310	0,408	1,224	2,040	0,374	1,122	1,870
IMU	0,463	1,385	2,311	0,407	1,222	2,037	0,374	1,122	1,874
GNSS	0,463	1,389	-	0,407	1,222	-	0,374	1,122	-
Tachymetrie (Neigung)	0,462	1,386	-	n. g.	n. g.	n. g.	0,378	1,120	1,873
Tachymetrie (Richtung)	0,466	1,399	-	n. g.	n. g.	n. g.	0,377	1,116	-

Die Frequenzen der durch das Glockengeläut eingebrachten Schwingungen lassen sich grundsätzlich mit allen Messverfahren sicher analysieren; weiterhin ist mit der Darstellung im Zeit-Frequenz-Bereich als Spektrogramm sehr deutlich den Zusammenhang zwischen den geläuteten Glocken und den Antworten des Gebäudes (siehe Abbildung 4-11 und Abbildung 4-27) zu veranschaulichen.

Die Analyse auf Basis der Eigenschwingungen entsprechend DIN 4178 liefert für die jeweiligen Resonanzabstände r_{an} folgendes Ergebnis:

Tabelle 4-7: überschlägige Resonanzabstände der 3. und 5. Teilschwingung

$r_{an} = \left[\frac{f_{ni}}{f_e} - 1 \right] * 100;$ $ r_{an} \geq 10\%$	Sonntagsglocke $f_{n3} = 1,386 \text{ Hz}$ $f_{n5} = 2,310 \text{ Hz}$	Apostelglocke $f_{n3} = 1,224 \text{ Hz}$ $f_{n5} = 2,040 \text{ Hz}$	Große Glocke $f_{n3} = 1,122 \text{ Hz}$ $f_{n5} = 1,870 \text{ Hz}$
$f_{n3}; f_e \approx 1,50 \text{ Hz} - 1,60 \text{ Hz}$	$r_a \approx 7,6 \% - 13,4 \%$	$r_a \approx 18,4 \% - 23,5 \%$	$r_a \approx 25,2 \% - 29,9 \%$
$f_{n5}; f_e \approx 1,65 \text{ Hz} - 1,75 \text{ Hz}$	$r_a \approx 40 \% - 32 \%$	$r_a \approx 23,6 \% - 16,6 \%$	$r_a \approx 13,3 \% - 6,9 \%$

Das Kriterium, dass der Resonanzabstand größer als 10 Prozent sein sollte, kann für den Großteil der Fälle bestätigt werden. Lediglich die 3. Teilschwingung der Sonntagsglocke und die 5. Teilschwingung der Großen Glocke fallen zum Teil in diesen Grenzbereich - die dort vorliegenden vergleichsweise großen Amplituden im Spektrum sind somit grundsätzlich als plausibel zu erklären. Aufgrund der nur überschlägig ermittelten Turmeigenfrequenz soll jedoch auf weiterführende Frequenzanalysen im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden.

Die Amplituden sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da einerseits die Ergebnisse zumeist für unterschiedliche Messebenen vorliegen und andererseits die Neigungsmessung nicht direkt in das metrische Maß überführt werden kann. Die Ergebnisse der Amplituden von IMU und GNSS zeigen zumeist eine hohe Übereinstimmung. Bei der Richtungsmessung werden hingegen insgesamt höhere Amplituden ermittelt, wobei diese zwischen Einzel- und Vollgeläut noch voneinander abweichen:

Tabelle 4-8: Amplitudenvergleich der Schwingwege für die 1. bis 5. Teilschwingung auf Messebene 2

	Sonntagsglocke			Apostelglocke			Große Glocke		
	(1.)	(3.)	(5.)	(1.)	(3.)	(5.)	(1.)	(3.)	(5.)
IMU [mm]	-	0,036	0,002	0,045	0,043	0,003	0,100	0,044	0,008
GNSS [mm]	0,054	0,036	-	0,069	0,046	-	0,100	0,052	-
Tachymetrie (Hz) [mm]	0,039	0,060	-	n. g.	n. g.	n. g.	0,164	0,047	-

Die größten Amplituden werden im Bereich von 0,16 mm für die erste Teilschwingung bzw. 0,052 mm bei der dritten Teilschwingung aus der Richtungsmessung ermittelt. Die Umrechnung der maximalen Schwingwege in Schwinggeschwindigkeiten liefert somit maximale Werte von 0,39 mm/s bzw. 0,53 mm/s. Diese überschlägige Berechnung zeigt, dass der Orientierungswert nach DIN 4178

von 3,0 mm/s erheblich unterschritten wird. Die ermittelten Weg- und Geschwindigkeitsamplituden für die erste und dritte Teilschwingung sind in Abbildung 4-32 zusammengefasst:

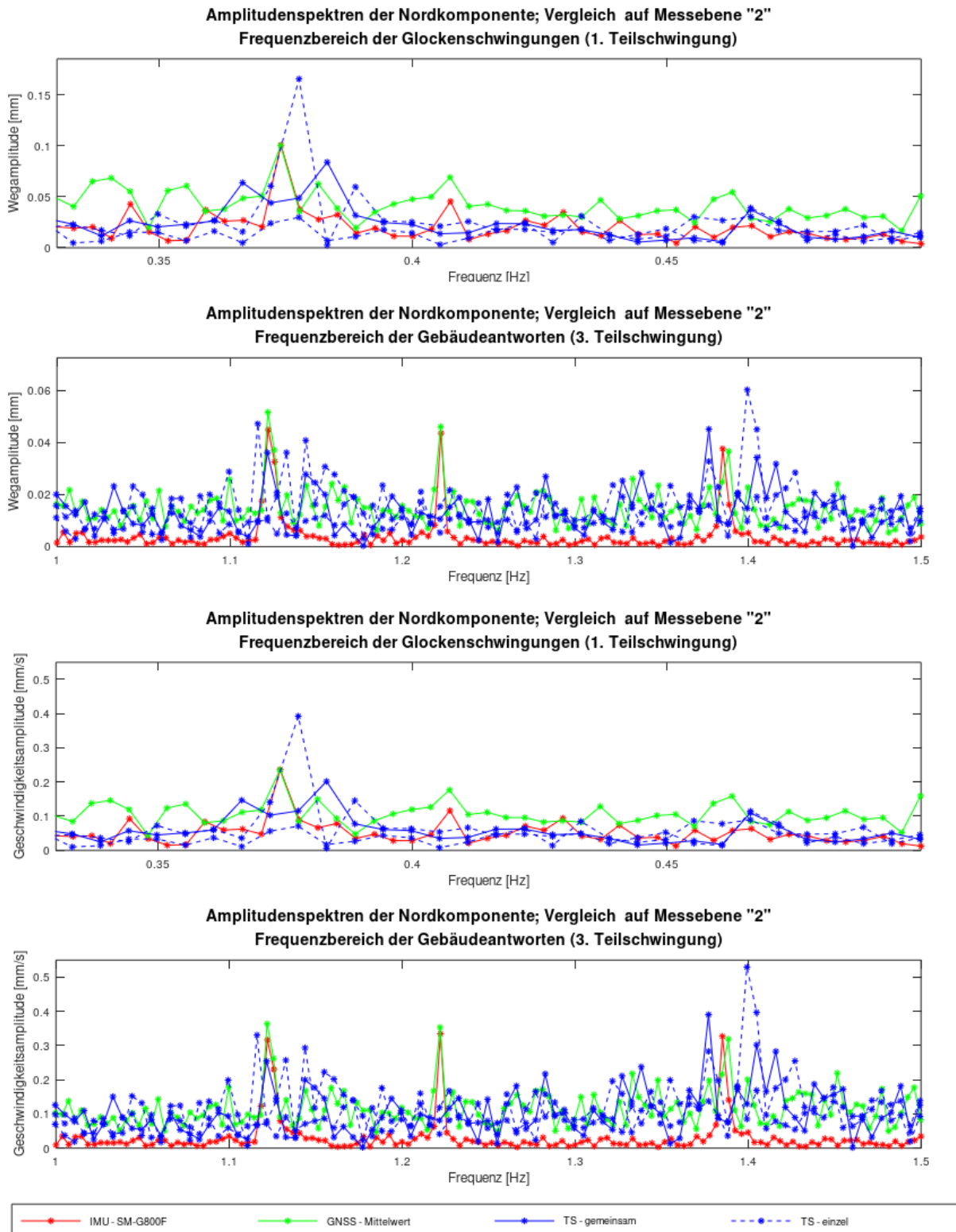


Abbildung 4-32: Weg- und Geschwindigkeitsamplituden für die 1. und 3. Teilschwingung auf Messebene 2

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann also zusammengefasst werden, dass die durch das Geläut verursachten Bewegungen am Turm der St.-Petri Kirche innerhalb der normativ vorgegebenen Grenzwerte liegen; das Messobjekt bietet darüber hinaus jedoch noch Potential für weitere Arbeiten.

5 Anwendung: Deformationen an Fußgängerbrücke

Als ein weiteres Messobjekt für die Durchführung von Vergleichsmessungen ergab sich eine Fußgängerbrücke. Auf dieser sind schon durch das Betreten leichte Schwingungen spürbar, welche durch weitere periodische Belastung gezielt erhöht werden können, sodass vertikal und quer zur Brückenachse deutliche Bewegungen sichtbar werden. Die Messung und Auswertung dieser im Verhältnis zur Messung an der St. Petri-Kirche größeren Amplituden mit den Smartphone-IMU's, dem kostengünstige GNSS-Messsystem und als Referenz per Richtungsmessung mit dem Leica TS30 sollen in diesem Abschnitt betrachtet werden. Dabei ist besonders zu beachten, dass die Schwingungen nun in kürzeren Zeitfenstern und mit wechselnder Intensität vorliegen, sodass die Zeitbereichsmittelung über die Fouriertransformation um zusätzliche Auswertungen ergänzt werden muss.

5.1 Übersicht

Das Messobjekt ist eine im Jahr 2000 errichtete Fußgängerbrücke, die mit einer Weite von 26 Metern den Fluss Tollense in Altentreptow überspannt. Konstruktiv besteht der Überbau aus zwei verbundenen und Doppel-T-Trägerprofilen und ist mit einer Verkleidung aus Holz versehen. Der Belag der 1,2 Meter breiten Trittlfläche und das 1,4 Meter hohe Geländer sind ebenfalls als Holzkonstruktion ausgeführt. Die Gesamtansicht der Brücke ist in Abbildung 5-1 enthalten:



Abbildung 5-1: Fußgängerbrücke über die Tollense

Für dieses Messobjekt soll an dieser Stelle nur auf die maximalen Amplituden während der Belastung

im Sinne des kinematischen Auswertemodells eingegangen werden; weiterführende Analysen zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und –moden benötigen ein umfassenderes Messkonzept.

5.2 Aufbau und Konfiguration des Messsystems

Die Draufsicht in Abbildung 5-2 zeigt schematisch die Anordnung der eingesetzten Sensoren:

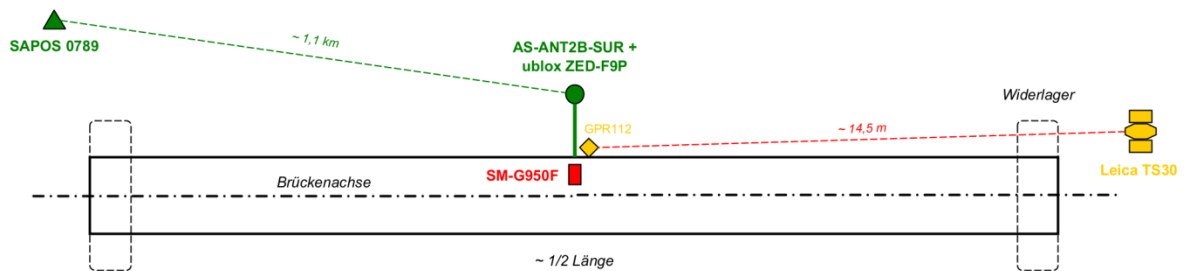


Abbildung 5-2: Messungsaufbau an der Fußgängerbrücke

Etwa auf der halben Brückenlänge ist unten an einem Geländerpfosten das GRP112-Prisma für die Richtungsmessung mit dem TS30 sowie an einer rund 70 Zentimeter ausragenden Halterung die Antenne des kostengünstigen GNSS-Messsystems befestigt. Direkt daneben befindet sich auf dem Belag das Samsung S8 für die Beschleunigungsmessung. Das Tachymeter steht in einer Entfernung von 14,5 Metern in grober Verlängerung der Brückenachse hinter dem Widerlager, sodass aus der Horizontalrichtung die Quer- und mit dem Vertikalwinkel die Höhenkomponente der Bewegungen erfasst werden kann. Für das GNSS-Postprocessing wird wie zuvor auf die Rohdaten der nun rund 1,1 Kilometer entfernten SAPOS-Referenzstation zurückgegriffen.

Die an der Brücke erfassten GNSS-Rohdaten weisen im Vergleich zur Kirche eine etwas bessere Qualität auf; größere Abschattungen und Mehrwegeeffekte oberhalb eines Elevationswinkels von 10° sind nur im Süden aufgrund des sich dort befindlichen Geländers zu erkennen:

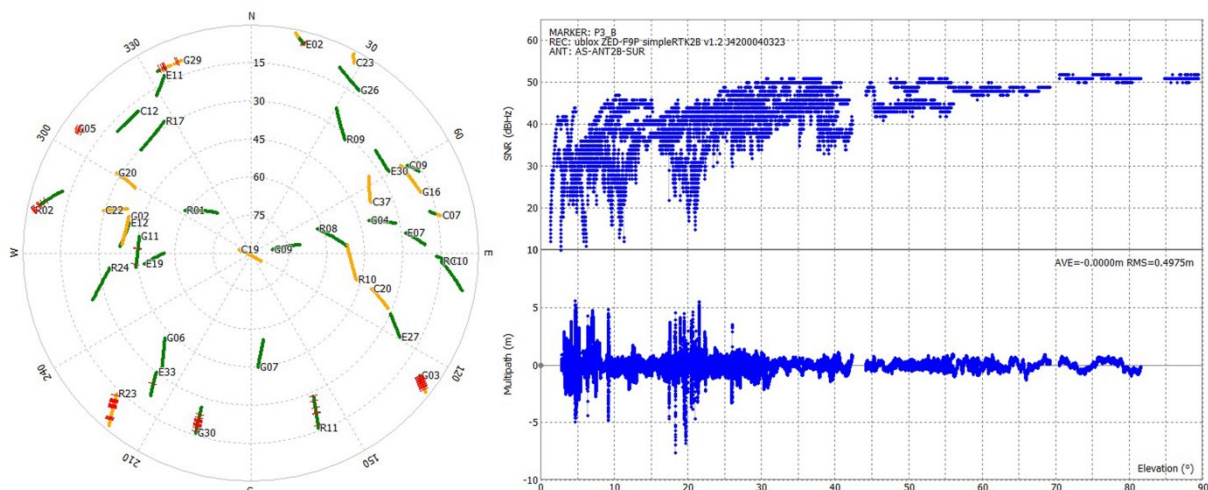


Abbildung 5-3: Skyplot und SNR/Multipath des GNSS-Empfängers an der Fußgängerbrücke

Die Konfiguration der Rohdatenaufzeichnung mit Phypox® für die Messung mit dem Smartphone und für die Erfassung der Richtungsmessung mit dem Leica TS30 erfolgten analog zu Abschnitt 4.2.2 .

Für das Postprocessing der GNSS-Rohdaten wird die gleiche Konfiguration wie bei der Messung an der St. Petri-Kirche (siehe Tabelle 4-3) genutzt; aufgrund der hohen Beschleunigungen wurde lediglich das Modell um Dynamiken („Rec Dynamics: ON“) erweitert. Die erforderlichen Werte für das Systemrauschen („Receiver Accel“) von $0,3 \text{ m/s}^2$ in der Horizontal- und $2,0 \text{ m/s}^2$ in der Vertikalkomponente entsprechen den maximal gemessenen Beschleunigungen vom Smartphone.

5.3 Auswertung und Vergleich der Ergebnisse

Die Rohdaten der inertialen Messeinheiten; den Tachymetern und dem kostengünstigen GNSS-Messsystem werden analog zu den vorherigen Auswertungen zusammengeführt und ereignisbasiert miteinander synchronisiert. Aus der gesamten Messdauer von rund 10 Minuten wird ein repräsentatives Zeitfenster von 60 Sekunden für die weiteren Betrachtungen ausgewählt. Aus der Beschleunigungsmessung lassen sich die periodischen Bewegungen in allen Achsen erkennen, wobei der Betrag der Amplitude über den Zeitverlauf nicht konstant verläuft:

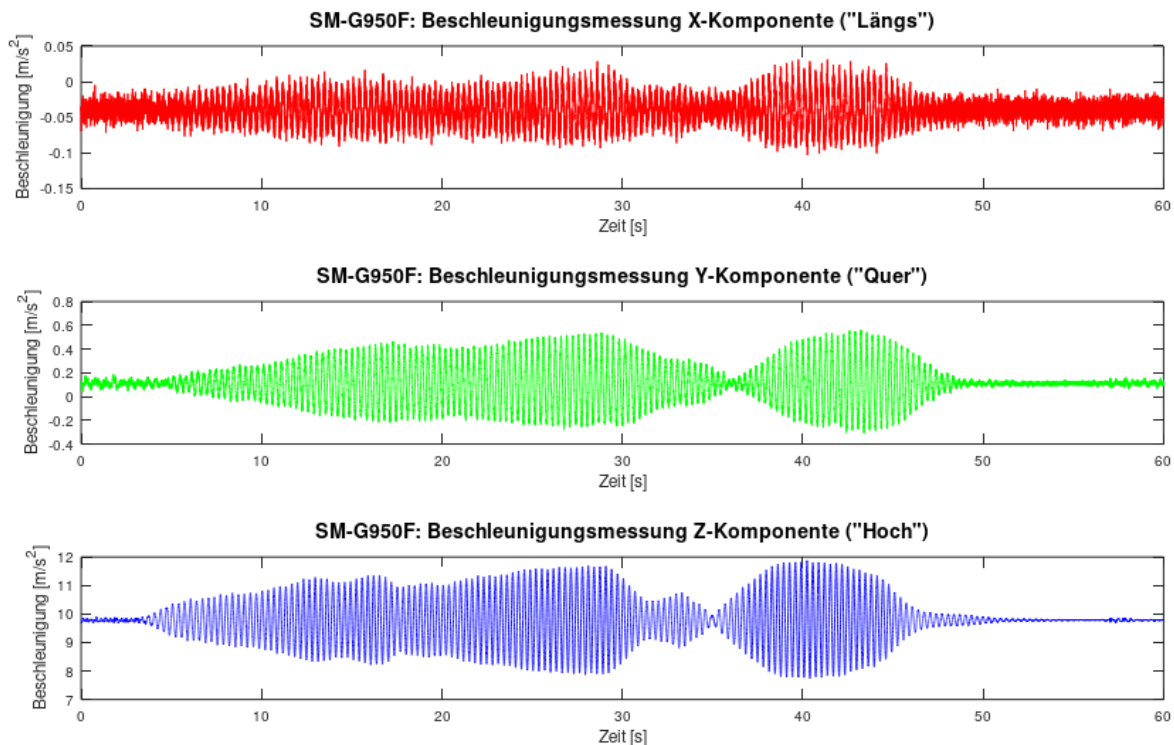


Abbildung 5-4: Rohdaten der Beschleunigungsmessung mit dem Samsung S8

Die prozessierten Basislinienkomponenten zeigen grundsätzlich ein ähnliches Bild, die Bewegungen in der Längsrichtung sind jedoch im Vergleich zur Beschleunigungsmessung nicht mehr sichtbar:

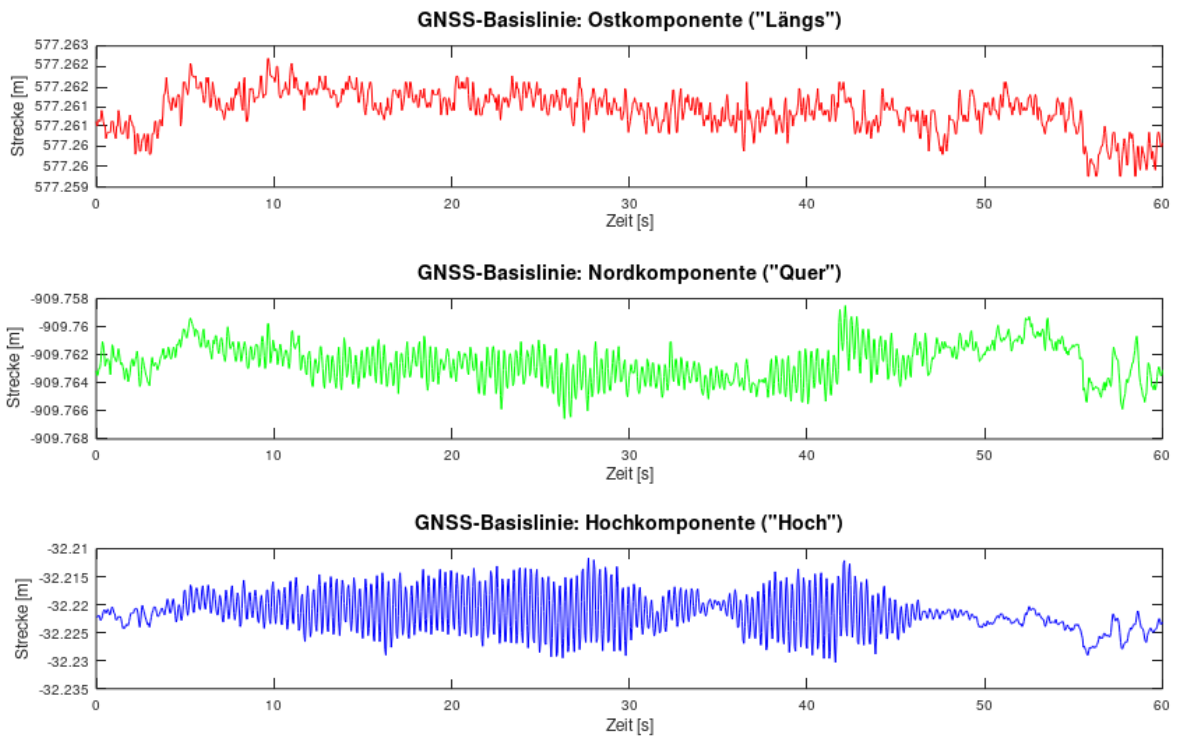


Abbildung 5-5: Basislinienkomponenten der GNSS-Messung

Mit den per GeoCOM ausgelesenen Richtungsmessungen aus dem Leica TS30 lassen sich hingegen nur die Bewegungen in der Quer- und Hochkomponenten erfassen:

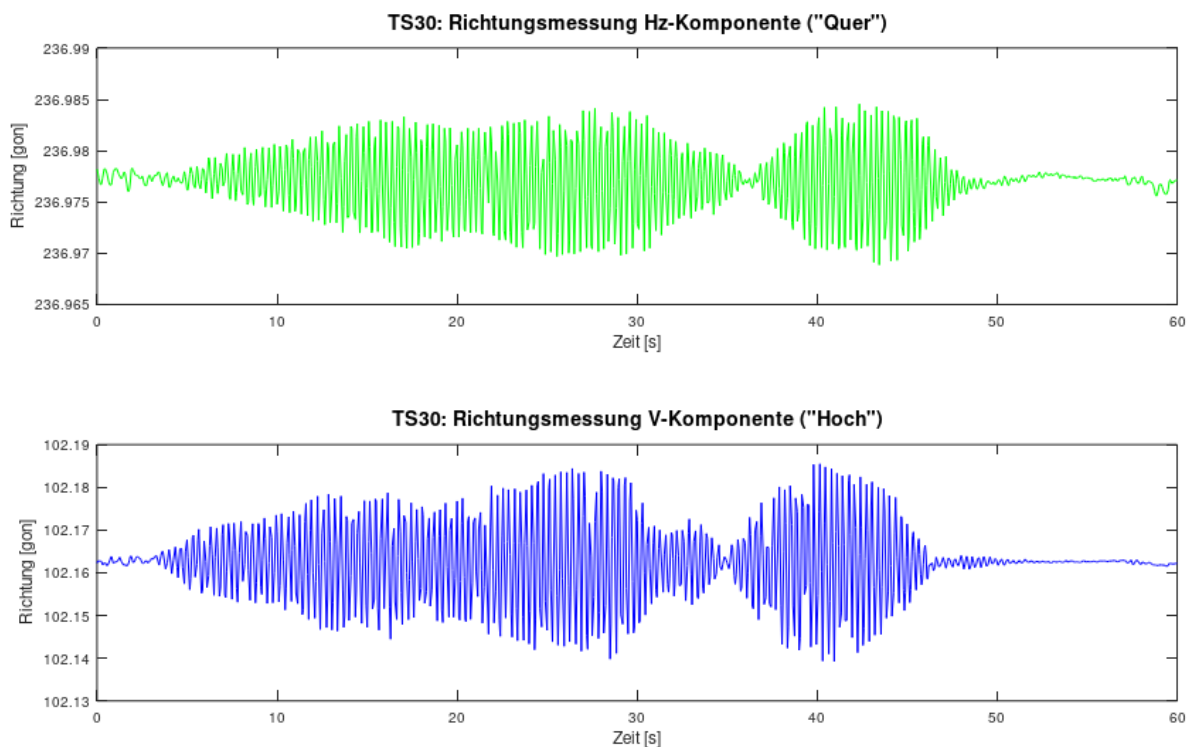


Abbildung 5-6: Rohdaten der Tachymetermessung

Schon anhand der Rohdaten aller Messverfahren können vorwiegend in der Quer- und Hochkomponente periodische Deformationen erkannt werden. Diese Periodizitäten lassen sich

anschaulich mit einem Spektrogramm analysieren, jedoch gestaltet sich aufgrund der kurzen Messdauer die optimale Darstellung in der Zeit-Frequenz-Auflösung als schwierig:

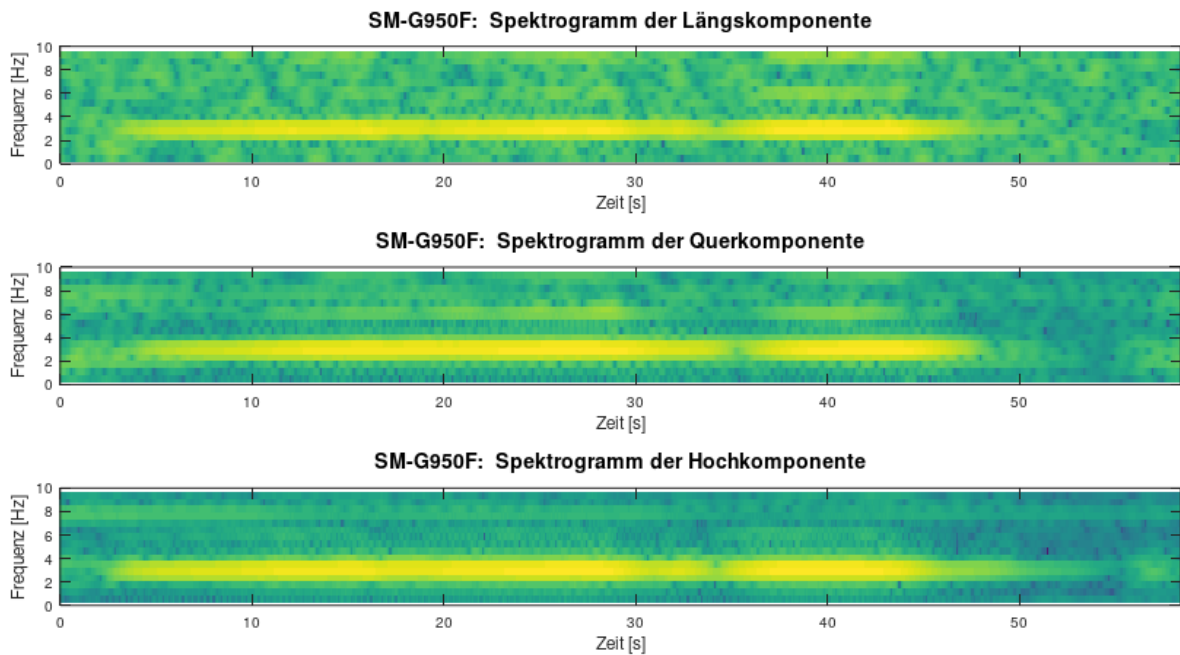


Abbildung 5-7: Spektrogramm der Beschleunigungsmessung

Aus dem Spektrogramm der Beschleunigungsmessung sind Periodizitäten im Frequenzbereich von 3 Hertz und teilweise auch für die dazugehörigen Oberschwingungen zu erkennen, welche in den Zeitfenstern von etwa 4 bis 34 Sekunden und 37 bis 47 Sekunden mit unterschiedlicher Intensität vorliegen.

Für die Auswertung mit der Autokorrelation wird das Zeitfenster von Sekunde 24 bis 29 ausgewählt, da hier optisch anhand der Rohdaten eine nahezu konstante Amplitude vermutet wird. Da die Abtastraten mit 500 Hertz bei der Beschleunigungsmessung gegenüber 20 bzw. 13,6 Hertz bei dem GNSS- und tachymetrischen Verfahren sehr unterschiedlich sind, ist auch die Auflösung der Autokorrelationsfunktionen und den dazugehörigen Amplitudenspektren verschieden, was bei der Interpretation berücksichtigt werden muss.

Die Autokorrelationsfunktionen der Beschleunigungsmessung liefert einen sehr „glatten“ Verlauf, wobei nach einer Zeitverschiebung von rund 0,32 Sekunden für alle Achsen ein lokales Maxima mit einem Korrelationskoeffizienten von jeweils 0,94 bei der Quer- und Hoch- und 0,83 bei der Längskomponente erreicht wird. Das entsprechende Amplitudenspektrum weist diese Periodizitäten mit signifikanten Peaks bei einer Frequenz von 3,2 Hertz nach, wobei sich aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten im Verhältnis zur Abtastrate die maximale Amplitude auf eine „breite Spitze“ verteilt (Leck-Effekt):

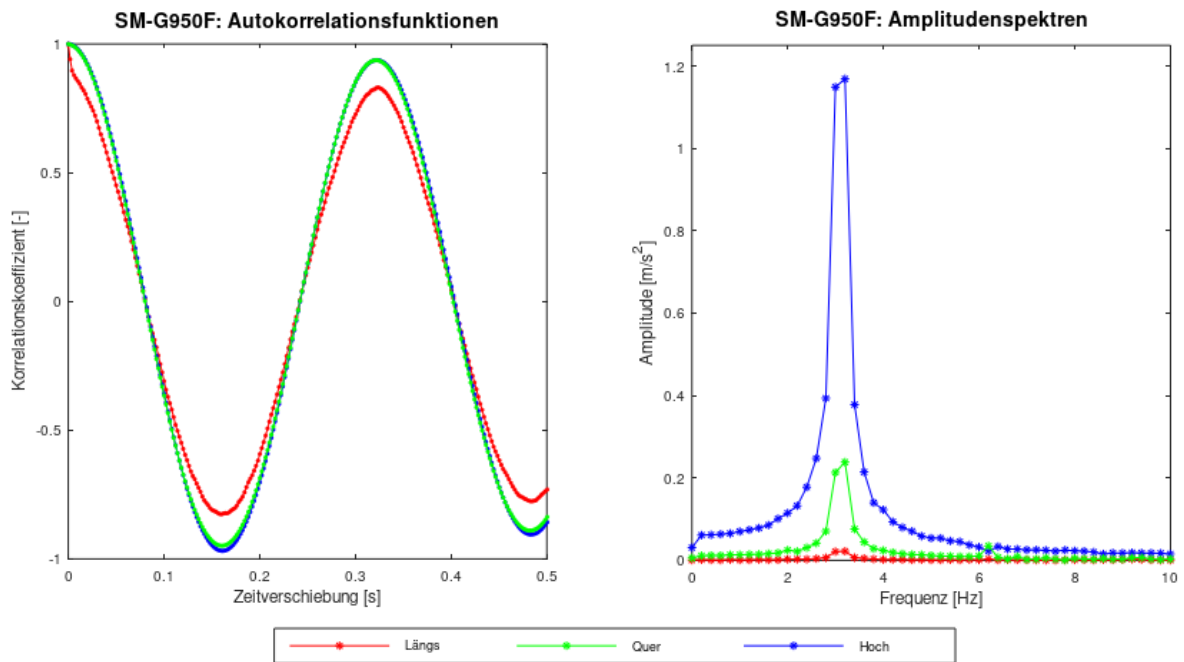


Abbildung 5-8: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der Beschleunigungsmessung

Analog dazu lassen sich auch aus den GNSS-Positionsunterschieden für das gewählte Zeitfenster die gleichen Periodizitäten für Bewegungen in der Quer- und Hochkomponente nachweisen; die Autokorrelationsfunktion bietet aufgrund der kleineren Abtastrate eine geringere Frequenzauflösung. Aus dem Amplitudenspektrum können weiterhin die Amplituden von 1,4 mm in Quer- und 6 mm in der Hochkomponente bei einer Frequenz von 3,17 Hertz ablesen werden:

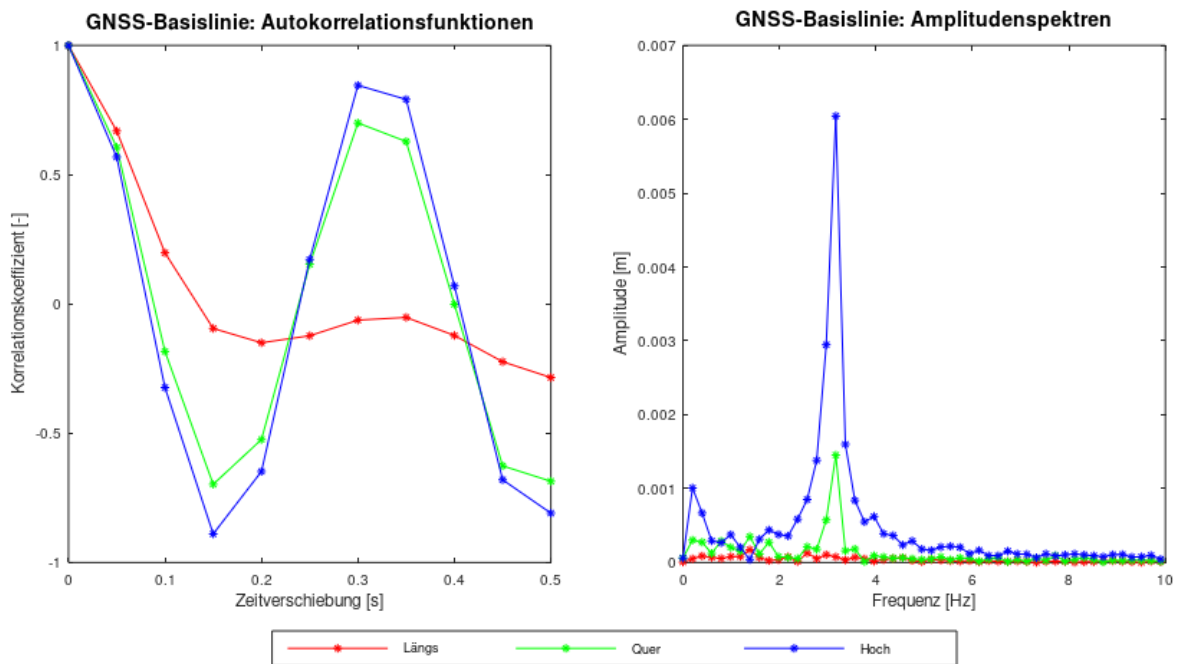


Abbildung 5-9: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der GNSS-Basislinienkomponenten

Die Ergebnisse der Richtungsmessung weisen aufgrund der Abtastrate von 13,6 Hertz eine noch geringere spektrale Auflösung bei den Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren auf. Die

Peaks bei 3,17 Hertz können dennoch mit einer Amplitude von 15,6 mgon in der Hoch- und 5,2 mgon in der Querkomponente nachgewiesen werden:

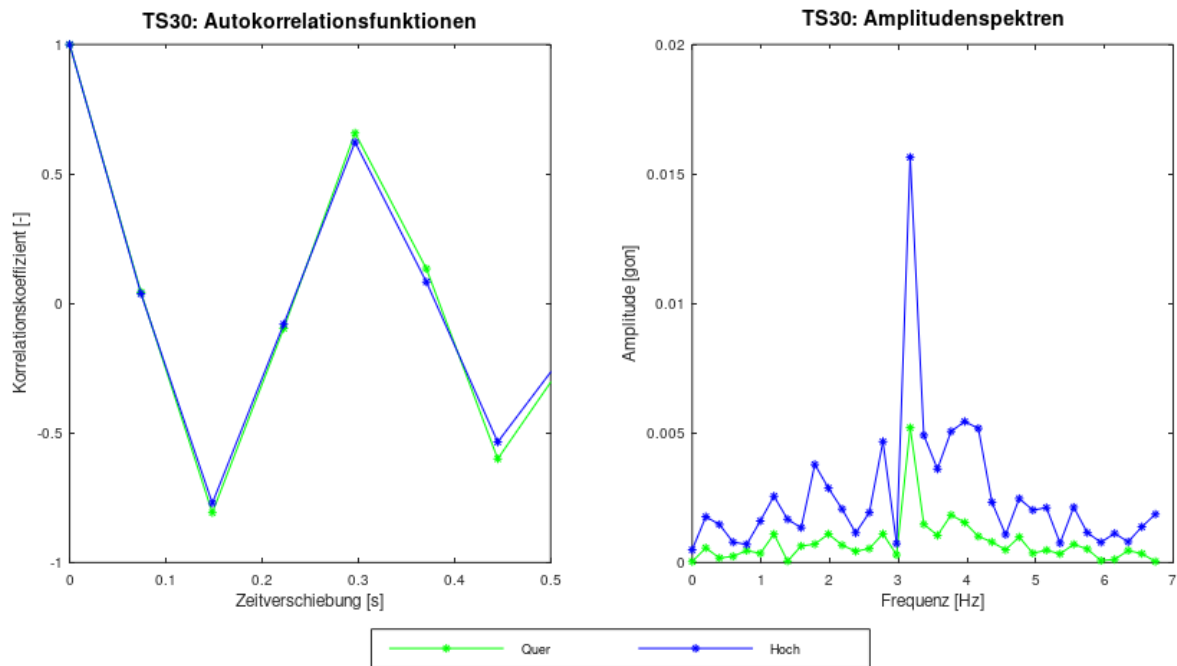


Abbildung 5-10: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der Richtungsmessung

Die Ergebnisse der Auswertungen im Zeit- und Frequenzbereich für die Bewegungskomponenten der einzelnen Messverfahren ist in Tabelle 5-1 zusammengefasst:

Tabelle 5-1: Auswertung aus Zeitfenster von 5 Sekunden

	IMU	GNSS	Totalstation
Auswertung im Zeitbereich: Autokorrelationsfunktion (Frequenz / Korrelationskoeffizient)			
Längs	3,08 Hz / 0,83	(2,86 Hz / -0,05*)	-
Quer	3,10 Hz / 0,94	3,33 Hz / 0,70	3,37 Hz / 0,66
Hoch	3,10 Hz / 0,94	3,33 Hz / 0,85	3,37 Hz / 0,62
Auswertung im Frequenzbereich: Amplitudenspektrum (Frequenz / Amplitude)			
Längs	3,199 Hz / 0,022 m/s ²	(*nicht signifikant)	-
Quer	3,198 Hz / 0,238 m/s ²	3,168 Hz / 0,0015 m	3,17 Hz / 0,0052 gon
Hoch	3,198 Hz / 1,169 m/s ²	3,168 Hz / 0,006 m	3,17 Hz / 0,0156 gon
Amplitude (L/Q/H) [mm]	0,05 / 0,59 / 2,90	- / 1,45 / 6,04	- / 1,18 / 3,55

Die anhand der Autokorrelation mit den verschiedenen Verfahren nachgewiesenen Frequenzen weichen bis zu 0,3 Hertz voneinander ab; wohingegen bei der Auswertung im Frequenzbereich die Abweichung untereinander maximal 1% beträgt. Die ermittelten Amplituden werden zur besseren Interpretation von den unterschiedlichen Einheiten in das metrische System überführt und sind in der untersten Tabellenzeile eingetragen. Hier zeigen sich erhebliche Differenzen insbesondere in der Hochkomponente, was durch die verminderte spektrale Auflösung und den Leck-Effekt verursacht

wird – so werden die Amplituden der Beschleunigung grundsätzlich zu klein erhalten als überschlägig aus den Rohdaten in Abbildung 5-4 abzuleiten ist.

Für den Vergleich der Amplituden soll daher eine weitere Analysemöglichkeit genutzt werden: Bei Schwingungsvorgängen mit bekannter Periodizität können mit Verfahren der numerischen Integration die Wege aus Beschleunigungen mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden, sofern die Eliminierung der langperiodischen Trends von den Datenreihen durch geeignete Verfahren möglich ist (Neitzel, et al., 2007). Die vorliegenden Daten werden daher mithilfe der Trapezformel zunächst zu Geschwindigkeiten und diese anschließend zu Wegen integriert, wobei jeweils der Trend über einen gleitenden Mittelwert mit Fensterlänge von 3 Sekunden bestimmt und von den Daten abgezogen wurde:

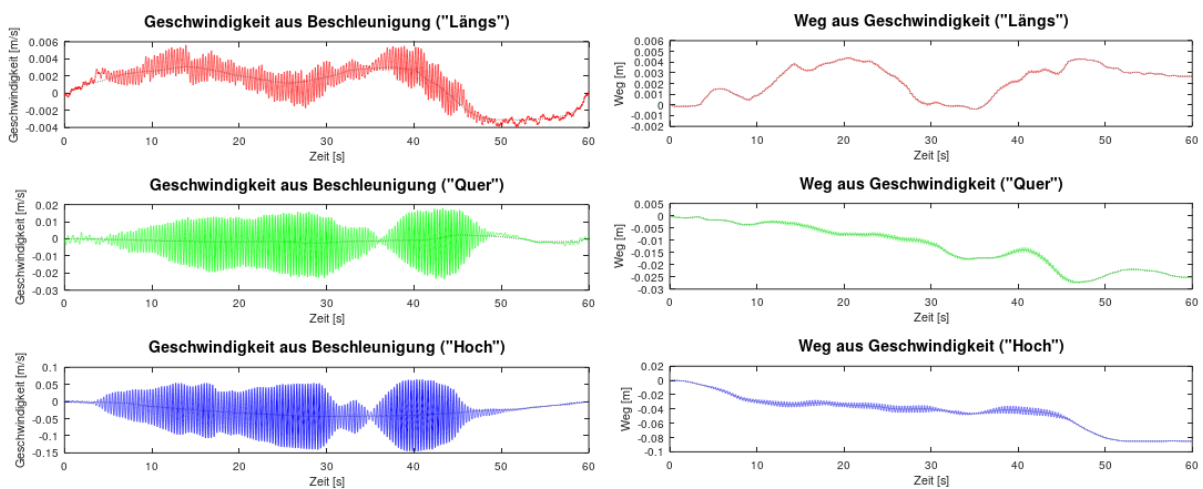


Abbildung 5-11: Integrierte Geschwindigkeiten und Wege aus der Beschleunigungsmessung

Der somit reduzierte Weg weist praktisch keine Tenderscheinungen mehr auf, wobei die Schwingungen dennoch in den Daten sichtbar bleiben:

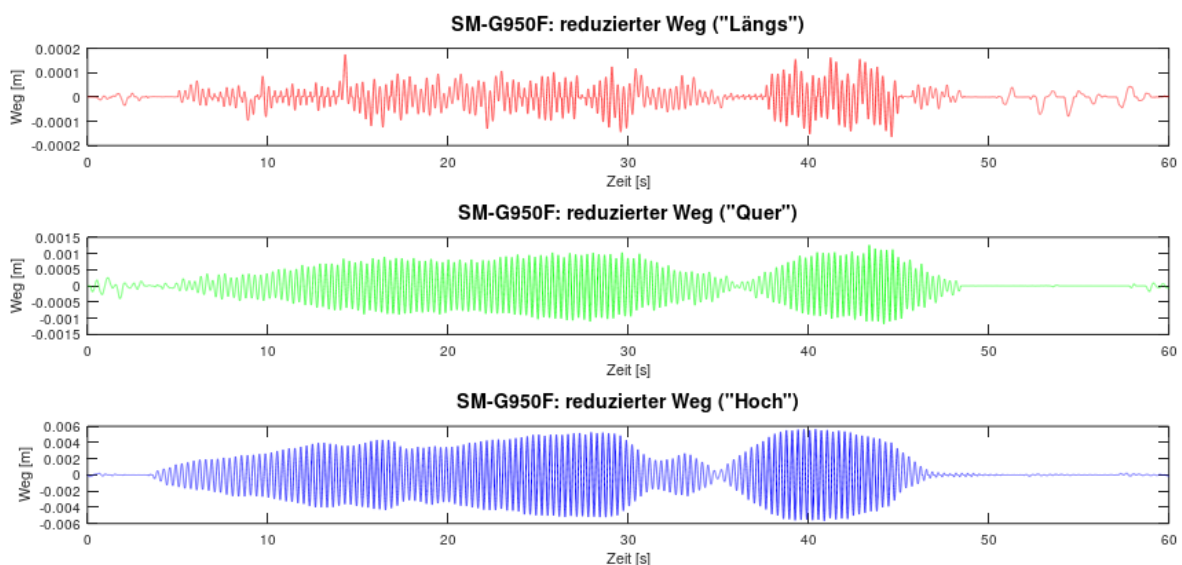


Abbildung 5-12: Integrierter und reduzierter Weg aus Beschleunigungsmessung mit Samsung S8

Aus der Darstellung der so umgerechneten Wege gemeinsamen mit den aus GNSS und Richtungsmessung abgeleiteten Amplituden wird die hohe Übereinstimmung der Schwingwege über den Zeitverlauf ersichtlich:

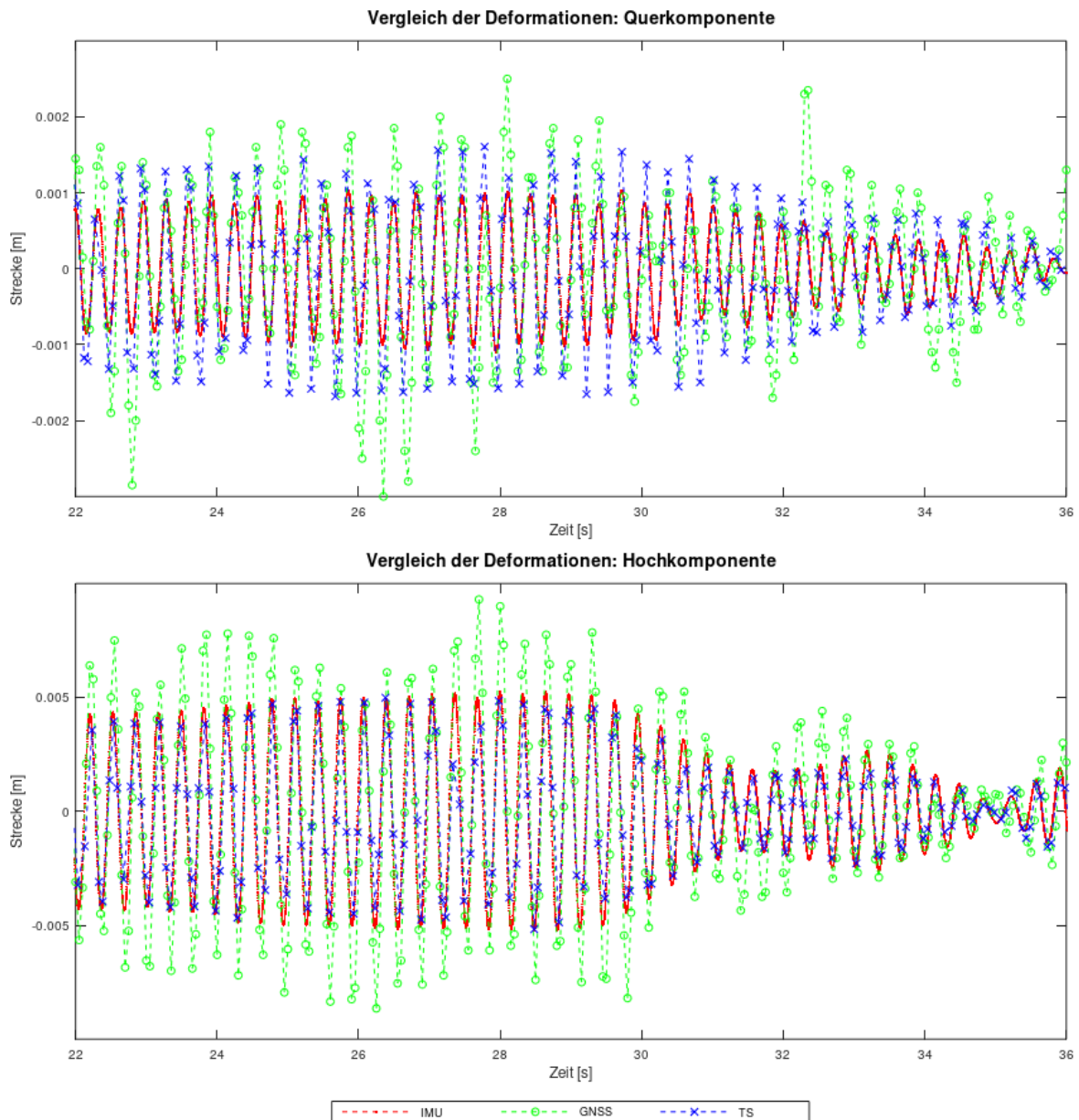


Abbildung 5-13: Vergleich der Schwingwege

Die aus Beschleunigungen abgeleiteten Wege weisen aufgrund der Abtastrate von 500 Hertz einen sehr stetigen Verlauf auf, wohingegen bei der Richtungsmessung insbesondere die Wendepunkte nicht immer erfasst werden können. Für die aus den GNSS-Basislinien abgeleiteten Positionsunterschiede zeigt sich ein ähnlicher Effekt, wobei die Daten insgesamt größere Amplituden sowie ein höheres Rauschen aufweisen. Daher werden eine bessere Vergleichbarkeit der Messreihen untereinander die Daten auf die gemeinsame Abtastrate von 40 Hertz interpoliert, sodass auch die Darstellung der Differenzen über den Zeitverlauf möglich ist. Außerdem sind für das gleiche Zeitfenster von 5 Sekunden wie zuvor bei Tabelle 5-1 die Amplitudenspektren aus den interpolierten

Datenreihen zusammengestellt. In der Querkomponente liegen die Differenzen zwischen IMU bzw. TS gegenüber GNSS zumeist unter 2 mm; zwischen IMU und TS sind die maximalen Differenzen von 1 mm insbesondere in der Bewegung ersichtlich:

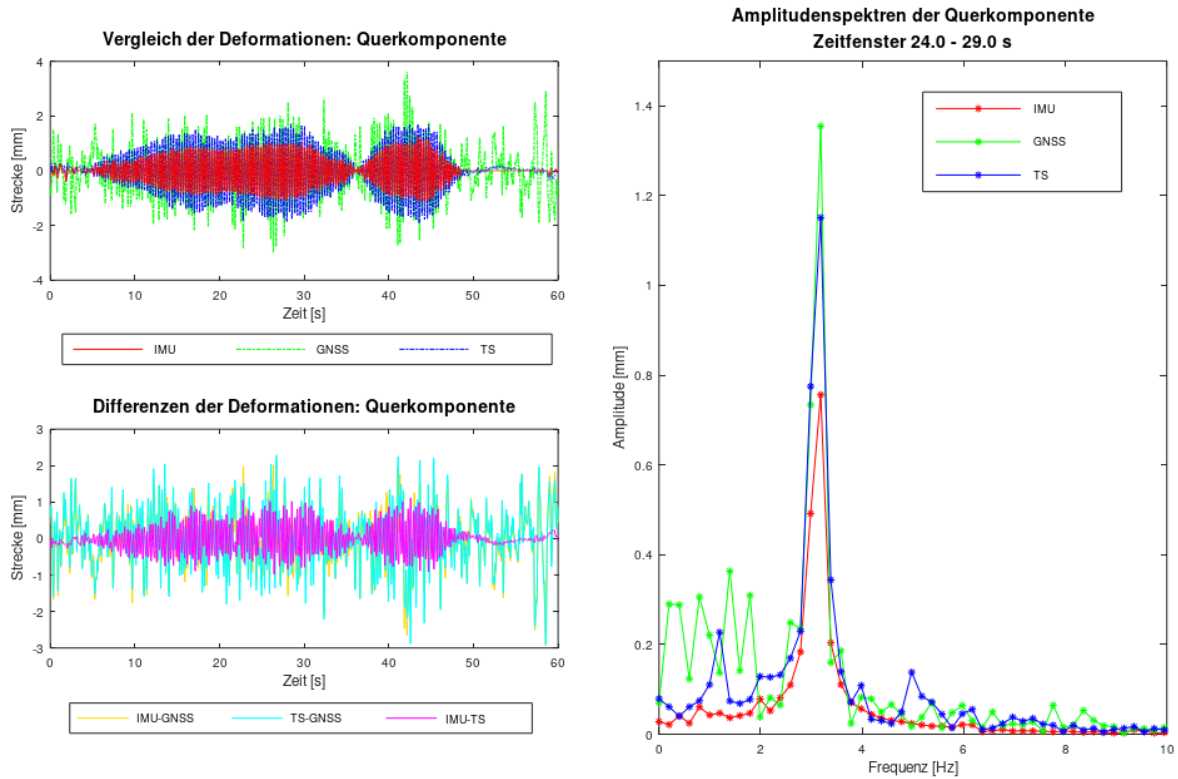


Abbildung 5-14: Interpolierte Zeitreihen, Differenzen und FFT-Auswertung der Querkomponente

Für die Hochkomponenten zeigt sich ein vergleichbares Bild, wobei die Differenzen noch größer sind:

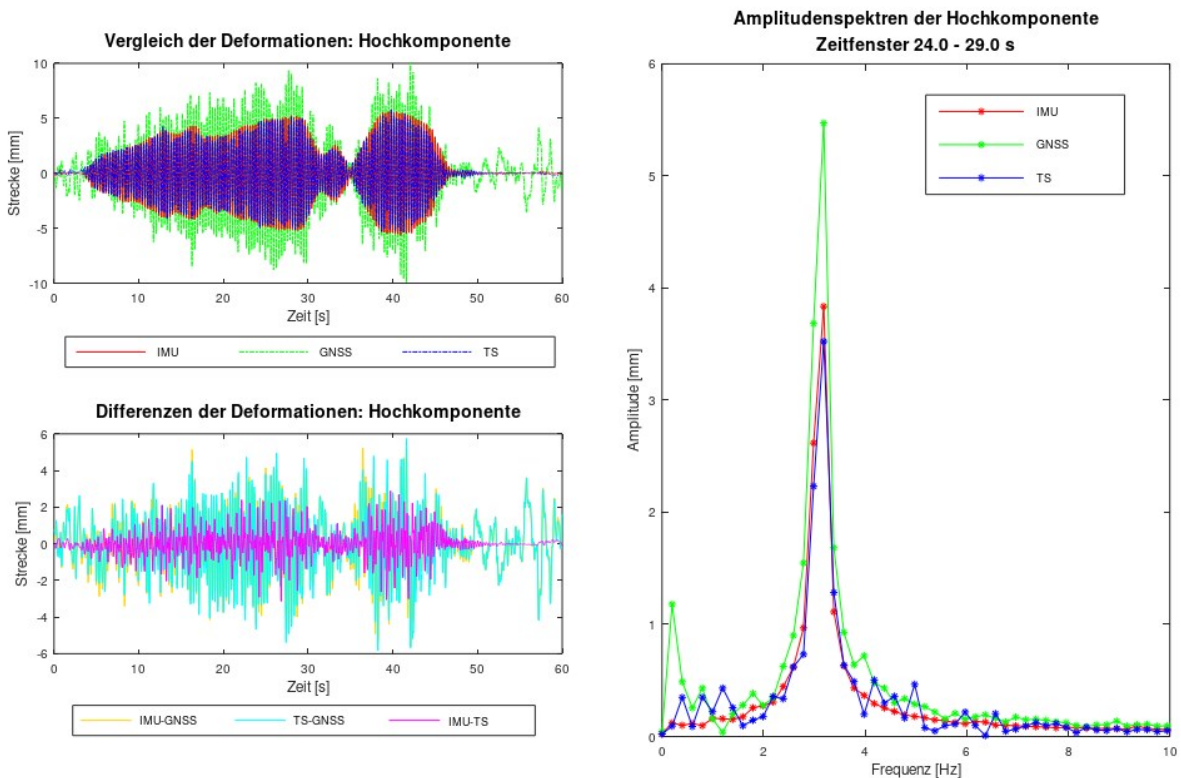


Abbildung 5-15: Interpolierte Zeitreihen, Differenzen und FFT-Auswertung der Hochkomponente

Die Differenzen zwischen den Messverfahren fallen besonders während der Bewegung relativ groß aus, da diese durch Restabweichungen in der Synchronisierung und Interpolation beeinflusst werden. Durch die Fouriertransformation der interpolierten Daten kann jedoch eine Zeitbereichsmittelung erreicht werden, sodass bei den Amplitudendifferenzen zwischen IMU und Tachymetrie der Betrag von 0,4 mm nicht überschritten wird. Wie auch aus den Rohdaten ersichtlich sind die Amplituden aus den GNSS-Positionsunterschieden besonders in der Höhenkomponente größer, was vermutlich aufgrund der Antennenmontage an den auskragenden Halterungen zurückzuführen ist.

Da es sich im betrachteten Zeitraum um eine einzelne Harmonische Schwingung handelt, ist weiterhin die Bestimmung der zyklischen Parameter im vermittelnden Ausgleichsmodell möglich. Die erforderlichen Näherungswerte können im vorliegenden Fall direkt aus den Zeitreihen abgelesen werden; der notwendige Formelapparat wurde aus (Foppe, et al., 2014) entnommen. In Abbildung 5-16 sind beispielhaft die (interpolierten) Beobachtungen der aus Richtungsmessung abgeleiteten Bogenlängen sowie die genäherten und ausgeglichenen Unbekannten für die Schwingung der Hochkomponente dargestellt:

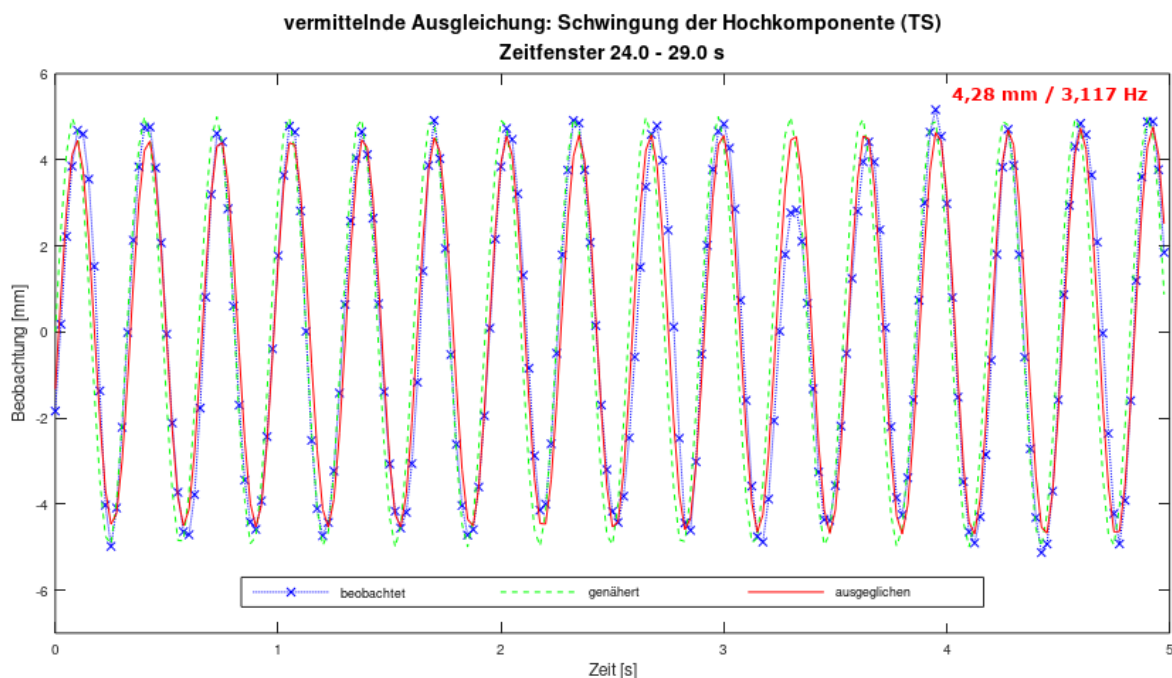


Abbildung 5-16: Berechnung der Schwingungsparameter mit vermittelnder Ausgleichung (Totalstation; Hochkomponente)

Die anhand der vermittelnden Ausgleichung berechnete Auslenkung besitzt einen im Vergleich zur FFT-Auswertung größeren Betrag, da im Ausgleichsmodell nur die Amplitude als Unbekannte geschätzt werden muss und somit kein Leck-Effekt aufgrund der kurzen Beobachtungsdauer auftritt. Weiterhin wird auch die Frequenz direkt geschätzt, sodass die begrenzte spektrale Auflösung im Amplitudenspektrum keinen Einfluss hat.

Die Ergebnisse der Amplituden für die Quer- und Hochkomponente mit den dazugehörigen Frequenzen aus der Fouriertransformation und der vermittelnden Ausgleichung sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst:

Tabelle 5-2: berechnete Amplituden und Frequenzen aus FFT-Auswertung und vermittelnder Ausgleichung

	Querkomponente		Hochkomponente	
	FFT	Ausgleichung	FFT	Ausgleichung
IMU	3,18 Hz 0,75 mm	3,117 Hz 0,94 mm	3,18 Hz 3,84 mm	3,112 Hz 4,90 mm
GNSS	3,18 Hz 1,35 mm	3,116 Hz 1,53 mm	3,18 Hz 5,47 mm	3,111 Hz 6,36 mm
Totalstation	3,18 Hz 1,15 mm	3,112 Hz 1,30 mm	3,18 Hz 3,52 mm	3,117 Hz 4,28 mm

Die Peaks werden aufgrund der identischen Abtastraten nun bei einer gemeinsamen Frequenz von 3,18 Hertz dargestellt. Aufgrund des kurzen Zeitfensters ist die spektrale Auflösung auf 0,2 Hertz begrenzt, sodass der Betrag der Amplituden wie bereits angemerkt vom Leck-Effekt beeinflusst wird. Für den vorliegenden Fall bei nur einer Schwingung und einem kurzen Beobachtungszeitfenster liefert daher die vermittelnde Ausgleichung genauere Ergebnisse.

In Übereinstimmung mit den Darstellungen im Zeitbereich (umgerechnete Deformationen) lässt sich zusammenfassen, dass die ermittelten Amplituden des Brückenkörpers für den Zeitraum der Messung etwa 1,5 mm in der Quer- und 5 mm in der Höhenkomponente nicht überschreiten. Da diese zyklischen Belastungen mit einer Frequenz von 3,1 Hertz jedoch bewusst auf das Messobjekt übertragen wurden, stellen sie die obere Grenze der praktisch erreichbaren Deformationen dar, sodass im normalen Betriebszustand die Bewegungen als deutlich geringer anzusetzen sind. Weiterführende Untersuchungen an diesem Messobjekt erfordern daher zunächst eine Bestimmung der Eigenfrequenz und zur Erfassung der Eigenmoden noch zusätzliche Messstellen.

6 Fazit und Ausblick

Anhand der praktischen Überwachungsmessungen konnte gezeigt werden, dass sowohl mit dem vorgestellten low-cost GNSS-Messsystem als auch mit den MEMS-Beschleunigungssensoren aus Smartphones der Nachweis hochfrequenter Bauwerksdeformationen mit Beträgen bis in den Submillimeterbereich möglich ist. Die Ergebnisse wurden dabei mit herkömmlichen geodätischen Methoden der Richtungs- und Neigungsmessung verifiziert. Eine Bewertung der verwendeten Messverfahren hinsichtlich ausgewählter Eigenschaften wird in Tabelle 6-1 vergleichend dargestellt und anschließend erläutert:

Tabelle 6-1: Bewertung der verwendeten Messsysteme

	low-cost GNSS	Smartphone-IMU	Totalstation	
			Richtung	Neigung
Einrichtungsaufwand	-	++	±	+
Bedienung	+	++	+	+
Zeitstempel / Äquidistanz	++ ++	± +/(++)	± ±	± ±
Sensitivität (Frequenz / Amplitude)	++ +	+ +	± -	+ +
Auswertung	±	+	+	+
Kosten	+	++	--	--
Legende der Eigenschaften: ++ sehr positiv; + positiv; ± neutral; - negativ; -- sehr negativ				

Das vorgestellte low-cost GNSS-Messsystem wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmals im praktischen Einsatz auch unter schwierigen Empfangsbedingungen getestet. Für eine kurzzeitige Einzelmessung ist der Aufbau und Konfiguration des Systems als relativ komplex zu bewerten, nach der einmaligen Einrichtung arbeitet es jedoch weitestgehend autonom und könnte auch im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Die Bedienung des Systems über die freien Software RTKLIB mit dessen vielfältigen Schnittstellen und Visualisierungsmöglichkeiten sind positiv hervorzuheben. Als besonders vorteilhaft ist einheitliche Synchronisation und Abtastrate aller beteiligten Empfänger zu bewerten, welche die Auswertung mit den Werkzeugen der Zeitreihenanalyse erleichtert. Somit kann eine hohe Sensitivität der Frequenzauflösung erreicht werden, wohingegen die Angabe von signifikanten Amplituden maßgeblich vom Umfang des Messrauschens und von der Stabilität der Antennenhalterungen abhängig ist. Der Auswertumfang ist aufgrund des komplexen Datenflusses, dem zusätzlichen Postprocessing und der teilweise schwierigen Trendbeseitigung als neutral zu

bewerten; mit der möglichen Echtzeitauswertung könnte der Aufwand jedoch deutlich reduziert werden. Je nach Zubehör und Konfiguration ist ein solches Messsystem schon ab etwa 300 Euro erhältlich und damit erheblich günstiger als vergleichbare kommerzielle GNSS-Überwachungslösungen.

Der Einsatz von Smartphones oder anderen Mobilgeräten als Messmittel zur Erfassung hochfrequenter Schwingungen erfordert nur einen sehr geringen Einrichtungsaufwand. Nach Installation und Konfiguration einer geeigneten Anwendung kann praktisch jedes Endgerät flexibel und ohne zusätzliche Vorbereitungen eingesetzt werden. Die Bedienung per Touchscreen ist dabei anwenderfreundlich und weitestgehend selbsterklärend, eine Messung ist somit auch durch ungeübte Bediener möglich. Der absolute Zeitstempel der verwendeten Mobilgeräte besitzt jedoch nur eine Genauigkeit von einigen Sekunden, sodass für höhere Anforderungen z.B. die ereignisbasierte Synchronisierung der einzelnen Messreihen notwendig ist. Die Äquidistanz ist zumeist als gut zu bewerten, wobei insbesondere Geräte der höheren Preisklasse eine etwas stabile Abtastrate aufweisen. Weiterhin ist aus den Beschleunigungsmessungen der direkte Nachweis von Periodizitäten in einem breiten Spektrum bis zur Nyquistfrequenz möglich; bei der Umrechnung in Geschwindigkeiten oder Wege wird jedoch das Rauschen im niederfrequenten Bereich verstärkt. Für kurze Beobachtungszeiträume ist die Bestimmung von Amplituden auch durch die doppelte numerische Integration der gemessenen Beschleunigungen möglich, es muss dabei jedoch besonderes Augenmerk auf die Trendbeseitigung z.B. durch einen gleitenden Mittelwert gelegt werden. Die Auswertung ist im Vergleich zu den GNSS-Messungen weniger umfangreich, da die erforderlichen Rohdaten für die Auswertung direkt nach dem Export vorliegen. Da die erforderliche Hardware oftmals unkompliziert zur Verfügung steht und die vorgestellte Anwendung zur Rohdatenaufzeichnung werbe- und kostenfrei erhältlich ist, können Messungen ohne zusätzliche Kosten durchgeführt werden.

Die im Rahmen der Vergleichsmessung verwendeten Totalstationen zur Richtungs- und Neigungsmessung haben sich ebenfalls bewährt, sie weisen jedoch in einzelnen Punkten Einschränkungen auf. So ist der Einrichtungsaufwand für die Richtungsmessung als neutral zu bewerten, da neben einem stabilen Instrumentenstandpunkt auch die sichere Befestigung des Prismas sowie Sichtverhältnisse berücksichtigt werden müssen. Die Neigungsmessung erfordert hingegen kaum Aufwand, es ist lediglich auf die Horizontierung und einen sicheren Stand zu achten. Da nach erfolgreicher Konfiguration die Aufzeichnung der Daten weitestgehend automatisch abläuft, ist die weitere Bedienung für den eingewiesenen Benutzer unkompliziert. Die Abtastraten weisen aufgrund der seriellen Übertragung zum Teil größere Instabilitäten auf, weiterhin ist eine übergeordnete Synchronisierung ebenfalls nur ereignisbasiert zu erreichen. Daher ist insbesondere

für die Richtungsmessung der Nachweis von Frequenzen und Amplituden bei sehr kleinen Bewegungen nur mit größeren Unsicherheiten möglich. Bei der Neigungsmessung können hingegen aufgrund des geringen Messrauschens sogar kleinste Erschütterungen bis zur Gebäudeeigenfrequenz ermittelt werden, eine Umrechnung der Amplituden in das metrische System ist aber bisher noch nicht gelungen. Die Rohdatenausgabe kann über entsprechende GeoCOM-Befehle flexibel den Anforderungen angepasst und direkt eingelesen werden, sodass umfangreiches Postprocessing entfällt. Da es sich bei den verwendeten Totalstationen um professionelle Messsysteme für ein weites geodätisches Anwendungsspektrum handelt, sind die Kosten im Verhältnis zu den Ergebnissen als sehr hoch zu bewerten, wobei Ersparnisse z.B. durch eine direkte Verwendung von Neigungssensoren wie dem Leica Nivel denkbar sind.

Zusammenfassend liegen die Vorteile beim kostengünstigen GNSS-Messsystem besonders in der stabilen Abtastrate und der übergeordneten Synchronisierung, sodass ein Nachweis von Periodizitäten bis etwa 5 Hertz sehr gut möglich ist. Die inertialen Sensoren aus mobilen Endgeräten weisen gute Einrichtungs- und Bedieneigenschaften auf; sie lassen sich also ohne großen Aufwand insbesondere für kurzzeitige Orientierungsmessungen nutzen. Insgesamt werden bei beiden Verfahren die Fehlereinflüsse durch die relative Auswertung und Messanordnung weitestgehend eliminiert, sodass sie grundsätzlich für Schwingungsmessungen einsetzbar sind. Die praktische Anwendung der vorgestellten Verfahren muss dennoch für jedes Überwachungsobjekt im Rahmen der Vorbereitung evaluiert werden, dabei ist eine ausreichende Anzahl an Redundanzen durch eine hohe Anzahl von Sensoren oder ergänzende Messverfahren vorzusehen.

Die beschriebenen Messobjekte eignen sich für weiterführende Untersuchungen im Rahmen ingenieurgeodätischer Überwachungsmessungen. So könnten am Kirchturm neuentwickelte Messverfahren auf die Erfassungsgenauigkeit sehr kleiner Deformationsbeträge getestet und an der Fußgängerbrücke umfangreiche Analysen der Schwingungen unter verschiedenen Lastfällen durchgeführt werden. Beim vorgestellten low-cost GNSS-Messsystem sind perspektivisch die Echtzeitauswertung und die Einbindung in vorhandene Monitoringsysteme von besonderem Interesse. Auch die Ableitung von Neigungswinkeln aus den Drehratensensoren der Smartphones bietet sich als Gegenstand weiterer Arbeiten an. Darüber hinaus ist als Referenzsensorik der Einsatz von Totalstationen neuerer Generation oder eines Lasertrackers denkbar.

7 Literaturverzeichnis

Bachevskiy, Andrey. 2017. *Rechnerische Untersuchung zur Tragfähigkeit sowie zur Ermüdungs- und Erschütterungsbeanspruchung von Glockentürmen aus Mauerwerk und Stahlbeton.* Abschlussarbeit : Fakultät für Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft der Hochschule für Technik, Stuttgart, 2017.

Bauer, Manfred. 2018. *Vermessung und Ortung mit Satelliten.* Berlin : Wichmann, 2018. ISBN 978-3-87907-634-5.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. 2022. Onlineberechnung des Schwerewertes g . [Online] 2022. [Zitat vom: 25. März 2022.] <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gscmp.php?p=s>.

Dreier, Ansgar, et al. 2021. Strategien zur Selektion von Satelliten in kinematischen GNSS-Anwendungen auf Basis von 3D-Umgebungsmodellen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten.* 2021, Ausgabe 1, S. 13-22.

EPS Works. 2022. ArduSimple - Survey GNSS Multiband antenna. [Online] 2022. [Zitat vom: 05. April 2022.] <https://www.ardusimple.com/product/survey-gnss-multiband-antenna/>.

Everett, Tim. 2022. 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).* [Online] 2022. [Zitat vom: 03. April 2022.] <https://rtklibexplorer.wordpress.com/>.

Foppe, Karl. 2001. *Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken.* Hannover : Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover (Dissertation), 2001.

Foppe, Karl und Neitzel, Frank. 2014. Von der Zufallsgröße zur Trendschätzung im vermittelnden Ausgleichungsmodell - Grundlagen zur Zeitreihenanalyse für Praktiker. [Buchverf.] Hans Neuner. *Zeitabhängige Messgrößen - Ihre Daten haben (Mehr-)Wert.* Augsburg : Wißner, 2014, S. 35-64.

Foppe, Karl und Neuner, Hans. 2009. Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich. [Buchverf.] Karl Foppe, Lisa Knaack und Beatrice Pawel. *Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten.* Augsburg : Wißner-Verlag, 2009, S. 25-54.

Foppe, Karl, Schwieger, Volker und Staiger, Rudolf. 2004. Grundlagen kinematischer Mess- und Auswertetechniken. [Buchverf.] Volker Schwieger und Karl Foppe. *Kinematische Messmethoden »Vermessung in Bewegung«.* Augsburg : Wißner, 2004.

Grimm, David Eugen und Hornung, Ulrich. 2015. Leica ATRplus – Leistungssteigerung der automatischen Messung und Verfolgung von Prismen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*. 2015, Ausgabe 8-9, S. 269-276.

Heunecke, Otto, et al. 2013. *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. [Hrsg.] Michael Möser, Müller Gerhard und Harald Schlemmer. Berlin : Wichmann, 2013. ISBN 978-3-87907-467-9.

InvenSense. 2020. MPU-6500 Six-Axis MEMS MotionTracking™ Devices. *MPU-6500 Product Specification Revision 1.3*. [Online] 15. Mai 2020. [Zitat vom: 25. März 2022.] <https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-6500-datasheet/>.

Kleemaier, Gerhard. 2018. Multisensorsystem Totalstation. [Buchverf.] DVW e.V. (Hrsg.). *MST 2018 – Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund*. Augsburg : Wißner-Verlag, 2018.

Köster, Uwe. 2018. *Entwicklung eines MEMS-basierten Low-Cost-Sensors für geodätische Überwachungsmessungen*. Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg - Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik (Masterarbeit), 2018.

—. **2016.** *Multisensor-Monitoring zur Detektion hochfrequenter Schwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg*. Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg - Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik (Bachelorarbeit), 2016.

Kuttner, Thomas und Rohnen, Armin. 2019. *Praxis der Schwingungsmessung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2019. ISBN 978-3-658-25047-8.

Leica Geosystems AG. 2006. *Leica TPS1200 GeoCOM Reference Manual*. Heerbrugg : s.n., 2006. 754953-1.10.0en.

—. **2011.** *Leica TS30/TM30 User Manual*. Heerbrugg : s.n., 2011. 772576-3.0.0en.

Lemcke, Hugo. 1898. *Die Bau- und Kunstdenkmäler der Provinz Pommern - Zweiter Theil*. Heft 1: Der Kreis Demmin. Stettin : Kommissionsverlag von Léon Saunier, 1898. Bd. 2.

Lutsch, Hans. 1889. Backsteinbauten in Mittelpommern: VII. Städtische Pfarrkirchen in Vorpommern. *Zeitschrift für das Bauwesen*. Heft IV bis VI, 1889, 39. Jahrgang.

navXperience GmbH. 2018. navXperience next-generation GNSS antennas. *3G+C Serie*. [Online] 2018. [Zitat vom: 26. März 2022.] http://navxperience.com/wp-content/uploads/2018/09/WebKatalog_navX_DE.pdf.

Neitzel, Frank, Schwanebeck, Thomas und Schwarz, Willfried. 2007. Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*. 2007, Ausgabe 6, S. 202-211.

Neuhierl, Theresa. 2005. *Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation*. München : Technischen Universität München - Dissertation in der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2005.

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. 2010. DIN 18710-1. *Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2010.

— **2010.** DIN 18710-4. *Ingenieurvermessung – Teil 4: Überwachung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2010.

— **2021.** DIN 4178:2021-04. *Glockentürme*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2021.

Peter, Claus. 2013. Deutsches Glockenmuseum - Geläute des Monats März 2013. *Die Glocken der evangelischen Stadtkirche St. Petri zu Altentreptow*. [Online] 01. März 2013. [Zitat vom: 30. März 2022.] http://glockenmuseum.de/wp-content/uploads/2013/02/Altentreptow_GdM.pdf.

Ruhm, Karl. 1992. Messung mechanischer Schwingungen. [Hrsg.] Paul Profos und Tilo Pfeifer. *Handbuch der industriellen Messtechnik*. München; Wien : Oldenbourg, 1992.

Schnak, Albert. 2020. *Untersuchung kostengünstiger GNSS-Hard- und Software für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen*. Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg - Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik (Bachelorarbeit), 2020.

Seeber, Günter. 2003. *Satellite Geodesy*. Berlin : Walter de Gruyter, 2003. ISBN 3-11-017549-5.

Staacks, Sebastian, et al. 2018. Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*. 2018, Bd. 53, 4.

Staiger, Rudolf. 2009. Instrumente und Messsysteme zur Beobachtung zeitabhängiger Größen. [Buchverf.] Karl Foppe, Lisa Knaack und Beatrice Pawel. *Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten*. Augsburg : Wißner-Verlag, 2009, S. 11-21.

STMicroelectronics. 2019. iNEMO 6DoF inertial measurement unit. *LSM6DSO Datasheet - DS12140 Rev 2*. [Online] 25. Januar 2019. [Zitat vom: 25. März 2022.] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dso.pdf>.

— **2017.** iNEMO 6DoF inertial measurement unit. *LSM6DSL Datasheet - DocID028475 Rev 7*. [Online] 29. September 2017. [Zitat vom: 25. März 2022.] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6dsl.pdf>.

Takasu , Tomoji . 2013. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. [Online] 29. April 2013. [Zitat vom: 27. März 2022.] http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf.

u-blox AG. 2021. u-blox F9 HPG 1.30 - u-blox F9 high precision GNSS receiver. *Interface Description*. [Online] 16. Dezember 2021. [Zitat vom: 31. März 2022.] https://content.u-blox.com/sites/default/files/u-blox-F9-HPG-1.30_InterfaceDescription_UBX-21046737.pdf. UBX-21046737 - R01.

—. **2021.** ZED-F9P - u-blox F9 high precision GNSS module. *ZED-F9P Data sheet*. [Online] 21. Dezember 2021. [Zitat vom: 01. April 2022.] https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P-04B_DataSheet_UBX-21044850.pdf. UBX-21044850 - R01.

—. **2022.** ZED-F9P - u-blox F9 high precision GNSS module. *Integration manual*. [Online] 18. Februar 2022. [Zitat vom: 31. März 2022.] https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P_IntegrationManual_UBX-18010802.pdf. UBX-18010802 - R11.

Wild-Pfeiffer, Franziska. 2015. *Das Potential von MEMS-Inertialsensoren zur Anwendung in der Geodäsie und Navigation*. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C.H.Beck, 2015. ISBN 978-3-7696-8598-5.

Willemsen, Thomas. 2016. *Fusionsalgorithmus zur autonomen Positionsschätzung im Gebäude, basierend auf MEMS-Inertialsensoren im Smartphone*. Hamburg: Dissertation im Fachbereich Geomatics an der HafenCity Universität Hamburg, 2016.

Weblinks zu Software und Datenportalen:

(Stand: 05/2022)

Kostenfreie Software:

RTKLIB demo5: <https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB/releases>

u-center: <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>

Python: <https://www.python.org/>

GNU Octave: <https://www.gnu.org/software/octave/index>

GNSS-Beobachtungs- und Korrekturdaten (*Registrierung erforderlich*):

SAPOS®-GPPS Mecklenburg-Vorpommern: <http://194.25.109.70/gppweb/rinex>

SAPOS®-GPPS Brandenburg: <https://gpps.sapos-bb.de/gppweb/rinex>

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Genauigkeiten ausgewählter Messverfahren in Abhängigkeit von der Objektgröße ...	5
Abbildung 2-2: Beispiel einer gemessenen und stationären Zeitreihe	7
Abbildung 2-3: Autokorrelationsfunktion des Beispieldatensatzes	9
Abbildung 2-4: Amplitudenspektrum des Beispieldatensatzes.....	11
Abbildung 2-5: Spektrogramme mit hoher Zeit- bzw. Frequenzauflösung	12
Abbildung 2-6: Beispiel einer harmonischen Schwingung	13
Abbildung 2-7: Zusammenhang zwischen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Frequenzbereich.....	14
Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau eines Inertialsensors.....	16
Abbildung 3-2: Drift bei integrierten Geschwindigkeiten, Wegen und Drehwinkeln nach 150 Sekunden (Ruhemessung).....	18
Abbildung 3-3: Rohdaten der Beschleunigungsmessung aus 5 Minuten Ruhemessung	21
Abbildung 3-4: Vergleich der Abstraten der Smartphones.....	21
Abbildung 3-5: Prinzip der ereignisbasierten Synchronisierung bei Smartphones (S9 vs. A51)	23
Abbildung 3-6: 6-Punkt Kalibrierung des Beschleunigungssensors im Samsung Galaxy S9.....	24
Abbildung 3-7: Darstellung der unkalibrierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert	24
Abbildung 3-8: Darstellung der kalibrierten Messwerte im Vergleich zum Referenzwert	25
Abbildung 3-9: Kalibrierparameter für Samsung S9 mit Standardabweichungen	26
Abbildung 3-10: schematischer Aufbau eines GNSS-Empfängers.....	29
Abbildung 3-11: Stationspezifische Fehlereinflüsse durch die Umgebung der GNSS-Antenne	30
Abbildung 3-12: Empfängerboards „SparkFun GPS-RTK2“ und „ArduSimple simpleRTK2B“	32
Abbildung 3-13: grundlegendes Konfigurationsschema des kostengünstigen GNSS-Messsystems.....	35
Abbildung 3-14: Versuchsaufbau zur Kontrolle der Phasenzentrumsoffsets (2 x AS-ANT2B-SUR und 1 x NAX3G+C).....	36
Abbildung 3-15: Residuen bei bekannter Basislinie mit und ohne Kalibrierparameter.....	36
Abbildung 3-16: Versuchsaufbau zur Erfassung von Deformationen unter schwierigen Empfangsbedingungen.....	37
Abbildung 3-17: Amplitudenspektren der Ost- und Nordkomponenten über einen Zeitraum von 15 Sekunden.....	38
Abbildung 3-18: Schematischer Datenfluss in einer Leica Totalstation	40
Abbildung 3-19: Systemarchitektur Leica GeoCOM.....	41
Abbildung 3-20: Richtungsmessung mit Leica TM30	43

Abbildung 3-21: Neigungsmessung mit Leica TM30	44
Abbildung 3-22: Vergleich der Abtastraten von Richtungs- und Neigungsmessung	45
Abbildung 3-23: Zeitdifferenz zwischen Richtungs- und Neigungsmessung.....	45
Abbildung 3-24: Äquidistanz der Zeitstempel im TM30.....	46
Abbildung 4-1: Grundriss der St. Petri-Kirche und architektonische Details	48
Abbildung 4-2: Geläut in der St. Petri-Kirche Altentreptow.....	50
Abbildung 4-3: horizontales Lastspiel einer Glocke im Betriebszustand	51
Abbildung 4-4: Längsschnitt durch die St. Petri-Kirche mit Messebenen	52
Abbildung 4-5: Richtungsmessung vom Leica TS30 zum GPR112-Prisma und Leica TM30 für Neigungsmessung.....	53
Abbildung 4-6: Aufbau des GNSS-Messsystems.....	53
Abbildung 4-7: Konfiguration des GNSS-Messsystems mit drei Empfängern	54
Abbildung 4-8: Konfiguration und Rohdatenaufzeichnung mit Phyphox®	55
Abbildung 4-9: Rohdaten der Smartphone-Beschleunigungssensoren	58
Abbildung 4-10: Synchronisierte Rohdaten und stationäre Zeitreihen der Nordkomponente	58
Abbildung 4-11: Spektrogramm der Beschleunigungszeitreihe mit dem Samsung A51.....	59
Abbildung 4-12: Amplitudenspektrum der Beschleunigung im gemauerten Kirchturm (Messebene 0 und 1)	60
Abbildung 4-13: Amplitudenspektrum der Beschleunigung im Turmhelm (Messebene 2 und 3)	61
Abbildung 4-14: zusammengefasste Amplitudenspektren der Wege aus Beschleunigungen für die 1. bis 5. Teilschwingung.....	62
Abbildung 4-15: Skyplot und SNR/Multipath für den östlichen Empfänger	64
Abbildung 4-16: Skyplot und SNR/Multipath für den südlichen Empfänger	64
Abbildung 4-17: Ergebnis der Basislinienprozessierung (Basis: eigene Referenz).....	66
Abbildung 4-18: Ergebnis der Basislinienprozessierung (Basis: SAPOS 0789)	66
Abbildung 4-19: Trendbeseitigung der Nordkomponenten für beide Rover (Basis: SAPOS 0789).....	67
Abbildung 4-20: Trendbeseitigung der Nordkomponenten für beide Rover (Basis: eigene Referenz)	67
Abbildung 4-21: Amplitudenspektren der Nordkomponenten für Rover „Ost“ und „Süd“	68
Abbildung 4-22: Darstellung der Amplitudenspektren und Mittelbildung	69
Abbildung 4-23: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Sonntagsglocke)	70
Abbildung 4-24: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Große Glocke).....	71
Abbildung 4-25: Amplitudenspektrum aus der Richtungsmessung (Sonntagsglocke und Große Glocke)	71
Abbildung 4-26: Messwerte der Neigungsmessung mit a-priori-Genauigkeit.....	72
Abbildung 4-27: Spektrogramme der Neigungsmessung.....	72

Abbildung 4-28: Amplitudenspektrum aus der Neigungsmessung (Sonntagsglocke)	73
Abbildung 4-29: Amplitudenspektrum aus der Neigungsmessung (Große Glocke)	73
Abbildung 4-30: Amplitudenspektrum aus der Neigungsmessung (Sonntagsglocke und Große Glocke)	74
Abbildung 4-31: Ermittlung der Eigenfrequenzen aus Ruhemessung.....	74
Abbildung 4-32: Weg- und Geschwindigkeitsamplituden für die 1. und 3. Teilschwingung auf Messebene 2	77
Abbildung 5-1: Fußgängerbrücke über die Tollense	78
Abbildung 5-2: Messungsaufbau an der Fußgängerbrücke	79
Abbildung 5-3: Skyplot und SNR/Multipath des GNSS-Empfängers an der Fußgängerbrücke	79
Abbildung 5-4: Rohdaten der Beschleunigungsmessung mit dem Samsung S8	80
Abbildung 5-5: Basislinienkomponenten der GNSS-Messung.....	81
Abbildung 5-6: Rohdaten der Tachymetermessung.....	81
Abbildung 5-7: Spektrogramm der Beschleunigungsmessung.....	82
Abbildung 5-8: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der Beschleunigungsmessung	83
Abbildung 5-9: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der GNSS- Basislinienkomponenten	83
Abbildung 5-10: Autokorrelationsfunktionen und Amplitudenspektren der Richtungsmessung	84
Abbildung 5-11: Integrierte Geschwindigkeiten und Wege aus der Beschleunigungsmessung.....	85
Abbildung 5-12: Integrierter und reduzierter Weg aus Beschleunigungsmessung mit Samsung S8....	85
Abbildung 5-13: Vergleich der Schwingwege	86
Abbildung 5-14: Interpolierte Zeitreihen, Differenzen und FFT-Auswertung der Querkomponente...	87
Abbildung 5-15: Interpolierte Zeitreihen, Differenzen und FFT-Auswertung der Hochkomponente...	87
Abbildung 5-16: Berechnung der Schwingungsparameter mit vermittelnder Ausgleichung (Totalstation; Hochkomponente).....	88

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Typische Messaufgaben der Überwachungsmessung und deren Anforderungen	6
Tabelle 3-1: Einsatzbereiche ausgewählter MEMS-Sensoren in Smartphones.....	19
Tabelle 3-2: technische Daten der IMUs aus den verwendeten Smartphones.....	20
Tabelle 3-3: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen aus Ruhemessung der Smartphones	22
Tabelle 3-4: Kalibrierparameter für Samsung S9	26

Tabelle 3-5: Technische Daten des u-blox ZED-F9P-04B	31
Tabelle 3-6: Technische Daten der verwendeten Antenne „AS-ANT2B-SUR“	33
Tabelle 3-7: Übersicht der RTKLIB-Programmmodule	34
Tabelle 3-8: Zusammenstellung der Amplituden der Versuchsmessung.....	38
Tabelle 3-9: Technische Daten der verwendeten Tachymeter	41
Tabelle 3-10: Parameter für In- und Output der Messfunktion "TMC_GetAngle1"	42
Tabelle 4-1: Technische Parameter der Glocken in der St. Petri-Kirche	49
Tabelle 4-2: Ergebnisse der IMU-Messung.....	63
Tabelle 4-3: GNSS-Auswerteparameter für RTKPOST	65
Tabelle 4-4: Ergebnisse der GNSS-Messung.....	69
Tabelle 4-5: Ergebnisse der Richtungs- und Neigungsmessungen.....	75
Tabelle 4-6: Vergleich der ermittelten Frequenzen für die 1. bis 5. Teilschwingung.....	75
Tabelle 4-7: überschlägige Resonanzabstände der 3. und 5. Teilschwingung	76
Tabelle 4-8: Amplitudenvergleich der Schwingwege für die 1. bis 5. Teilschwingung auf Messebene 2	76
Tabelle 5-1: Auswertung aus Zeitfenster von 5 Sekunden.....	84
Tabelle 5-2: berechnete Amplituden und Frequenzen aus FFT-Auswertung und vermittelnder Ausgleichung	89
Tabelle 6-1: Bewertung der verwendeten Messsysteme.....	90

10 Formelverzeichnis

Formel 2-1: Autokovarianzfunktion einer Zeitreihe.....	8
Formel 2-2: Mittelwert und Standardabweichung.....	8
Formel 2-3: diskrete Autokovarianzfunktion einer Zeitreihe.....	8
Formel 2-4: Autokorrelationsfunktion einer Zeitreihe.....	8
Formel 2-5: Kreuzkovarianzfunktion zwischen zwei Zeitreihen.....	9
Formel 2-6: Kreuzkorrelationsfunktion zweier Zeitreihen	9
Formel 2-7: Übergang in den Frequenzbereich mit der diskreten Fouriertransformation.....	10
Formel 2-8: Grenzen des Konfidenzbereichs für das empirische Leistungsspektrum	10
Formel 2-9: Übergang zum empirischen Amplitudenspektrum.....	10
Formel 2-10: Grenzen des Konfidenzbereichs für das empirische Amplitudenspektrum	10
Formel 2-11: Weg-Zeit-Funktion	13
Formel 2-12: Geschwindigkeits-Zeit-Funktion	13

Formel 2-13: Beschleunigungs-Zeit-Funktion.....	13
Formel 2-14: Amplituden der Geschwindigkeit und Beschleunigung einer harmonischen Schwingung	13
Formel 3-1: vereinfachtes Fehlermodell für den Beschleunigungsmesser	18
Formel 3-2: vereinfachtes Fehlermodell für das Gyroskop.....	18
Formel 3-3: Berechnung des Offsets aus Messung in zwei Lagen	25
Formel 3-4: Berechnung des Maßstabsfaktors aus Messung in zwei Lagen.....	25
Formel 3-5: Beobachtungsgleichung der Trägerphase	28
Formel 4-1: Berechnung der Horizontalkraft einer schwingenden Glocke nach DIN 4178	50