



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik
Bachelor-Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Bachelorarbeit

Multisensor-Monitoring zur Detektion hochfrequenter Schwingungen an der Marienkirche Neubrandenburg

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Vorgelegt von: *Uwe Köster*

Erstprüfer: **Prof. Dr. –Ing. Karl Foppe**

Zweitprüfer: **Prof. Dr. –Ing. (CDN) E. T. Knickmeyer**

URN: **urn:nbn:de:gbv:519-thesis2015-0807-5**

Neubrandenburg, März 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die hier vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt, 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

Kurzfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit dem ingenieurgeodätischen Monitoring an der Marienkirche Neubrandenburg. Ziel dieser Arbeit soll der Nachweis der Gebäudeschwingungen sein, welche durch das Läuten der Kirchenglocken ausgelöst werden. Die Größenordnungen dieser Gebäudeschwingungen haben großen Einfluss auf die Statik des Kirchengebäudes. Diese Schwingungen wiesen hohe Frequenzen auf, daher wird die Auswertung der Messungen im Kontext der Zeitreihenanalyse betrachtet. Die schon in der Kirche installierten Monitoringsysteme sollen um den Einsatz von GNSS erweitert werden. Dazu wird eine Antennenhalterung für den Kirchturm entworfen und realisiert. Ebenfalls werden Beschleunigungsmesser, beispielsweise integriert in einem Smartphone, zur Erfassung der Kirchturmbewegung genutzt. Bevor die eigentlichen Messaufgaben an der Kirche beginnen sollen die eingesetzten Sensoren des Monitoringsystems auf ihre Tauglichkeit für diese Messaufgabe geprüft werden. Dazu wird eine Prüfvorrichtung entworfen und verwirklicht. An dieser werden Tachymeter, Beschleunigungsmesser und das GNSS-Spider-System auf Detektion kleinstmöglicher Verschiebungsbeträge und größtmöglicher Frequenzerfassung getestet.

Schlagwörter:

Monitoring, Marienkirche Neubrandenburg, GNSS, Tachymeter, Neigungsmesser, Beschleunigungssensor, Zeitreihenanalyse

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. –Ing. Karl Foppe und Prof. Dr. –Ing. (CDN) E. T. Knickmeyer für die Ermöglichung dieser Arbeit und die fachliche Unterstützung bedanken, welche nicht nur im Rahmen dieser Arbeit bestand, sondern während des gesamten Studiums.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr. –Ing. Wilhelm Heger, der mir mit dem ganzen Team des Instituts zur Seite stand. Hier ist außerdem Sebastian Geschwind zu erwähnen, der für die immer sehr zügige Realisierung meiner Ideen in Bezug auf Fertigung und Anbringung von Bauteilen sorgte.

Ebenfalls möchte ich mich bei M.Eng. Philipp Engel für die schnelle Bereitstellung der Messdaten bedanken, welche in und an der Marienkirche aufgezeichnet wurden.

Auch meine Kommilitonen sollen hier erwähnt werden, da nicht alle Messungen automatisch abliefen und ich auf Unterstützung angewiesen war. Die Messungen während des Probeläutens mussten mit allen Messgeräten zeitgleich erfolgen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während des ganzen Studiums in allen Lebenslagen tatkräftig unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	1
Kurzfassung	2
Danksagung	3
Inhaltsverzeichnis	4
Aufgabenstellung	6
1 Geschichte der Marienkirche Neubrandenburg	7
1.1 Der Bau der Kirche in der neugegründeten Stadt Neubrandenburg	7
1.2 Vom Mittelalter bis in die Neuzeit	8
1.3 Die Zerstörungen des 2. Weltkrieges	10
1.4 Die Schwierigkeiten des Wiederaufbaus	11
1.5 Die Marienkirche als Zeugnis der norddeutschen Backsteingotik	13
2 Geodätische Überwachungsmessungen	14
2.1 Überwachungsmessungen als Teilgebiet der Ingenieurgeodäsie	14
2.2 Multi-Sensor-Systeme	16
2.3 GNSS als Messsystem	17
3 Entwurf und Realisierung einer Testvorrichtung und einer Antennenhalterung	18
3.1 Die Testvorrichtung	18
3.2 Entwurf und Konstruktion einer Halterung für die GNSS-Antennen	21
4 Analyse von Zeitreihen	23
5 Untersuchungen der Messinstrumente	26
5.1 Lasertracker	26
5.2 GNSS	31
5.2.1 Testmessung im Vergleich zum Lasertracker	31
5.2.2 Testmessung in Bezug auf geringe Lage- und Höhenveränderungen	34
5.3 Beschleunigungssensor	37
5.4 Tachymeter	43
5.4.1 Tachymetrische Messungen auf die Testvorrichtung zur Frequenzanalyse	44
5.4.2 Betrachtung der zeitlichen Äquidistanz der Tachymetermessungen	47
5.4.3 Untersuchungen zur automatischen Strecken- und Richtungsmessgenauigkeit	49
5.4.4 Fazit zu den tachymetrischen Messungen	54
5.5 Zusammenfassung der Testmessungen	55
6 Messungen an der Kirche	56
6.1 Bestimmung der Frequenzen der Kirchenglocken	57
6.2 GNSS	58

6.2.1	Messaufbau	58
6.2.2	Analyse der Messdaten	59
6.3	Beschleunigungssensoren	63
6.3.1	Messaufbau	63
6.3.2	Analyse der Messdaten des Smartphone	63
6.3.3	Analyse der Messdaten des SBG IG-500E	66
6.3.4	Fazit zu den Messungen mit den Beschleunigungssensoren.	67
6.4	Neigungssensor	68
6.4.1	Messaufbau	68
6.4.2	Analyse der Messdaten des oberen Nivel210.....	68
6.4.3	Analyse der Messdaten des unteren Nivel210	70
6.4.4	Fazit zu den Neigungssensoren.....	71
6.5	Tachymeter.....	73
6.5.1	Messaufbau	73
6.5.2	Auswertung der Messdaten des TCRP1203	74
6.5.3	Auswertung der Messdaten des TS30.....	77
6.5.4	Fazit zu den Tachymetern	79
7	Zusammenfassung und Ausblick	80
8	Literaturverzeichnis.....	82
9	Abbildungsverzeichnis.....	83
10	Formelverzeichnis	85
11	Tabellenverzeichnis	85

Aufgabenstellung



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences
Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe
Prof. Dr.-Ing. Elfriede Knickmeyer

Neubrandenburg, 26. Januar 2016

Aufgabenstellung für Herrn Uwe Köster zur Bachelorarbeit

„Multisensor-Monitoring zur Erfassung hochfrequenter Deformationen an der Marienkirche Neubrandenburg“

Am Turm der Marienkirche Neubrandenburg nahmen Besucher und Betriebspersonal während des Läutens der Kirchenglocken rein subjektiv Gebäudeschwingungen wahr. Dieser Eindruck wurde durch Berichte von Industriekletterern gestützt, die ebenfalls während ihrer Arbeiten am Turm von „stärkeren“ Schwingungen berichteten. Auf Nachfrage wurden Größenordnungen von 12cm bis 20cm genannt. Schwingungen dieser Größenordnungen hätten sicherlich großen Einfluss auf die Statik des Kirchturms und somit auf die Sicherheit der gesamten Kirche. Um eventuellen Schäden am Bauwerk frühzeitig entgegen wirken zu können, ist die Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Kirchturms unerlässlich. Diese Untersuchungen sind Gegenstand einer Kooperationsvereinbarung zwischen der Hochschule und der Stadt Neubrandenburg. Im Zuge dieser Kooperation erhält die Hochschule Neubrandenburg die Möglichkeit, neu entwickelte Konzepte zum ingenieurgeodätischen Monitoring direkt an der Marienkirche Neubrandenburg zu testen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit erhält der Kandidat die Aufgabe, das GNSS-Spider-System und diverse Tachymeter auf Verwendbarkeit für die anstehenden Überwachungsaufgaben zu untersuchen.

Zunächst ist das Leica-Spider-System unter Laborbedingungen mit den vorhandenen Empfängern und Antennen auf Verwendbarkeit für die anstehenden Aufgaben zu überprüfen. Dazu muss der Kandidat eine geeignete Prüfvorrichtung entwerfen und realisieren, mit welcher die kleinstmöglichen Verschiebungsbeträge und größtmöglichen Frequenzen empirisch zu ermitteln sind. Mittels der Prüfvorrichtung sind auch die weiteren Sensoren des Monitoringsystems (Tachymeter und Beschleunigungssensoren) in gleicher Art und Weise zu testen.

Für empirische Untersuchungen unter praktischen Bedingungen ist eine vom Kandidaten entworfene Antennenhalterung für die Empfänger des GNSS-Spider-Systems am Kirchturm zu installieren. Ziel ist es eine Auswertung der kombinierten Messungen von GNSS, Tachymeter, Neigungssensoren und Beschleunigungssensoren vorzunehmen um Aussagen über das Deformationsverhalten des Kirchturms zu gewinnen.

1 Geschichte der Marienkirche Neubrandenburg

1.1 Der Bau der Kirche in der neugegründeten Stadt Neubrandenburg

Nach der im Jahre 1248 erfolgten Stadtgründung von Neubrandenburg erwies sich der Bau eines Gotteshauses als erforderlich. In den ersten Jahren nach der Stadtgründung ist im Nordosten eine provisorische Kirche entstanden, aus der sich möglicherweise die Nikolaikirche entwickelte. Das Stadtgebiet von Neubrandenburg wurde kreisförmig angelegt. Dies ist als optimale Lösung für die Platzausnutzung und die Minimierung der Länge der die Stadt umgebenden Verteidigungsanlagen anzusehen. Als Bauplatz für die neu zu errichtende Kirche kam wie in den meisten anderen Städten üblich nicht die Marktrandlage in Betracht, bei der die Kirche nur durch eine Häuserzeile vom Markt getrennt errichtet wird. Der Ausbau des Marktes sowie des Rathauses hatte noch nicht stattgefunden. Da sich das Gotteshaus aber in repräsentativer Lage befinden sollte kam als Lösung eine Position an der zentralen Straße in Betracht. Die Stargarder Straße tangiert sowohl die Marienkirche, den Markt und das Franziskanerkloster. Im Jahre 1298 fand die Weihe der Kirche durch Bischof Johannes von Havelberg statt. Der Kirchenbau in der heutigen Größe hatte zwei oder drei Vorgänger. Von einem der Vorgängerbauten, einem Feldsteinquaderbau sind noch heute die bis zu neun Meter hohen Wände im Westbau der Kirche erhalten. Ausgrabungen ließen auf ein 37 Meter langes Kirchenschiff schließen. Dieses Bauwerk ist um 1270 oder 1280 durch einen Neubau ersetzt worden, der aber teilweise in das neue Bauwerk integriert werden konnte. So wählte man eine dreischiffige geschlossene Bauform, wie sie zu der Zeit in der Mark Brandenburg üblich waren.



Abbildung 1.1: Die Marienkirche heute

1.2 Vom Mittelalter bis in die Neuzeit

Die Kirche war zu ihrer Weihe 1298 noch nicht fertiggestellt. Der kunsthistorisch sehr wertvolle Giebel ist im 14. Jahrhundert entstanden und gilt als Höhepunkt der technischen und künstlerischen Entwicklung. Ein Bauwerk dieser Größe ist nicht in einem Zuge, sondern in mehreren Etappen entstanden, was unter anderem an den Jochen erkennbar ist.



Abbildung 1.2: Innenansicht [Stadt Neubrandenburg, 1998], Seite34

Die spätmittelalterliche Geschichte sowie die Geschichte der frühen Neuzeit ist geprägt von Bränden und anderen Unglücken, welche der Marienkirche arg zusetzten. 1591 stürzte ein Teil des Turmes ein, 1614 wurde die Kirche durch einen Stadtbrand beschädigt und 1655 ist es zu schweren Schäden am Turm durch Blitzschlag gekommen. 1676 zerstörte ein Brand die Mittelschiffsgewölbe und richtete schwere Verwüstungen an. Erst 18 Jahre später konnte die Kirche wieder genutzt werden, da die Stadt kaum Mittel aufbringen konnte um die Reparatur durchführen zu lassen. So wurde nur eine behelfsmäßige Reparatur des Gewölbes durch einen Bretterboden vorgenommen. Erst in den Jahren von 1832 bis 1841 erfolgte eine Komplettrestaurierung des Bauwerkes durch den Baumeister Friedrich Wilhelm Buttel. Diese Restaurierung ist durch den Großherzog Georg von Mecklenburg-Strelitz angeordnet worden. Es entsprach dem damaligen Zeitgeist wichtige nationale Denkmäler zur erhalten und zu restaurieren und somit ihren Verbleib zu sichern. Die Marienkirche ist als vaterländisches Monument angesehen worden, was der nationalistischen Bestrebungen der

Zeit nach den Befreiungskriegen zuzuordnen ist. Die Kirche wurde neben der innen- und außenseitigen Restaurierung auch von anliegenden Bauwerken freigestellt. Diese Freiräume sind durch Anpflanzung von Linden aufgewertet worden. Mit der Restaurierung des stark verwitterten Ostgiebels ist im Jahre 1832 begonnen worden. Hier ist die Verwendung von gelbem Backstein hervorzuheben, welcher für die Architektur der Romantik des 19. Jahrhunderts charakteristisch ist. Am Westturm waren umfangreiche Arbeiten notwendig. Der Baumeister entwarf einen achteckigen Aufsatz dessen Maßwerk dem Ostgiebel entlehnt ist. Buttels Vorschlag, den Turm ohne Spitze ähnlich der Friedrichswerderschen Kirche zu errichten, stieß nicht auf Gegenliebe, obwohl dies durchaus den romantischen Strömungen der Zeit entsprach. Den Entwurf des Kirchturmes ohne Helm kann auf dem Gemälde *Das brennende Neubrandenburg*, siehe Abbildung 1.3, nachvollziehen.



Abbildung 1.3: Das brennende Neubrandenburg [Wikipedia, 2016]

Da auch der Großherzog auf einer Spitze beharrte schlug Buttell zunächst einen durchbrochenen Helm vor wie er später bei der Kirche St.-Bartholomaei in Demmin verwirklicht wurde. Der Turm wurde aber 1838 mit einem geschlossenen Spitzhelm verwirklicht. Ebenfalls erfolgte eine Neugestaltung des Innenraumes. Hier ist eine Harmonie mit der edlen Architektur angestrebt worden, demzufolge mussten viele der über die

Jahrhunderte gewachsenen Einrichtungselemente weichen. Die Würde des Innenraumes sollte nicht durch überflüssiges Inventar gestört werden. Die Restaurationsarbeiten endeten im Jahre 1841 mit der Neuweihe der Marienkirche. [Stadt Neubrandenburg, 1998]

1.3 Die Zerstörungen des 2. Weltkrieges

Vom 29. April bis zum 30. April 1945 fielen ca. 80% der gesamten Innenstadt einem großflächig angelegten Brand der Roten Armee zum Opfer. Bei dieser Brandkatastrophe wurde auch die Marienkirche stark zerstört. Langhaus und Turm brannten bis auf die Untermauern aus. Die meisten Gewölbe und Mittelschiffspfeiler stürzten im Herbst 1945 ein. Im Jahre 1948 brachen die restlichen zwei Freipfeilerpaare sowie die dazugehörigen drei Gewölbejoche zusammen. Fast die gesamte Inneneinrichtung ist hierbei zerstört worden, wie z.B. Altaraufbau, Kanzel, Taufstein oder die Orgel.



Bundesarchiv, Bild 183-17188-0003
Foto: Klein | 12. November 1952

Abbildung 1.4: Die zerstörte Kirche 1952 [Wikipedia, 2016]

Immerhin blieb die Außenfassade mit dem Ostgiebel zum großen Teil erhalten, so dass Bestrebungen zum Wiederaufbau schon kurz nach Kriegsende aufkamen.

1.4 Die Schwierigkeiten des Wiederaufbaus

Einem Wiederaufbau der Marienkirche standen verschiedene Widrigkeiten im Weg. In den Jahren nach dem Kriegsende mussten erst Probleme der Nahrungsmittelversorgung und der Beschaffung von Wohnraum vorrangig nachgegangen werden. Da 80% der Innenstadt zerstört waren aber die Bevölkerungszahl unmittelbar nach Kriegsende das Vorkriegsniveau erreichte war die Schaffung von Wohnraum eine Hauptaufgabe in den Nachkriegsjahren. Die hohe Einwohnerzahl spiegelt auch die Emigration der Bevölkerung aus den ehemaligen Ostgebieten des Deutschen Reiches und deren Ansiedlung auf dem Gebiet der sowjetischen Besatzungszone Deutschlands wieder. Der Wiederaufbau des Stadtzentrums startete 1952 im Stile des sozialistischen Klassizismus. Historische Bauten sowie der Grundriss der Innenstadt wurden weitgehend beibehalten. Die neuen Gebäude lehnten sich gestalterisch den historischen Vorbildern an. In diesem Zuge konnte aber nicht mit dem Wiederaufbau der Kirche begonnen werden. In den 1960er Jahren wandte man sich aber von dieser Stadtplanung ab und ging zur Schaffung einer neuen sozialistischen Stadt über. Die Anlehnung an die Historie war in der nun vorherrschenden Ideologie nicht mehr gefragt. Da Neubrandenburg nun Bezirksstadt des gleichnamigen Kreises wurde, sollte sich die Bezirksstadt auch durch ein modernes sozialistisches Wahrzeichen schmücken. Dieses wurde mit der Fertigstellung des Hauses der Kultur und Bildung (HKB) realisiert, welches 1965 fertiggestellt wurde. Hier ist vor allem der 56 Meter hohe Turm „Kulturfinger“ zu nennen, der die neue sozialistische Bezirksstadt nach außen präsentierte und noch heute Zeugnis der DDR ist. Pläne, die die Marienkirche mit ihrem 90 Meter hohen Turm wieder zum zentralen Bauwerk in Neubrandenburg machen würden, stießen somit auf Ablehnung der sozialistischen Parteiführung. So scheiterten alle Bemühungen des Wiederaufbaus am Willen des Staates, die notwendigen Kapazitäten freizugeben. Schließlich erwarb die Stadt Neubrandenburg die Kirchenruine um sie zu einer Konzertkirche und Kunstgalerie umzugestalten. Somit konnte wenigstens die äußere Fassade, die Umfassungswände und das Dach des Langhauses wiederhergestellt werden. Nun musste der Widerstand gegen die Restaurierung des Turmes in seiner Buttelschen Fassung überwunden werden. Hier schaltete sich das Ministerium für Kultur und Bildung der DDR ein und setzte die Turmwiederherstellung durch. Schließlich konnte 1983 der Helm wieder aufgesetzt werden.



Abbildung 1.5: Aufsetzen des Helmes [Stadt Neubrandenburg, 1998], Seite 111

Der Ausbau des Innenraumes verzögerte sich immer weiter bis dieser nicht mehr in der DDR begonnen werden konnte. Nach dem Anschluss der DDR an die BRD im Jahre 1990 standen nun nicht mehr die logistischen Probleme im Vordergrund, sondern die finanziellen. Die Kostenschätzungen der beginnenden 90er Jahre beliefen sich auf ca. 70 Millionen DM. Ein Projekt dieser Größe musste nun europaweit ausgeschrieben werden, was erst 1996 geschah. Der Gestaltungsvorschlag des Architekten Pekka Salminen aus Finnland wurde schließlich verwirklicht. Dabei wurde die Kunstgalerie verworfen und die Umgestaltung zur Konzertkirche umgesetzt. 2001 konnte die Konzertkirche Neubrandenburg eröffnet werden und zählt heute zu Konzertsälen internationalen Ranges. [Stadt Neubrandenburg, 1998]

1.5 Die Marienkirche als Zeugnis der norddeutschen Backsteingotik

Die Marienkirche Neubrandenburg gilt mit ihrem Ostgiebel als herausragendes Beispiel für die norddeutsche Backsteingotik. Die Marienkirche war bis zu ihrer Kriegszerstörung eine neunjochige und dreischiffige Hallenkirche. Sie verfügte über ein rechtwinkliges Kreuzgewölbe und einen geraden Chorabschluss. Der Kirchturm hatte eine Höhe von 90 m, welcher mit dem Wiederaufbau in den 1980er wieder errichtet wurde. Der frühere Gewölbescheitel im Mittelschiff befand sich in 18,5 Meter Höhe. Das Innere des Kirchenschiffes ist 22,4 Meter lang und 53,6 Meter breit. Die Stärke der Westwand liegt bei 4,7 Metern. Die Verwendung des Backsteines als Werkstoff stellt eine einzigartige Architektur her, welche durch den Werkstoff definiert wird. Der Verbreitungsraum erstreckt sich rund um die Ostsee. Die Charakteristik liegt in den gemauerten Ornamenten, den Farbwechseln und dem Fehlen der figurativen Bauplastiken. Dies ist vor allen im Ostgiebel zu sehen, dessen einzigartige Erscheinung auf das Zusammenspiel der Wimperge und Fialen beruht. Wimperge sind giebelartige obere Abgrenzungen über Portalen und Fenstern, Fialen spitz auslaufende Türmchen zur Überhöhung der Wimperge. Die Fialen haben neben dem ästhetischen Zweck auch einen statischen Zweck, die Stabilisierung der Konstruktion. Auch reichlich Maßwerk wurde zur ästhetischen Verschönerung genutzt. Diese Gestaltungselemente sind neben dem Ostgiebel auch am Turm selbst zu finden.



Abbildung 1.6: Ostgiebel der Marienkirche [Wikipedia, 2016]

2 Geodätische Überwachungsmessungen

2.1 Überwachungsmessungen als Teilgebiet der Ingenieurgeodäsie

Die Helmertsche Definition der Geodäsie als „Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“ und die Unterteilung in höhere und niedere Geodäsie lässt noch keinen Schluss auf das Tätigkeitsfeld der Ingenieurvermessung zu. Die einfachen Aufgaben des Feldmessens und Nivellierens wurden im späten 19. Jahrhundert zur niederen Geodäsie gezählt. Erst im 20. Jahrhundert und dort speziell nach dem 2. Weltkrieg entwickelte sich die Ingenieurvermessung als eigenständiges Fachgebiet. Durch den Aufschwung des Bauwesens und den daraus immer höheren Anforderungen im Qualitätsbereich formierte sich dieser spezielle Bereich. „Zur Ingenieurvermessung gehören alle Vermessungsaufgaben, die in Verbindung mit der Planung, Absteckung, Aufnahme und Überwachung von technischen Objekten (oder deren Umgebung) durchzuführen sind“ [Rinner, 1978]. Seit den 1980er Jahren spaltet sich die Industrievermessung davon ab, hier geht es vor allem um die Vermessung im Maschinen-, Automobil-, Flugzeug- und Schienenfahrzeugbau, sowie dem Erfassen von Oberflächen und Formen. Die „klassische“ Ingenieurvermessung befasst sich hiervon abgrenzend mit technischen Objekten, die bodenverbunden sind.

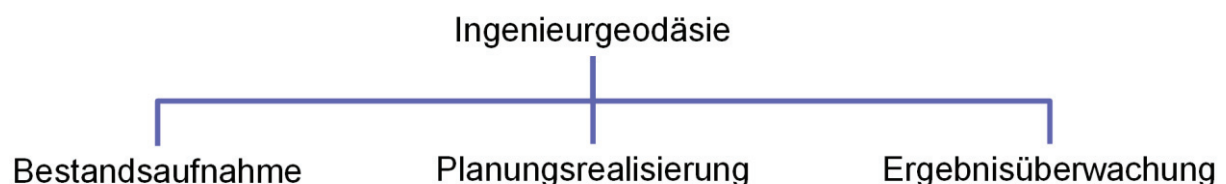


Abbildung 2.1: Unterteilung der Ingenieurgeodäsie

Aus Abbildung 2.1 wird ersichtlich, dass sich die Ingenieurvermessung mit dem kompletten Zyklus eines technischen Bauwerkes von der Bestandsaufnahme als Grundlage der Planung über die Planung selbst und deren Realisierung bis hin zur Überwachung des Bauwerkes befasst. Die Aufgabenbewältigung ist gekennzeichnet durch die Koordination des Vermessungsingenieurs mit anderen Ingenieursdisziplinen, vor allem dem Bauingenieurwesen. Ausgehend von den Genauigkeitsanforderungen muss die technische und wirtschaftliche Realisierung eines Projektes durch Auswahl von Messverfahren und Arbeitseinsatz festgelegt werden. Der Produktionsablauf oder Bauablauf darf durch die Arbeit nur möglichst wenig beeinträchtigt werden. [Möser, 4. Auflage 2012]

Der dritten Säule der Abbildung 2.1, der Ergebnisüberwachung soll im Zusammenhang mit dieser Bachelorarbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Geodätischen Überwachungsmessungen befassen sich mit der Planung, Durchführung, Auswertung und Dokumentation von Messvorhaben die Objektveränderungen beinhalten. Hierbei werden geometrische Objektveränderungen als Bewegungen und Verformungen erfasst. Das Ziel der Überwachungsmessungen ist der Nachweis des Verhaltens ausgewählter Objektpunkte. Dieses Verhalten kann entweder den zu erwartenden Veränderungen entsprechen oder abweichen. So werden geometrische Beziehungen der gewählten Objektpunkte quantisiert. Damit wird der Deformationszustand des überwachten Bauwerkes dokumentiert. Nachfolgend soll die Gesamtheit der Ziele aufgeführt werden.

- Nachweis der Stand- und Funktionssicherheit des zu überwachenden Bauwerkes, sowie der störungsfreie Betrieb
- Minderung des Gefährdungspotentials „Frühwarnung“ durch rechtzeitiges Erfassen von Veränderungen
- Beweissicherung zur Schadensdokumentation und zur Klärung der Ursachen von Schäden
- Möglichkeit zur Prognose des mutmaßlichen Verhaltens in der näheren Zukunft
- Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Modellvorstellung
- Erkenntnisgewinn für vergleichbare Objekte

Zur Realisierung von geodätischen Überwachungsmessungen werden zunehmend Multi-Sensor-Systeme verwendet.

2.2 Multi-Sensor-Systeme

Ein Sensor ist ein Bauteil, welches physikalische Eigenschaften erfasse und in elektrische Signale umformt. Diese werden eingeteilt in aktive und passive Sensoren. Aktive Sensoren wandeln die empfangene Energie, z.B. Licht mittels des Photoeffektes, direkt in elektrische Signale um. Passive Sensoren benötigen hingegen eine Versorgung mit elektrischer Energie. [Larisch, 2013]

Zusätzlich wird zwischen digitalen und analogen Sensoren unterschieden. Bei analogen Sensoren sind die Ausgangsgrößen elektrische Signale, bei digitalen Sensoren wird das Signal schon im Sensor selbst in digitale Form umgewandelt.

Eine Vielzahl von Sensoren ist in den gängigen Messgeräten verbaut. So benötigt ein Tachymeter mindestens einen Sensor zur Erfassung der Distanz und zwei Sensoren zur Erfassung der horizontal- und Vertikalrichtungen. Damit ist selbst ein Tachymeter schon ein Multi-Sensor-System. Daran ist ersichtlich dass das Messen heutzutage fast ausschließlich mit Multi-Sensor-Systemen erfolgt.

Tabelle 2.1: Einteilung von Multi-Sensor-Systemen [Sternberg, et al., 2014]

Bezeichnung	räumlich verteilt	redundant	sich ergänzend
Charakteristika	gleiche Sensoren erfassen dieselben Messgrößen an verschiedenen Orten	unterschiedliche Sensoren erfassen dieselbe Messgröße am selben Ort mit unterschiedlichen Messprinzipien	unterschiedliche Sensoren erfassen unterschiedliche Messgrößen am selben Ort die Kombination der Messgrößen ist zur Berechnung der Zielgröße erforderlich
Beispiel	GNSS-empfänger bestimmen die Koordinaten einer Staumauerkrone an zehn verschiedenen Orten	die Koordinaten eines Fahrzeuges werden gleichzeitig mittels GNSS-Empfängern und Tachymeter bestimmt	die mit einem Tachymeter bestimmten Koordinaten setzen eine Strecken und zwei Richtungsmessungen voraus

2.3 GNSS als Messsystem

Das Monitoring an der Marienkirche Neubrandenburg ist bisher mit Neigungssensoren, Beschleunigungssensoren und Tachymetern vorgenommen worden. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll nun auch Monitoring mittels GNSS stattfinden. Verschiedene Aspekte der Eignung von GNSS als Messsystem sollen in Kürze dargelegt werden.

Der vollautomatische Messablauf mit GNSS stellt hier einen herausragenden Vorteil dar. So muss nur das System installiert werden, dann kann die Messung und Auswertung automatisiert erfolgen. Dies bedingt auch eine automatische Alarmierung, falls gesetzte Grenzwerte überschritten werden. GNSS erlaubt eine hohe Abtastfrequenz. Die in diesem Projekt verwendeten Leica GMX902 Empfänger leisten eine Abtastfrequenz von 20 Hz. Damit können Schwingungen von bis zu 10 Hz erfasst werden. Im Gegensatz zu den Tachymetern wird hierbei keine direkte Sichtverbindung benötigt. Auch größere Abstände zwischen den Messpunkten können so realisiert werden. Dagegen wird aber für die Messung mit GNSS an den Messpunkten eine freie Himmelsicht benötigt um Abschattungen und Mehrwegeeffekte zu vermeiden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Zeiterfassung. Diese ist bei den GNSS Empfängern mit besonders hoher Genauigkeit möglich. Damit ist auch eine präzise Synchronisation der einzelnen Empfänger möglich. In der Zeitreihenanalyse ist die hohe zeitliche Genauigkeit eine der wichtigsten Eigenschaften, die eine Zeitreihe aufweisen sollte.

Ein breites Spektrum von Anwendungen für die Nutzung von GNSS als Messsystem steht zur Verfügung. Langsame Deformationen können mit statischen Messverfahren mit höchster Genauigkeit bestimmt werden. Schnelle Deformationen werden mit kinematischen Verfahren bestimmt. Hier ist die Genauigkeit etwas geringer.

Tabelle 2.2: Übersicht von Vor- und Nachteilen von GNSS als Messsystem

Vorteile	Nachteile
- Hohes Genauigkeitspotential	- Einsatz nur unter freiem Himmel
- Hohe Messrate	- Hohe Kosten, insbesondere für Zweifrequenzempfänger
- Einwandfreie Synchronisierung	
- Schnelle Datenanalyse	- GNSS typische Fehlereinflüsse (z.B. Mehrwegefehler)
- Hoher Automatisierungsgrad	

3 Entwurf und Realisierung einer Testvorrichtung und einer Antennenhalterung

3.1 Die Testvorrichtung

Ziel der Überwachungsmessungen an der Marienkirche soll ein Nachweis der Bewegungen des Kirchturmes infolge der Übertragung von Schwingungen des Glockenstuhls sein. Erwartet werden hier eine Amplitude im Dezimeterbereich und eine Schwingungsdauer im Sekundenbereich. Um geeignetes Messequipment bereitstellen zu können soll nun zuerst untersucht werden, ob die zu Verfügung stehenden Messgeräte überhaupt in der Lage sind die zu erwartenden Schwingungen signifikant zu erfassen. Daher ist es ratsam, im Vorfeld Schwingungen zu generieren, mit denen die Messgeräte auf Tauglichkeit überprüft werden können. Da im Labor keine Geräte zur Verfügung standen, mit denen die genannten Anforderungen realisiert werden konnten, kam der Gedanke auf, eine Vorrichtung zu entwickeln, die in der Lage ist, die prognostizierten Schwingungen zu erzeugen. Die zu untersuchenden Geräte sind die GNSS Empfänger Leica GMX902 und GMX901 sowie die Tachymeter TCRP1203 und TS30. Mit den GNSS Empfängern kann mit einer Datenrate von maximal 20 Hz abgetastet werden. Die Tachymeter liefern laut Bedienungsanleitung eine Datenrate von 10 Hz. Mit den GNSS Empfängern können also Schwingungen mit einer Dauer von 0,1 Sekunden erfasst werden und mit den Tachymetern Schwingungen der Dauer von 0,2 Sekunden. Weitere Ausführungen hierzu im Kapitel 5. Die Testvorrichtung sollte nun Schwingungen von maximal ca. 10 Hz und einer Amplitude in Zentimeterbereich erzeugen. Die geeignetste Lösung aus den genannten Anforderungen ergab für die Erzeugung der Schwingungen den Einsatz einer akkubetriebenen Säbelsäge wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist.



Abbildung 3.1: Akku-Säbelsäge

Der Antrieb der Säge wird normalerweise mit einem 18 V Akkumulator versorgt. Dieser erzeugt eine Schwingung mit einer Drehzahl von 2400 Umdrehungen pro Minute, was einer Frequenz von 40 Hz entspricht. Diese Frequenz übertrifft die erreichbare Abtastfrequenz bei weitem. Eine geringere Frequenz wird dadurch erreicht, dass statt dem Akkumulator ein Labornetzgerät verwendet wird. Hier kann die Spannung im Bereich von 0-18 V geregelt werden und somit eine beliebige Frequenz bis maximal 40 Hz eingestellt werden. Die Sägeblattbewegung muss nun möglichst reibungsfrei an ein Prisma oder eine GNSS Antenne übertragen werden können. Hier ist ein Auszug für ein Schwerlastregal als Bewegungsaufnahme verwendet worden, siehe Abbildung 3.2.

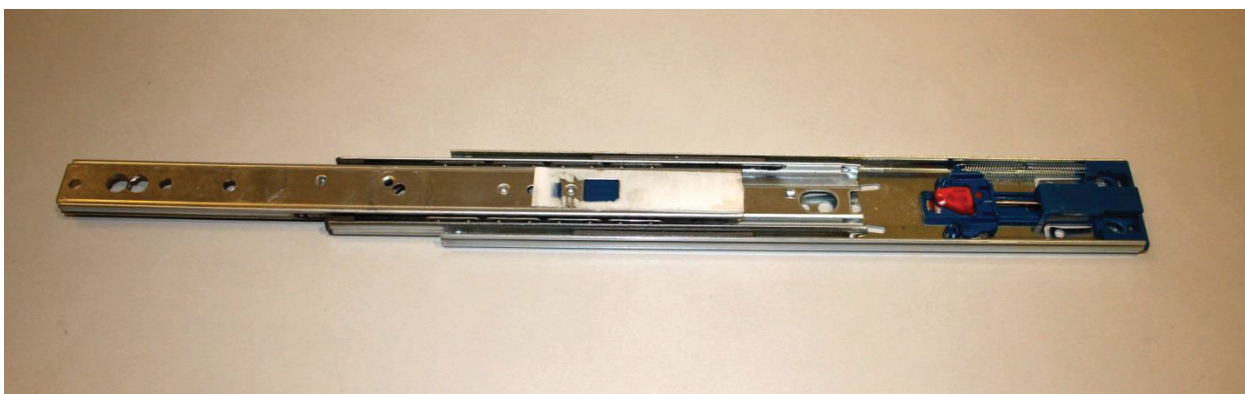


Abbildung 3.2: Auszug Schwerlastregal

Mittels eines Winkels wird die Bewegung an die innere Schiene des Schubladenauszugs übertragen. Auf diesem müssen nun verschiedene Adapter angebracht werden, damit die unterschiedlichen Messsysteme einzeln oder gemeinsam genutzt werden können. Die GNSS-Antenne, Reflektoren für die Tachymeter und Beschleunigungssensoren können somit an die Schiene angebracht werden, wie Abbildung 3.3.

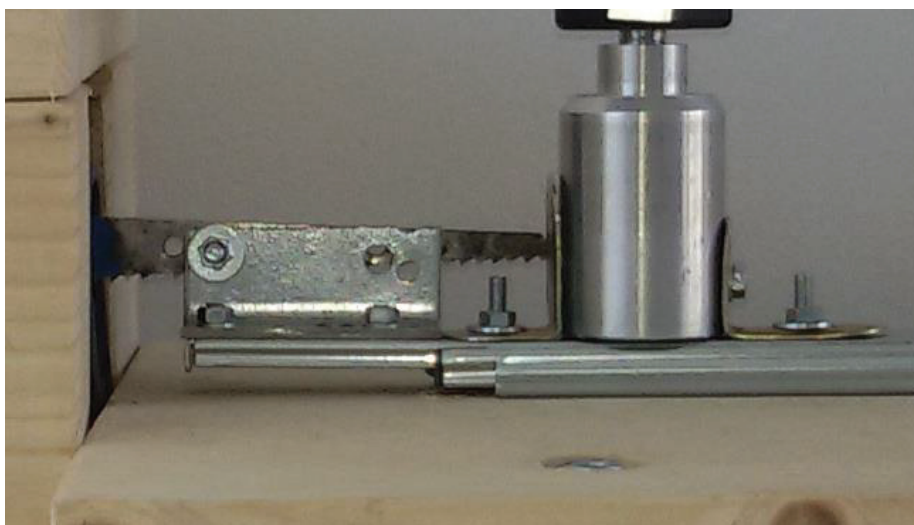


Abbildung 3.3: Schiene, Winkel und Reflektoradapter

Die Vorrichtung ist in einen Holzrahmen integriert worden, damit sich die Vorrichtung als gesamtes Bauteil schnell aufbauen lässt. Der Aufbau muss innerhalb des Labors sowie unter freiem Himmel, welches für den Test mit den GNSS-Empfängern erforderlich ist, erfolgen können.



Abbildung 3.4: Die aufgebaute Vorrichtung

Als Beschleunigungssensor wird der MEMS Sensor LSM330DLC des Herstellers STMicroelectronics verwendet, welcher im Samsung Galaxy S4 verbaut ist. Das Smartphone ist direkt auf der Schiene befestigt. Somit ist ein paralleler Betrieb zu jedem anderen Adapter sichergestellt. Eine Halterung aus zwei Metallwinkeln ist angebracht um einen schnellen Austausch der Adapter für verschiedene Messsysteme zu gewährleisten.

Tabelle 3.1: Kombinationsmöglichkeiten der Adapter

Adapter				
mögliche Messarten				
Tachymeter	nein	ja	ja	nein
Tachymeter doppelt	nein	nein	ja	nein
GNSS Lage	ja	nein	ja	nein
GNSS Höhe	nein	nein	nein	ja

3.2 Entwurf und Konstruktion einer Halterung für die GNSS-Antennen

Damit die Messung an der Marienkirche erfolgen kann, ist es erforderlich einen geeigneten Platz für die GNSS-Antennen zu finden. Die Möglichkeiten sind hierbei sehr begrenzt, da es sich bei dem Bauwerk um einen Kirchturm handelt. Zwei Kriterien standen bei dem Entwurf der Antennenhalterung im Vordergrund. Erstens soll die Vorrichtung sehr stabil gefertigt sein, da durch die Witterungseinflüsse am Kirchturm, insbesondere Wind, keine Schwingungen auftreten sollen, welche die auftretenden Messergebnisse verfälschen können. Zweitens soll die Antennenhalterung möglichst weit ausladend gebaut werden, da durch einen größeren Abstand vom Kirchturm aus die Abschattungseffekte kleiner werden. Diese beiden Prämissen verletzen sich leider gegenseitig, hier muss ein Kompromiss zwischen Abstand vom Kirchturm und Stabilität gefunden werden.

Der Entwurf der Antennenhalterung erfolgte mit dem CAD-Programm Inventor. Dieses CAD-Programm eignet sich vor allem im Bereich des Maschinenbaus und gehört zur Gruppe der parametrischen 3D CAD Programme.

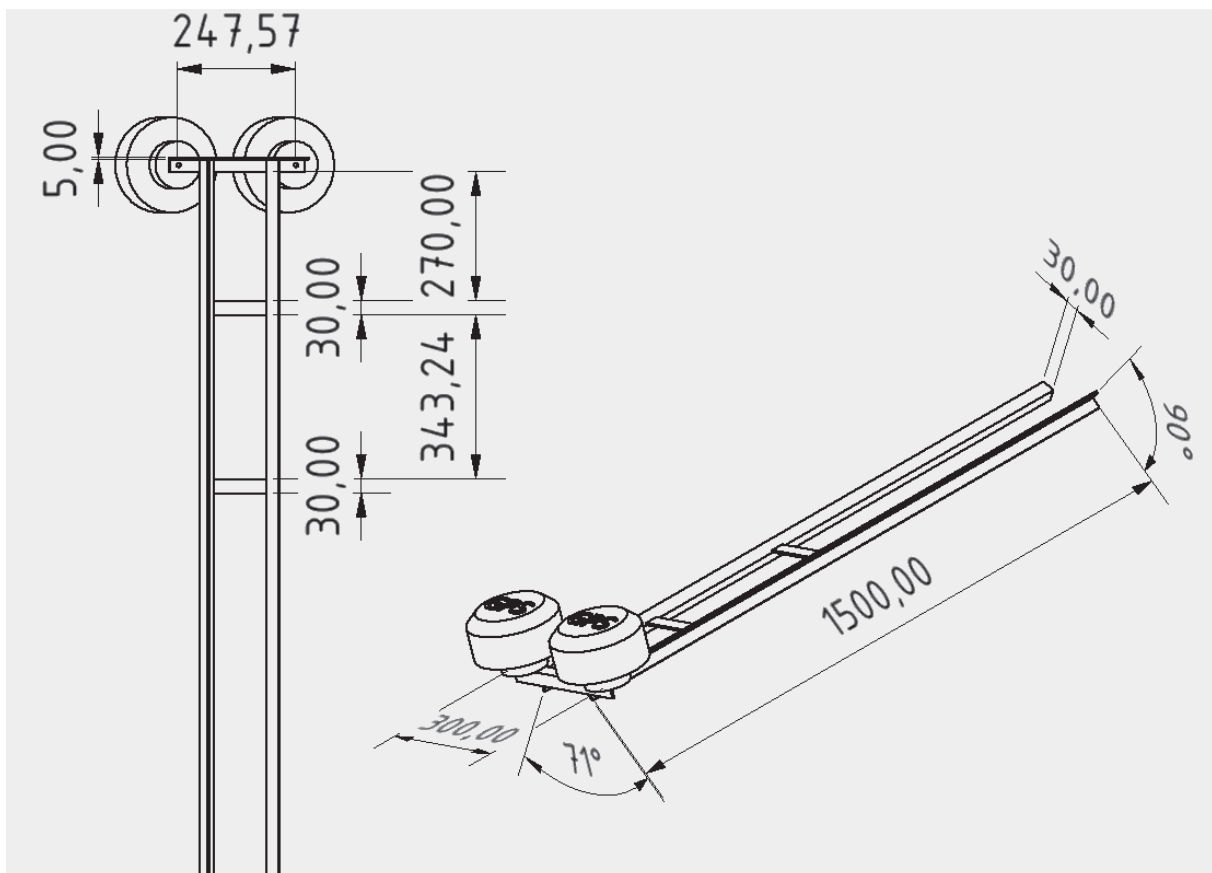


Abbildung 3.5: Zeichnungsableitung aus Inventor

In Abbildung 3.5 ist die Zeichnungsableitung aus Inventor dargestellt. Darin sind alle relevanten Maße für die Fertigung der Antennenhalterung vorhanden. Die Halterung ist dann von Herrn Sebastian Geschwind angefertigt worden.



Abbildung 3.6: Rohfertigung der Halterung mit GNSS Antennen

Die Halterung ist in mehreren Schritten auf korrekte Passung an den Kirchturm überprüft worden und wurde dann anschließend mittels Klebanker an den Turm angebracht.



Abbildung 3.7: Anbringen der Antennenhalterung

4 Analyse von Zeitreihen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird sich mit der Bewegung eines Kirchturmes befasst, welche durch das Läuten der Kirchenglocken hervorgerufen wird. Die Messwerte, die gesammelt und ausgewertet sollen sind zeitlich abhängig. Hierbei spricht man auch von stochastischen Prozessen. Stochastische Prozesse sind nicht vollständig vorhersehbar und unterscheiden sich dadurch von deterministischen Prozessen, deren Realisierungen $x(t)$ vollständig vorhersehbar sind. Die zeitlich geordnete Folge von Beobachtungen $x(t)$ zu diskreten Zeitpunkten ergibt dann eine Zeitreihe. Hierbei ist die Reihenfolge der Messungen relevant, Folgeglieder sind nicht stochastisch unabhängig. [Neuner, et al., 2009]

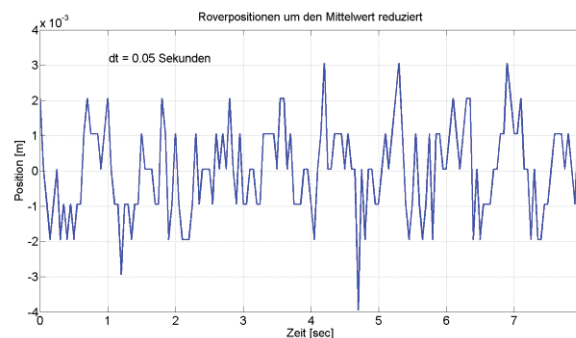


Abbildung 4.1: Beispiel für eine Zeitreihe

In dem in Abbildung 4.1 dargestellten Beispiel für eine Zeitreihe beträgt Δt 0,05 Sekunden. Dies wird als Schrittweite der Abtastung bezeichnet. Diese soll als konstant angenommen werden. Ist die Schrittweite nicht konstant ist eine korrekte Analyse einer Zeitreihe nicht möglich. Dies wird in Kapitel 6.5 am Beispiel von Zeitreihen einer Tachymetermessung beschrieben. Der Kehrwert $1/\Delta t$ ergibt dann die Abtastfrequenz.

Bei einem Zufallsprozess $X(t)$ sind $x_i(t)$ mit $i = 0, 1, 2, \dots, n$ die Realisierungen dieses Prozesses. Der Erwartungswert des stochastischen Prozesses wird in Formel 4.1 angegeben.

$$\mu_x(t) = E\{X(t)\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t)$$

Formel 4.1: Erwartungswert eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 30

Die Varianz eines stochastischen Prozesses wird in Formel 4.2 angegeben.

$$\sigma_x^2(t) = E\{[X(t) - \mu_x(t)]^2\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i(t) - \mu_x(t)]^2$$

Formel 4.2: Varianz eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 30

Die Autokovarianzfunktion gibt die Ähnlichkeit einer um die Zeit τ verschobene Folge $x(t + \tau)$ mit der ursprünglichen Folge $x(t)$ hat. Da Folgeglieder nicht stochastisch unabhängig sind beschreibt die Autokovarianzfunktion $C(\tau)$ diese Abhängigkeiten. [Neuner, et al., 2009]

$$C_{xx}(t, \tau) = E\{[X(t) - \mu_x(t)][X(t + \tau) - \mu_x(t + \tau)]\}$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \{[x_j(t) - \mu_x(t)][x_j(t + \tau) - \mu_x(t + \tau)]\}$$

Formel 4.3: Autokovarianzfunktion eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 31

Da die Autokovarianzfunktion nicht skaleninvariant ist wird diese normiert und man erhält die Autokorrelationsfunktion.

$$R_{xx}(t, \tau) = \frac{C_{xx}(t, \tau)}{\sigma_x(t) * \sigma_x(t + \tau)}$$

Formel 4.4: Autokorrelationsfunktion eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 32

Periodizitäten können in $C(\tau)$ und $R(\tau)$ abgelesen werden. Ebenfalls kann aus $R(\tau)$ entnommen werden inwiefern die Werte der Zeitreihe miteinander korreliert sind.

Zwei wichtige Bedingungen von Zeitreihen sind Stationarität und Ergodizität. Für die Einhaltung der Stationaritätsbedingung dürfen Mittelwert und Varianz der Zeitreihe über den ganzen Verlauf hin keine Änderungen aufweisen. Deshalb ist es besonders wichtig eine Zeitreihe vor ihrer Analyse von möglichen Trends zu befreien. Ergodisch ist eine Zeitreihe dann, wenn von dieser Zeitreihe auf eine andere gefolgert werden kann.

Bisher sind die Zeitreihen nur im Zeitberiech betrachtet worden, siehe Abbildung 4.1. Nun sollen die Periodizitäten mit ihren Frequenzen und Amplituden dargestellt werden. Dazu muss von der Darstellung im Zeitbereich in die Darstellung im Frequenzbereich übergegangen werden. Dieser Übergang kann durch die Fourier-Transformation vollzogen werden.

$$P(v) = 2 * \int_{\tau=0}^{\infty} C(\tau) * \cos(2 * \pi * v * \tau) d\tau$$

Formel 4.5: Fourier-Kosinus-Transformation [Foppe, 2015] S. 115

Durch die Fourier-Transformation ist mit $P(v)$ nur das Powerspektrum erhalten worden.

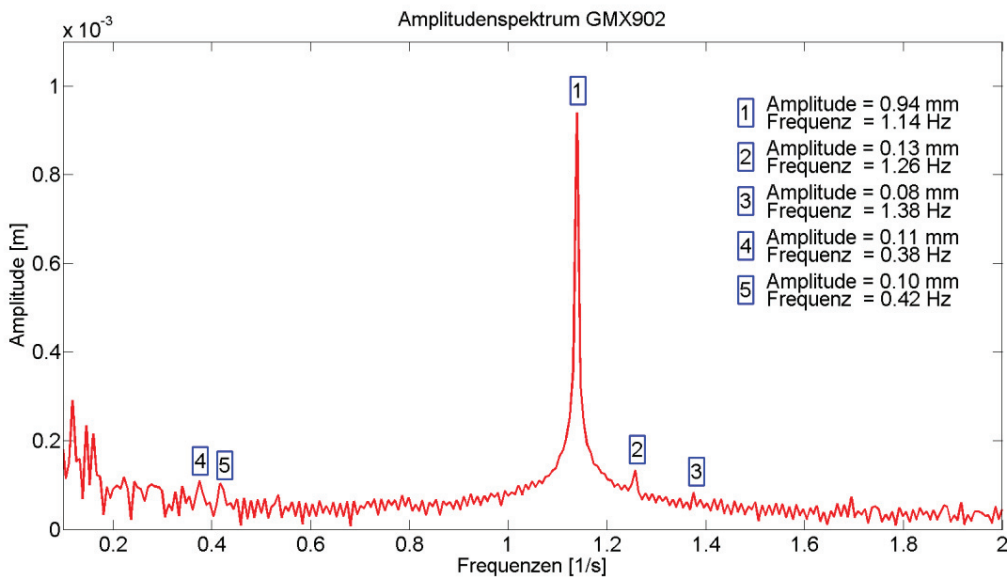


Abbildung 4.2: Beispiel für ein Energiespektrum

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswertung von Zeitreihen ist die Nyquist-Frequenz. Wird bei der Abtastung und späterer Rekonstruktion einer Schwingung eine ungeeignete (zu geringe) Abtastrate gewählt kann es zum Aliasing Effekt kommen. Dieser erzeugt eine neue Frequenz, die aber nicht identisch mit der eigentlich abgetasteten Frequenz ist, siehe Abbildung 4.3.

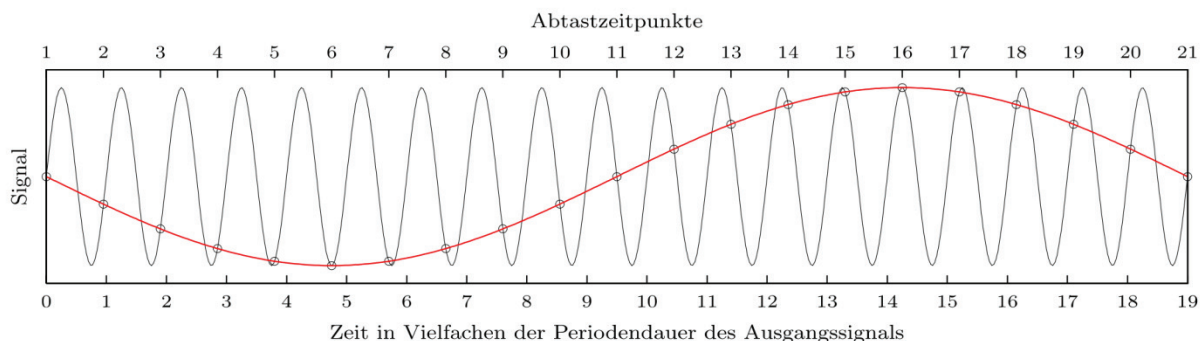


Abbildung 4.3: Darstellung eines Alias-Effektes [Wikipedia, 2016]

Als Faustformel lässt sich sagen, das immer mindestens doppelt so oft abgetastet werden muss als der Betrag der zu erwartenden Periodendauer.

$$v_N = \frac{1}{2 * \Delta t}$$

Formel 4.6: Nyquist-Frequenz

Im praktischen Einsatz sollte aber eine Abtastrate von mindestens fünf Messwerten pro Periode gewählt werden. [Muffert, et al., 2009]

5 Untersuchungen der Messinstrumente

Die ausgewählten Messinstrumente sollen auf ihre Tauglichkeit in Hinblick auf die anstehende Messaufgabe geprüft werden. Erwartet werden Schwingungen des Kirchturmes der Marienkirche im Frequenzbereich von ein bis zwei Hertz. Die Amplitude der Schwingungen wird mit ca. 6 - 10 cm angegeben. Zusätzlich zu den zu erwartenden Frequenzen und Amplituden wird untersucht bis in welchen Genauigkeitsbereich Messungen möglich sind. Die erreichten Genauigkeiten sollen mit den Genauigkeitsangaben aus den Datenblättern verglichen werden um diese zu verifizieren.

5.1 Lasertracker

Um die verschiedenen Messgeräte zu testen, ist die gängige Methode aufgegriffen worden, die Messergebnisse der zu testenden Geräte mit den Messungen eines Referenzgerätes höherer Genauigkeit zu vergleichen. Das Referenzgerät ist hierbei der Lasertracker Vantage des Herstellers Faro. Dieser verfügt über eine Abtastgeschwindigkeit von maximal 16000 Punkten pro Sekunde. Der mittlere prozentuale Fehler der Streckenmessung beträgt $16 \mu\text{m} + 0.8 \text{ ppm}$, sowie $20 \mu\text{m} + 5 \text{ ppm}$ bei der Winkelmessung. [Faro, 2012]



Abbildung 5.1: Faro Lasertracker Vantage

Die Messungen mit dem Lasertracker konnten in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurteam Nord in Stralsund durchgeführt werden. Dazu ist der Lasertracker auf dem Betriebsgelände des Ingenieurteam Nord aufgebaut worden, da die Messungen aufgrund der Verwendung

von GNSS im Freien durchgeführt werden mussten. Der Tracker ist in Bewegungsrichtung der Testvorrichtung aufgebaut worden. Bei den Testmessungen konnten das Tachymeter TS30, das GNSS Messsystem sowie der Beschleunigungsmesser des Smartphones Samsung Galaxy S4 überprüft werden.

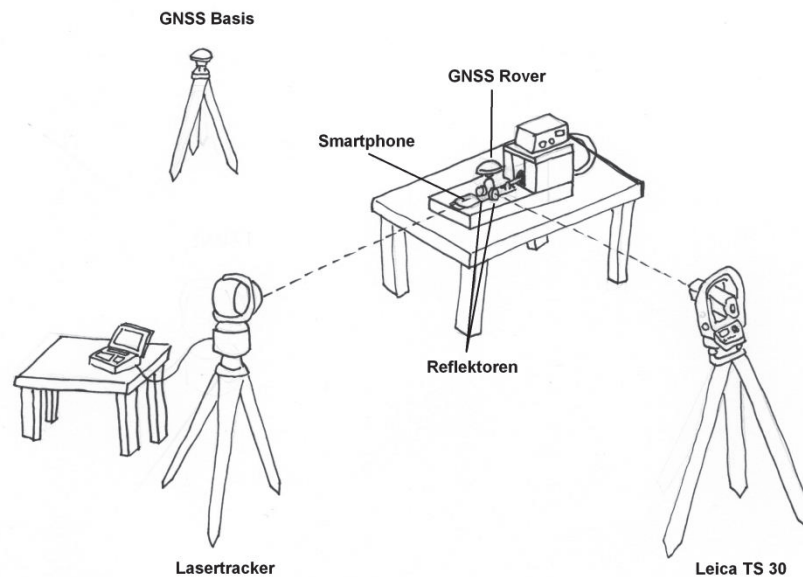


Abbildung 5.2: Messaufbau der kombinierten Testmessung

Zwei Wichtige Ergebnisgrößen der Messungen sind hier hervorzuheben. Erstens ist die richtige Wiedergabe der Frequenz notwendig und zweitens ist die Amplitude der zu detektierenden Schwingung essentiell wichtig. Amplitude und Frequenz sind bei der Nutzung der Testvorrichtung als bekannt vorauszusetzen, da die Säbelsäge einen konstanten Hub von 22 Millimeter aufweist. Somit sollte eine Amplitude von 11 Millimeter zu erwarten sein. Die Frequenz kann mit Hilfe eines Infrarotdrehzahlmessers direkt abgelesen werden. Die Berechnung der Frequenz soll direkt aus der Frequenzanalyse erfolgen. Bei der Berechnung der Amplitude kann das Ergebnis auch direkt aus der Frequenzanalyse entnommen werden. Diese Ergebnisse der Amplitudenbestimmung lieferten aber nicht korrekt die bekannten Werte, deshalb ist hier ein gesonderter Weg eingeschlagen worden.

Die Abtastrate des Lasertracker ist mit 100 Hz eingestellt worden. Die Frequenz der Bewegung des Prismas ist mit 1,8 Hz gewählt worden, da diese Frequenz der zu erwartenden Frequenz des Kirchturmes ähnlich sein sollte. Somit wird jede einzelne Schwingung mit ca. 55 Messungen abgebildet. Daraus lässt sich eine Sinuskurve mit hinreichender Genauigkeit rekonstruieren, siehe Abbildung 5.3.

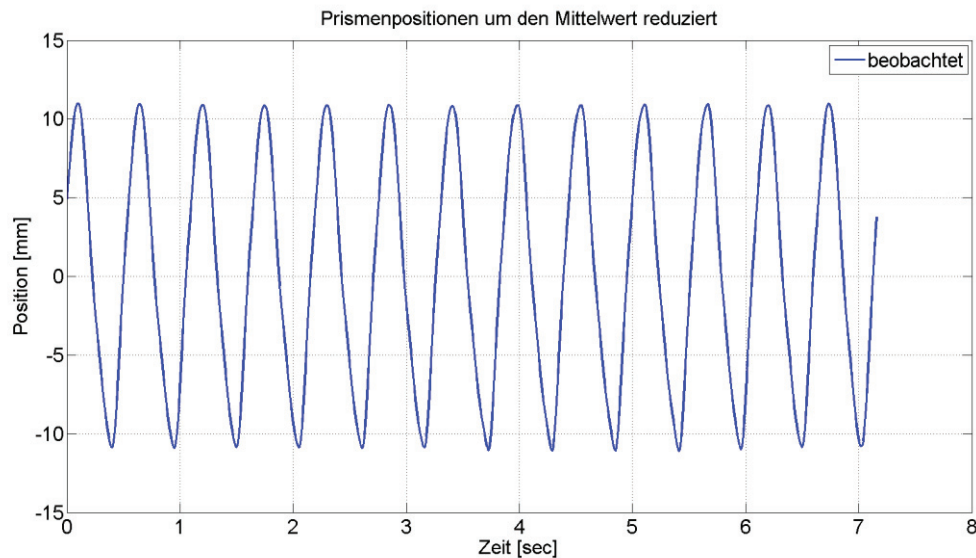


Abbildung 5.3: beobachtete Prismenpositionen des Faro Vantage

Diese beobachtete Zeitreihe ist schon während des Einlesens zur besseren Darstellung um den Mittelwert reduziert worden und muss nun von eventuellen Trends befreit werden. Durch die hohe Abtastrate und die hohe Messgenauigkeit des Lasertracker lässt sich die Frequenz und Amplitude schon aus dem Plot schätzen. Im nächsten Schritt wird die Autokorrelationsfunktion berechnet und geplottet, siehe Abbildung 5.4.

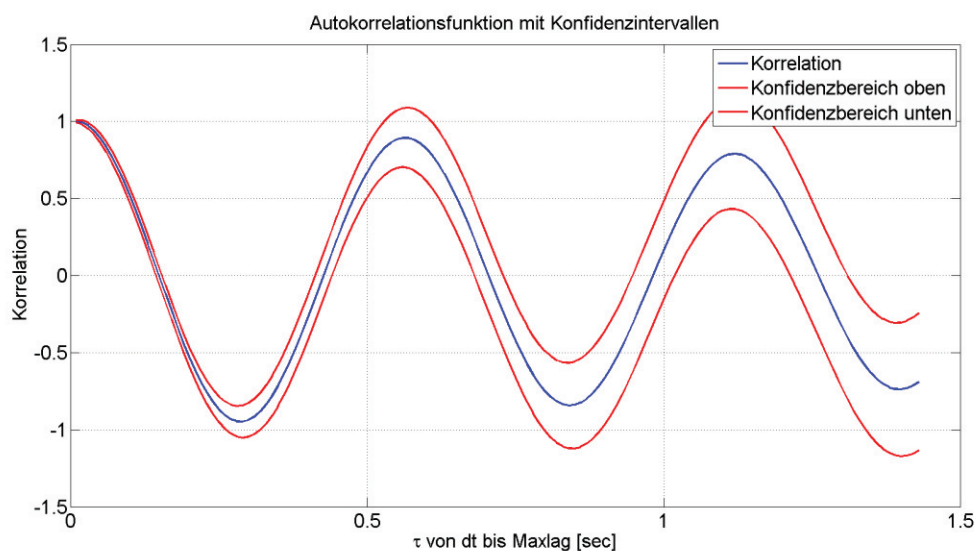


Abbildung 5.4: Autokorrelationsfunktion mit Konfidenzintervallen

Aus der Autokorrelationsfunktion erhalten wir nun die Frequenzanalyse, welche in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Hier ist zu sehen, dass Frequenz und Amplitude nachzuweisen sind. Bei der Berechnung der Amplitude ist festzustellen dass sich der berechnete Wert und der tatsächliche Wert um 0,7 Millimeter unterscheiden. Die Amplitude wird zu klein berechnet. In diesem Beispiel ist die Differenz noch in einem Bereich von sieben Prozent, aber dies ist auf die hohe Messgenauigkeit und vor allem auf die hohe Abtastrate zurückzuführen. Bei den zu prüfenden Messsystemen ist weder die Messgenauigkeit noch die Abtastrate so hoch.

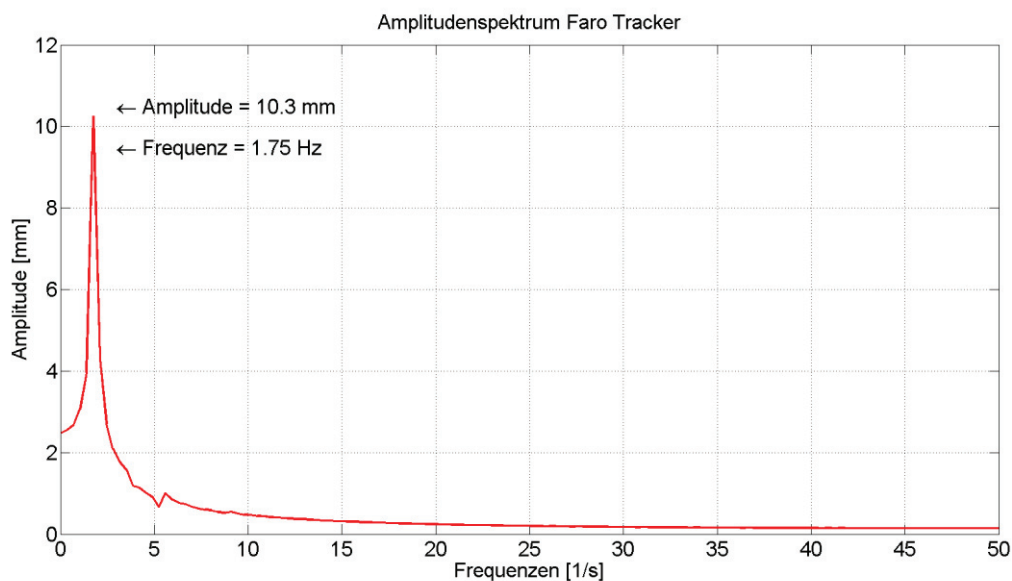


Abbildung 5.5: Amplitudenspektrum Faro Tracker

Um diesen Genauigkeitsverlust zu kompensieren, ist ein anderes Verfahren angewendet worden, um die Amplitude sowie die Frequenz zu bestimmen. Die in Abbildung 5.3 gezeigten Messdaten repräsentieren eine Schwingung. Diese Schwingung wird nun mit einer ausgleichenden Funktion der Schwingung approximiert. Die Schwingung ist durch die Parameter Amplitude (A_0), die Kreisfrequenz (ω) und den Phasenwinkel (φ) definiert. Diese Parameter werden nun mit der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt und dann mit den Sollwerten verglichen.

$$A(t) = A_0 * \sin(\omega t + \varphi)$$

Formel 5.1: ungedämpfte harmonische Schwingung

Zuerst sind die Näherungswerte der unbekanntenen Größen zu definieren. Diese können für A_0 und ω direkt aus der vorhergehenden Frequenzanalyse entnommen werden. Die Phasenverschiebung kann aus dem Plot der Messwerte abgeschätzt werden. Mit diesen

genäherten Unbekannten werden nun die genäherten Beobachtungen berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist nun in ein Diagramm geplottet worden um die Annahmen auf eventuelle Fehler zu überprüfen, siehe Abbildung 5.6.

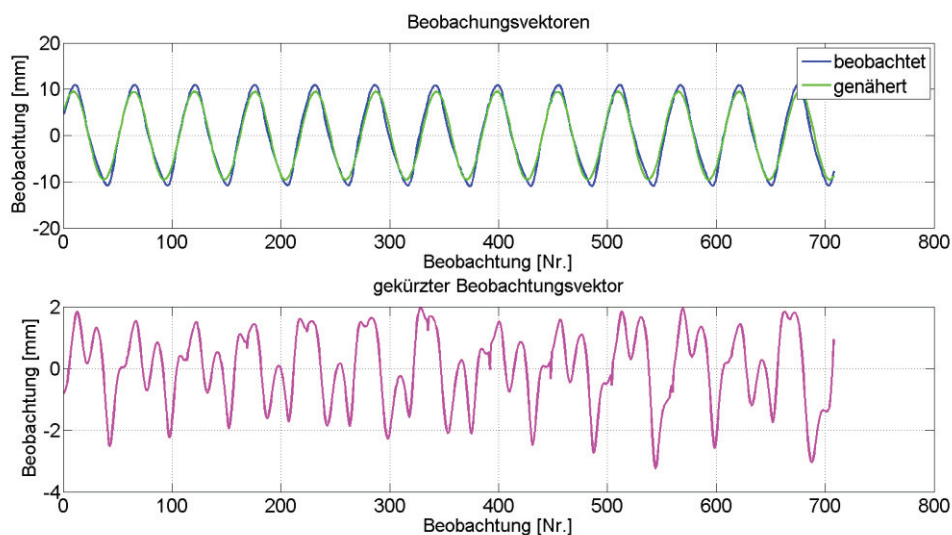


Abbildung 5.6: Beobachtungen, Näherungswerte und gekürzte Beobachtungen

Ist die Überprüfung der Näherungswerte anhand des Plots positiv ausgefallen, kann nun der Ausgleichsalgorithmus durchlaufen werden. Als Ergebnis werden nun die Parameter der Schwingungsgleichung ausgegeben. Ein großer Vorteil der Ausgleichung ist auch der Erkenntnisgewinn über Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsparameter. Neben den Parametern der Schwingung erhalten wir ebenfalls die Standardabweichungen der ausgeglichenen Unbekannten. Somit können die Parameter der Schwingung auf ihre Signifikanz geprüft werden. In Abbildung 5.7 ist die ausgeglichene Schwingung dargestellt.

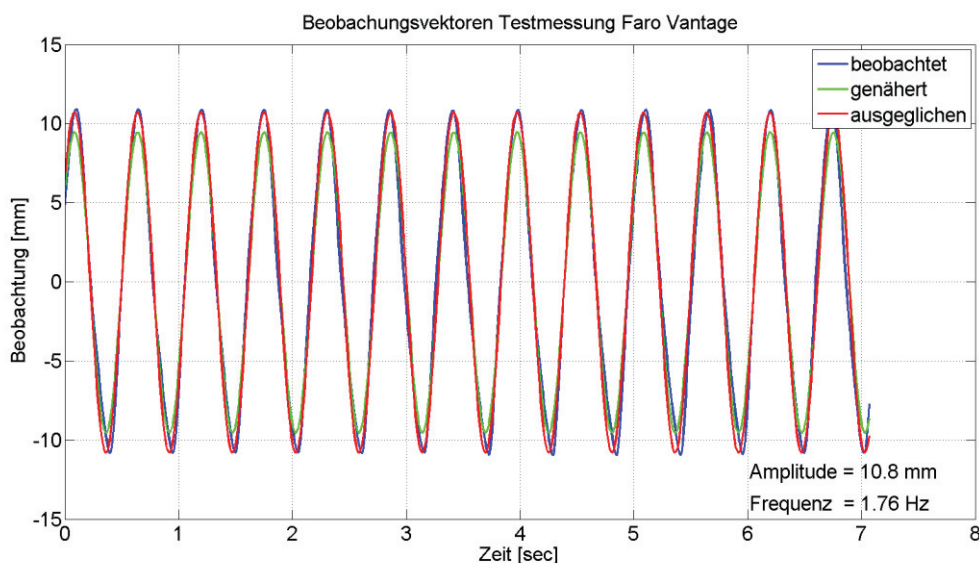


Abbildung 5.7: ausgeglichene Schwingung

Die Ergebnisse für die Amplitude und Frequenz aus der ausgeglichenen Funktion stimmen mit den Ergebnissen der Frequenzanalyse überein, siehe Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Vergleich der Ergebnisse der Bestimmung von Frequenz und Amplitude der Messung mit dem Lasertracker

Bestimmungsmethode	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
Frequenzanalyse	1.75	10.3
Ausgleichung	1.76	10.8

5.2 GNSS

Zur Messung an der Marienkirche werden zwei Leica GMX902 Zweifrequenzempfänger genutzt, Als Antennen stehen zwei Leica AS10 zur Verfügung. Die GMX902 Empfänger besitzen eine Datenerfassungsrate von 20 Hz. Damit können Frequenzen von bis zu 10 Hz detektiert werden. Zusätzlich sollte noch ein Leica GMX901 Einfrequenzempfänger mit integrierter Antenne untersucht werden. Der Leica GMX901 Empfänger hat aber nur eine Erfassungsrate von 1 Hz. Damit lassen sich nur Frequenzen kleiner als 0,5 Hz erfassen. Somit ist dieser Empfänger für die vorgegebene Messaufgabe ungeeignet.

Die gewonnen Daten werden von der Leica Spider Software in Echtzeit ausgewertet und als Textfile auf einem Notebook gespeichert. Mit dem jeweiligen Textfile wird unter Nutzung von MATLAB-Programmen eine Auswertung als Frequenzanalyse und ausgleichende Funktion vorgenommen. Die MATLAB-Programme sind in Anlehnung an die Programme der Vorlesung „Analyse stochastischer Prozesse“ des 6. Semesters programmiert worden.

5.2.1 Testmessung im Vergleich zum Lasertracker

Die eingelesen Daten, um den Mittelwert reduziert, werden nun zuerst dargestellt, siehe Abbildung 5.8. Dies entspricht dem Ablauf der Auswertung der Trackermessung.

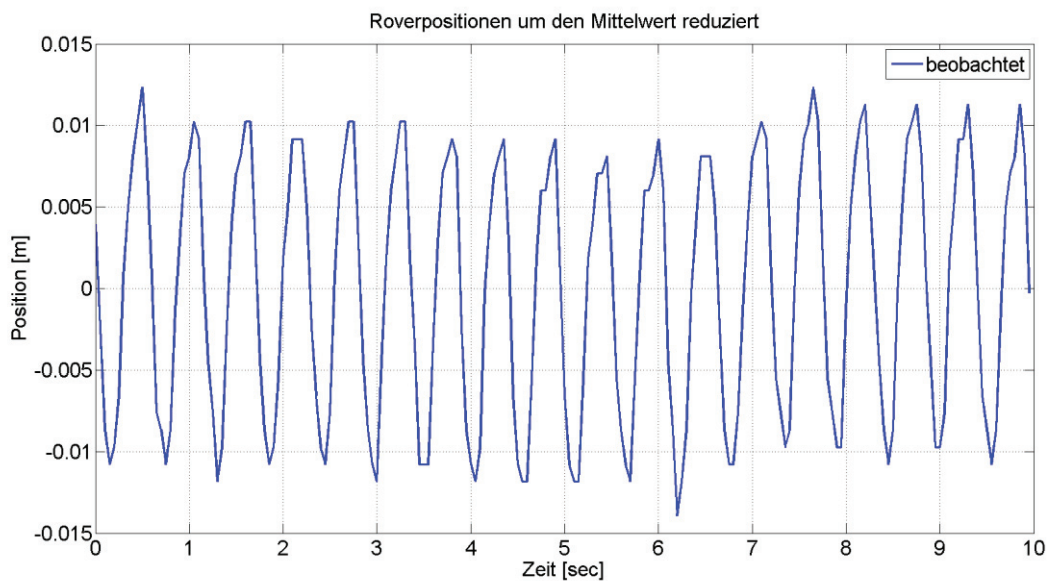


Abbildung 5.8: Roverpositionen

Hier wird die geringere Abtastrate schon anhand des Betrachtens des Plots sichtbar. 20 Hertz Abtastfrequenz ergeben 11 Abtastpunkte pro Schwingung von 1,8 Hz. Dadurch wird die Funktion nicht mehr so genau approximiert. Dennoch lassen sich die Parameter der Schwingung auch hier bestimmen.

In Abbildung 5.9 ist die Autokorrelationsfunktion und in Abbildung 5.10 das Amplitudenspektrum dargestellt. Amplitude und Frequenz können auch hier mit hoher Genauigkeit bestimmt werden.

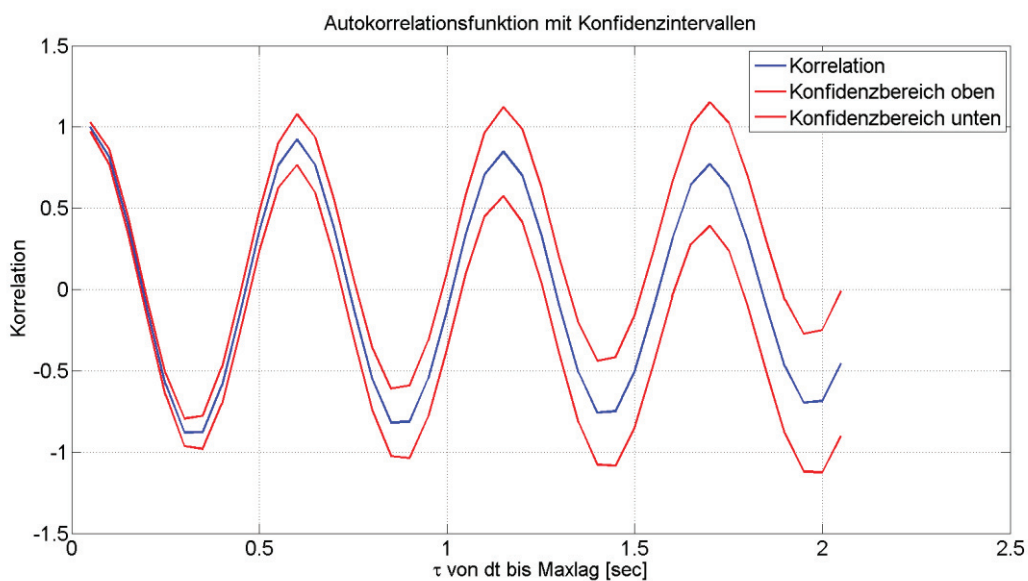


Abbildung 5.9: Autokorrelationsfunktion GMX902

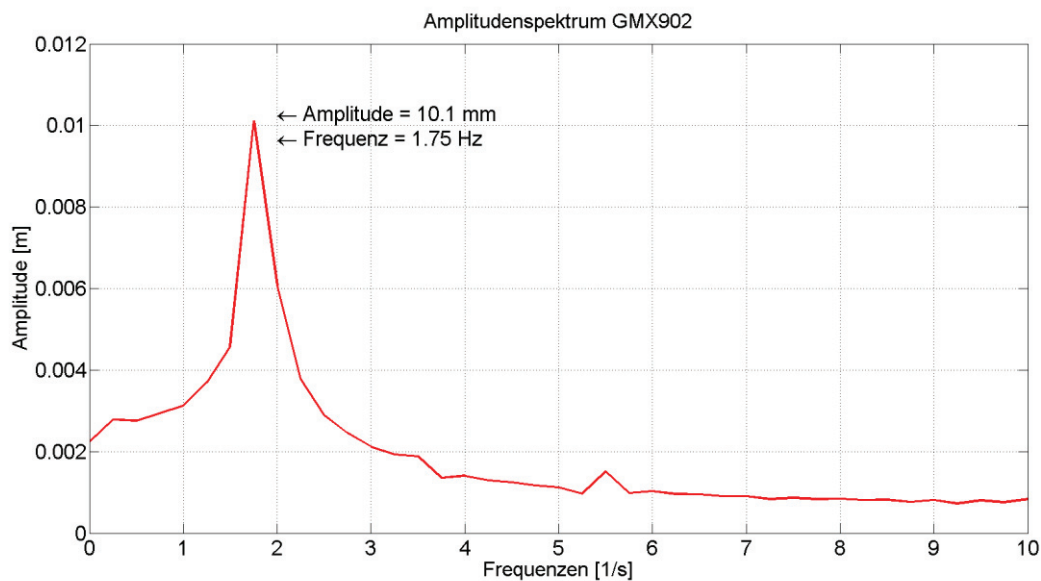


Abbildung 5.10: Amplitudenspektrum der GNSS Testmessung

Auch hier werden die berechneten Werte der Frequenzanalyse mit den Werten der ausgleichenden Funktion verglichen. Die Näherungswerte sind wieder aus der Frequenzanalyse übernommen worden.

Die genäherten Werte stimmen gut mit den tatsächlichen Beobachtungen überein. Die genäherten Beobachtungen sind in den Plots als grüne Linien zu sehen. Die Amplitude wirkt etwas zu klein. Dies ist so beabsichtigt, so können die genäherten Beobachtungen und die tatsächlichen Beobachtungen besser unterschieden werden.

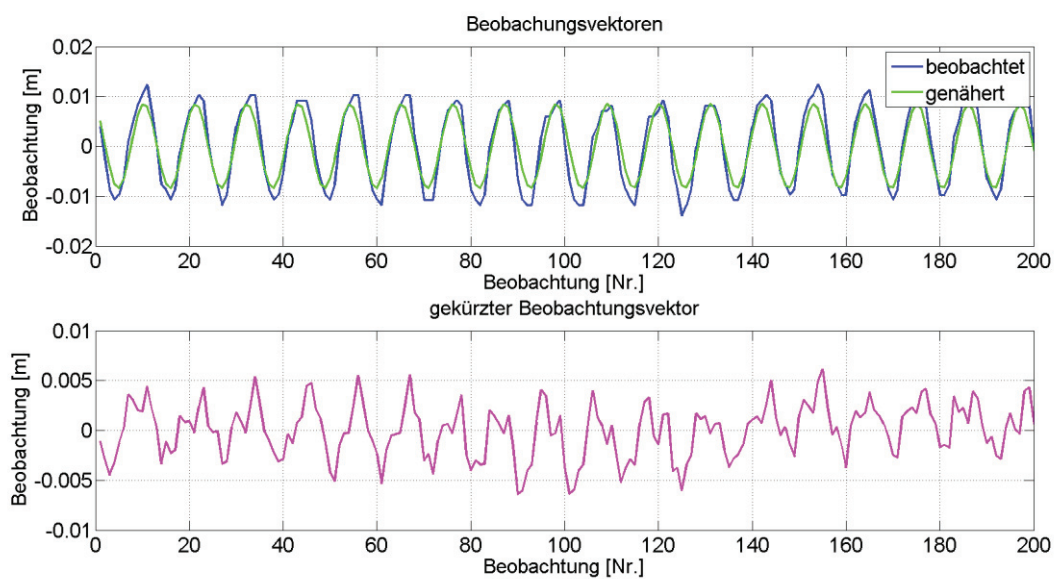


Abbildung 5.11: genäherte und gekürzte Beobachtungen Testmessung GMX902

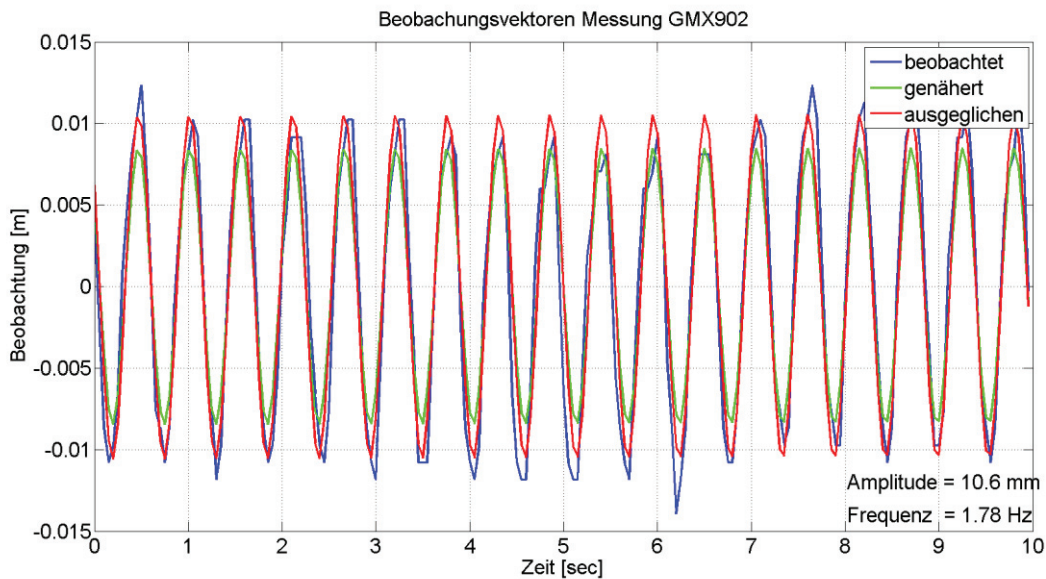


Abbildung 5.12: ausgeglichene Schwingung der GNSS Testmessung

Die Ergebnisse sind sich sehr ähnlich, die Frequenz unterscheidet sich erst in der zweiten Nachkommastelle und die Amplitude wird bei der Ausgleichung etwas besser wiedergegeben, siehe Tabelle 2.1. Der Nachweis von Frequenz und Amplitude sind sehr genau möglich, obwohl die Auslenkung der Schwingung hier nicht größer ist als die angegebene Messgenauigkeit. In weiteren Testmessungen werden die minimal zu erfassenden Amplituden bestimmt.

Tabelle 5.2: Vergleich der Bestimmungsmethoden für die GNSS Testmessung

Bestimmungsmethode	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
Frequenzanalyse	1.75	10.1
Ausgleichung	1.78	10.6

5.2.2 Testmessung in Bezug auf geringe Lage- und Höhenveränderungen

Um den minimalen Verschiebebetrag festzustellen, welcher noch detektiert werden kann wurde die Testvorrichtung so gegen die Richtung von Gitternord platziert, dass die Abweichung zu Gitternord nur 8 ° betrug. Der Sinus aus 8 ° mit einer Strecke von 11 mm multipliziert, was dem halben Hub der Stichsäge entspricht, wird eine Amplitude von 1,5 mm

erwartet. Die Testvorrichtung wurde auf eine Frequenz von 2 Hz eingestellt. Daraufhin wurde überprüft, ob diese Frequenz mit der entsprechenden Amplitude festzustellen ist.

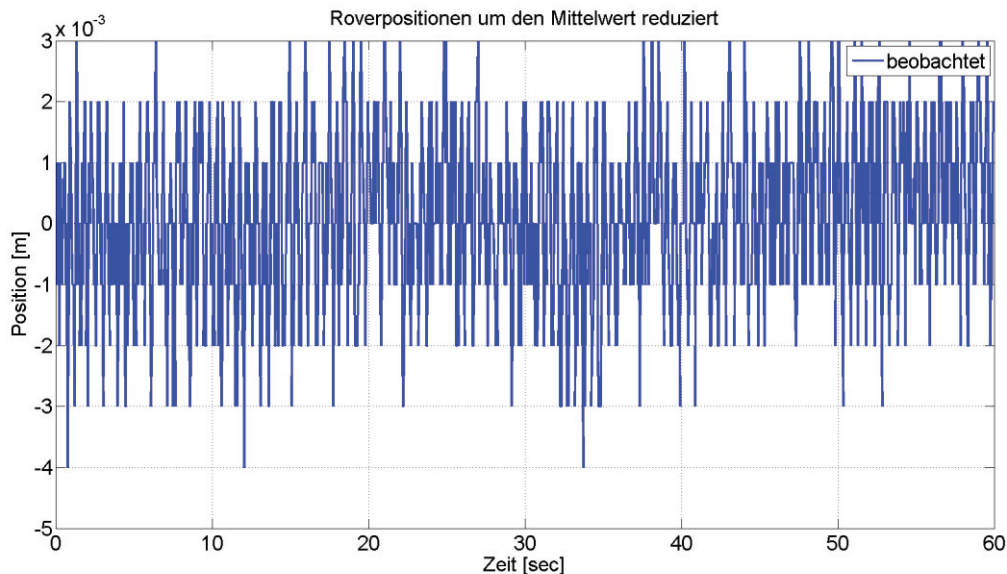


Abbildung 5.13: Testmessung GMX902 mit geringer Abweichung zu Gitternord

Aus der Plotansicht in Abbildung 5.13 kann keine Aussage über die Bewegung gemacht werden. Dazu ist hier die Frequenzanalyse notwendig.

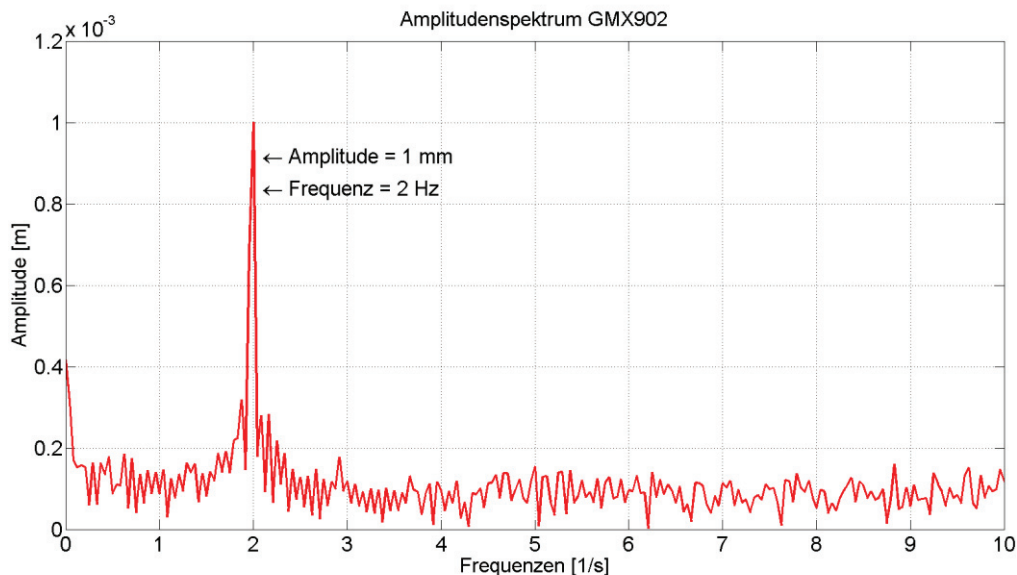


Abbildung 5.14: Amplitudenspektrum der Testmessung mit geringer Nordabweichung

Im Amplitudenspektrum ist die Frequenz von 2 Hz vorhanden. Die Amplitude ist mit 1 mm kleiner ausgefallen als vorgegeben. Dennoch zeigt dieses Beispiel das sich Amplituden von 1,5 mm in der Lage feststellen lassen.

Wie bei der Lagemessung wird auch bei der Höhenmessung verfahren. Hier wird allerdings ein spezieller Adapter benötigt, der die Schrägstellung der Antenne wieder ausgleicht. Dazu standen Adapter mit einem Winkel von 30° und 15° zur Verfügung. Nachfolgend wird eine Messung mit dem 15° Adapter dargestellt.



Abbildung 5.15: Antennenadapter 15° und 30°

Mit dem 15° Adapter lässt sich eine Höhenänderung von $\sin(15^\circ) \cdot 11\text{mm}$, also 3 Millimeter realisieren. Diese Amplitude mit einer voreingestellten Frequenz von 2 Hz soll nun nachgewiesen werden.

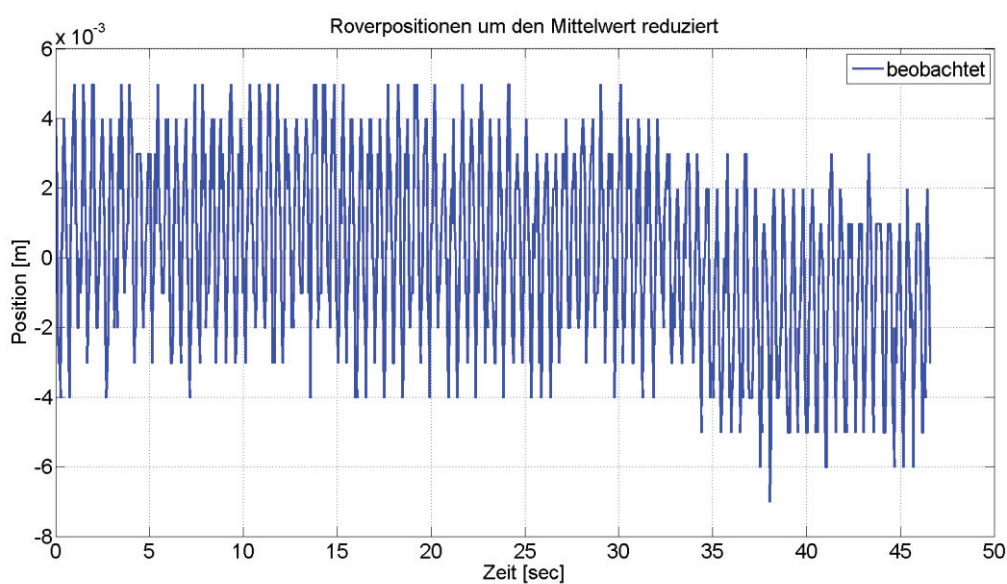


Abbildung 5.16: Testmessung mit geringer Höhenänderung

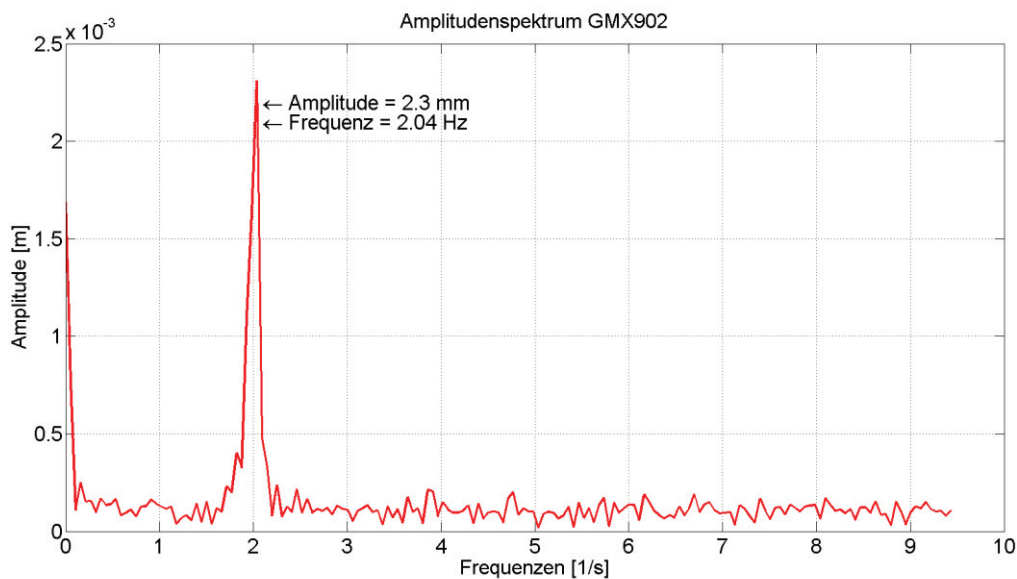


Abbildung 5.17: Amplitudenspektrum der Testmessung mit geringer Höhenänderung

Die Frequenz und Amplitude können wieder festgestellt werden, wobei die Amplitude wieder etwas zu klein ausgegeben wird. Eine Höhenänderung von ± 3 mm bei einer Frequenz von 2 Hz ist aufdeckbar. Somit ist das GNSS Messsystem für die Messaufgabe an der Marienkirche geeignet.

5.3 Beschleunigungssensor

Auf der Testvorrichtung ist zu jeder Messung ein Smartphone befestigt, welches Beschleunigungsdaten aufzeichnet. Zunächst soll die vergleichende Messung mit dem Lasertracker ausgewertet werden. Leider ist die Erfassungsrate der Beschleunigungsdaten nicht korrekt eingestellt worden, so ist nur mit einer Erfassungsfrequenz von 5,55 Hz gearbeitet worden. Dies hat zur Folge dass eine ganze Schwingung von 1,8 Hz nur mit drei Messungen abgetastet wurde. Es ist zu erwarten, dass die Parameter der Schwingungsgleichung nur mit schlechter Qualität abgebildet werden, da durch die geringe Erfassungsrate ungenaue Werte zu erwarten sind.

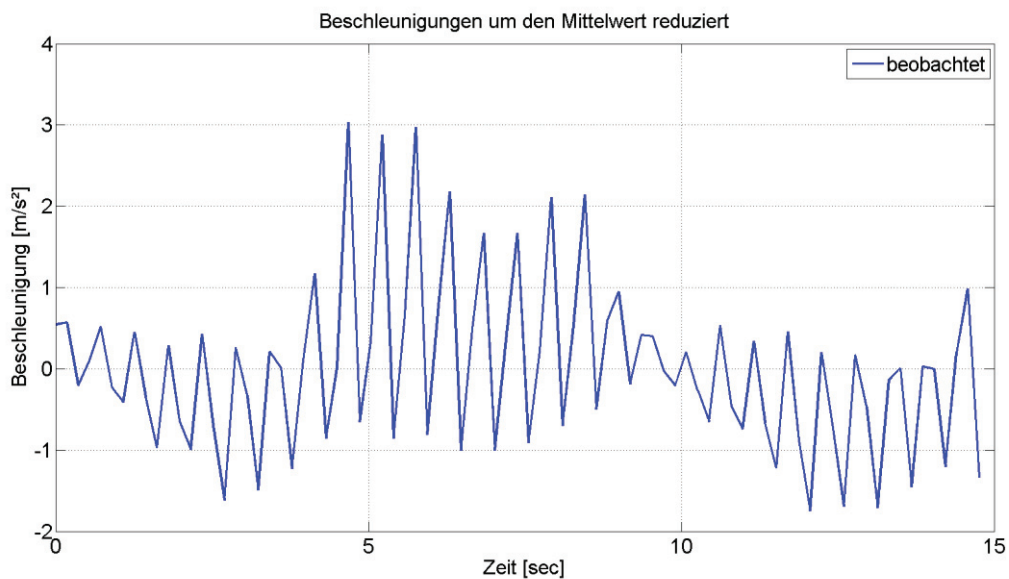


Abbildung 5.18: Beschleunigungswerte um den Mittelwert reduziert der Testmessung mit dem Samsung Galaxy S4

Aus der Abbildung 5.18 wird ersichtlich, dass die maximale Auslenkung der Schwingung aufgrund der geringen Abtastrate nur selten detektiert wurde. Die Frequenzbestimmung sollte aber trotzdem möglich sein.

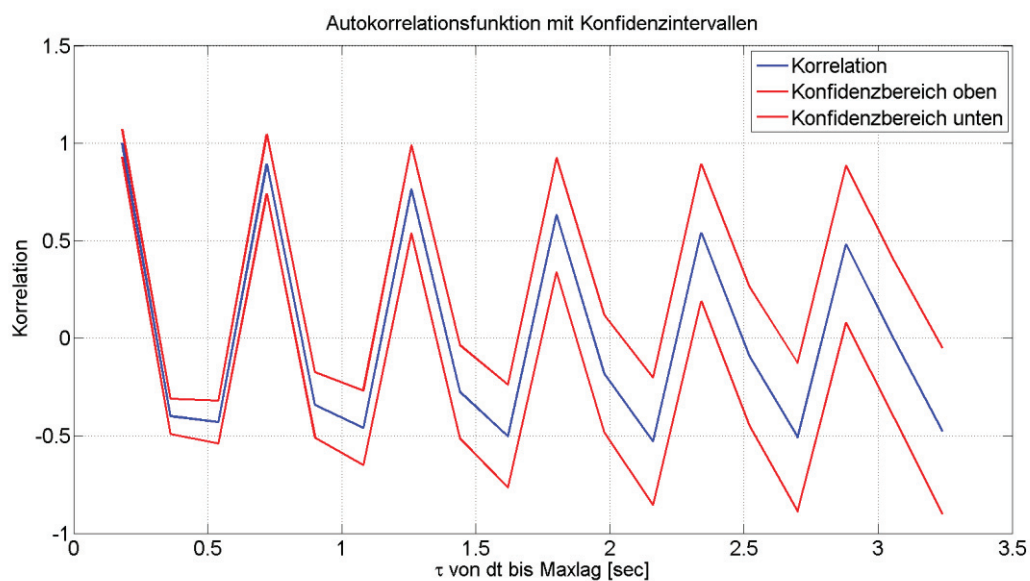


Abbildung 5.19: Autokorrelationsfunktion der Testmessung mit dem Samsung Galaxy S4

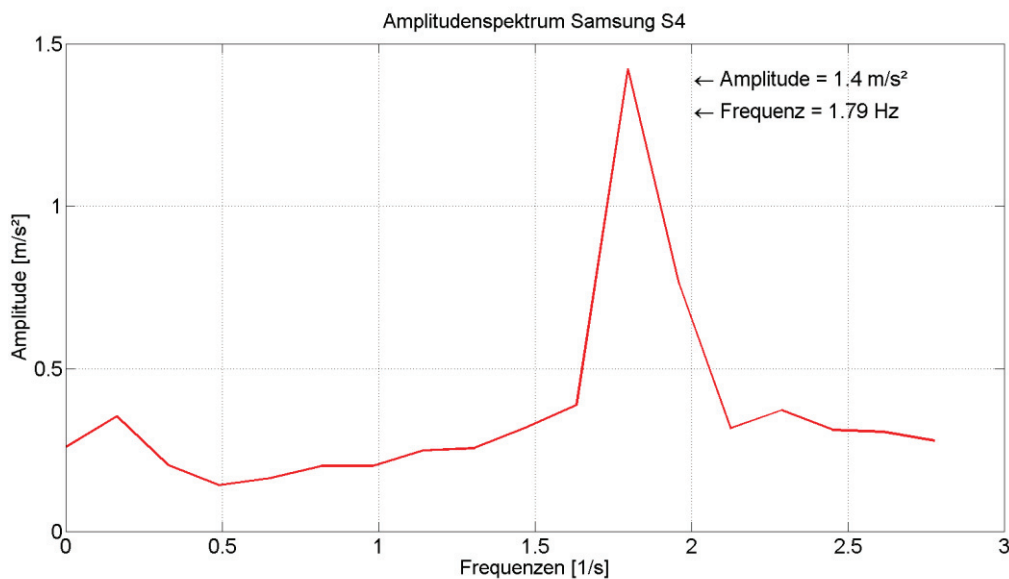


Abbildung 5.20: Amplitudenspektrum der Smartphone Testmessung

Abbildung 5.19 zeigt einen sehr abgehackten Verlauf der Autokorrelationsfunktion. Die geringe Erfassungsrate verhindert hier die genauere Darstellung. Im Verlauf der Funktion zeigt sich dennoch die Korrelationslänge ab. Die Frequenz wird mit 1,79 Hz bestimmt, dies ist ein Wert, welcher nur um 3 % von der Sollbestimmung mit dem Lasertracker abweicht. Abschließend lässt sich sagen, dass die Frequenzanalyse möglich ist, aber eine höhere Datenrate notwendig ist.

Die Amplitude ist mit 1,4 m/s² bestimmt worden. Dieser Beschleunigungswert hat nur wenig praktischen Nutzen. Eine wichtigere Information ist hierbei die Amplitude der Auslenkung, also der Weg. Aus Beschleunigungswerten lässt sich durch doppelte Integration der Weg bestimmen. Somit muss die Sinusschwingung der Beschleunigung doppelt nach der Zeit integriert werden. Die Schwingungsgleichung aus Formel 5.1 lässt sich auch für die Beschleunigung anwenden.

$$A(t) = A_B * \sin(2\pi ft + \varphi)$$

Formel 5.2: Schwingungsgleichung der Beschleunigung

A_B ist hier die Amplitude der Beschleunigung, f die Frequenz und φ die Phasenverschiebung. Durch Integration von Formel 5.2 wird die Geschwindigkeit erhalten, siehe Formel 5.3.

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

Formel 5.3: Geschwindigkeit, die erste Integration der Beschleunigung nach der Zeit

Die Amplitude der Beschleunigung ist um den Faktor $2*\pi*f$ größer als die Amplitude der Geschwindigkeit. Die Integrationskonstante C muss berücksichtigt werden, da sie als Offset wirkt und die eigentliche Funktion verschiebt. Sie kann durch Zentrierung der nun erhaltenen Werte eliminiert werden. Es erfolgt im nächsten Schritt eine weitere Integration von der Geschwindigkeit nach der Zeit zum Weg.

$$\int \int A dt dt = \int \int A_B * \sin(2\pi ft + \varphi) dt dt$$

Formel 5.4: der Weg, die zweite Integration der Beschleunigung nach der Zeit

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

Formel 5.5: Ergebnis der doppelten Integration

In Formel 5.4 wird ersichtlich das die Amplitude des Weges um $4* \pi^2*f^2$ kleiner ist als die Amplitude der Beschleunigung. So kann mit Kenntnis der Parameter der Schwingungsgleichung der Beschleunigung direkt die Amplitude des Weges bestimmt werden. In diesem Beispiel ist die Frequenz mit 1,8 Hz angegeben, somit wird aus den 1,4 m/s² ein Wert von 11 mm erhalten, da der Divisor einen Betrag von 127,9 s² aufweist. Ist die Integrationskonstante C aus der ersten Integration nicht durch Zentrierung eliminiert worden, wandelt sich diese Konstante in eine Funktion ersten Grades $C*t$. Das hat zur Folge, dass die entsprechende Position nun trendbehaftet „wegläuft“. Ein weiteres Offset wird durch die Integrationskonstante \tilde{C} erhalten, welches aber wiederum durch Zentrierung der Funktion zu eliminieren ist.

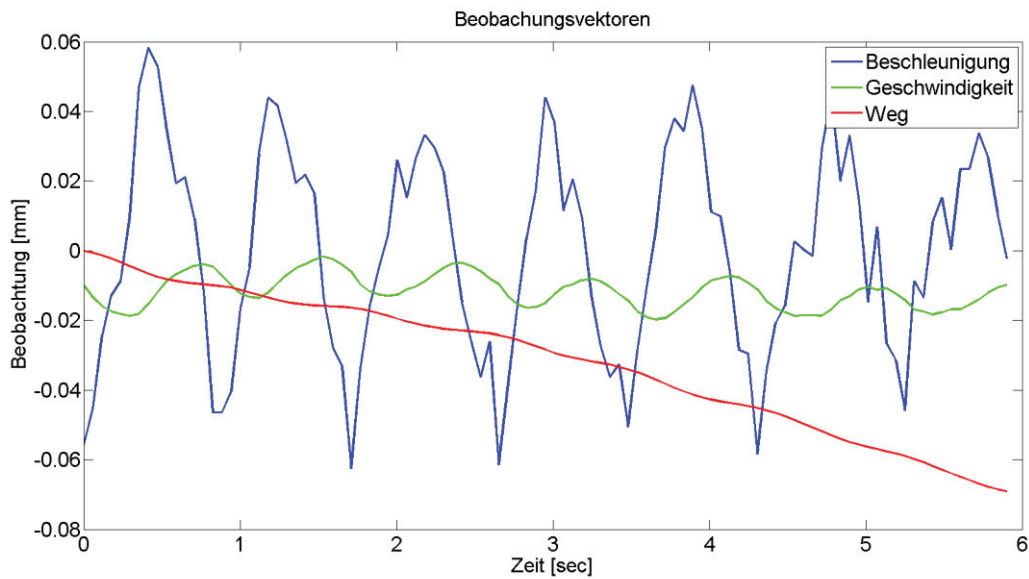


Abbildung 5.21: Integration ohne Trendberücksichtigung

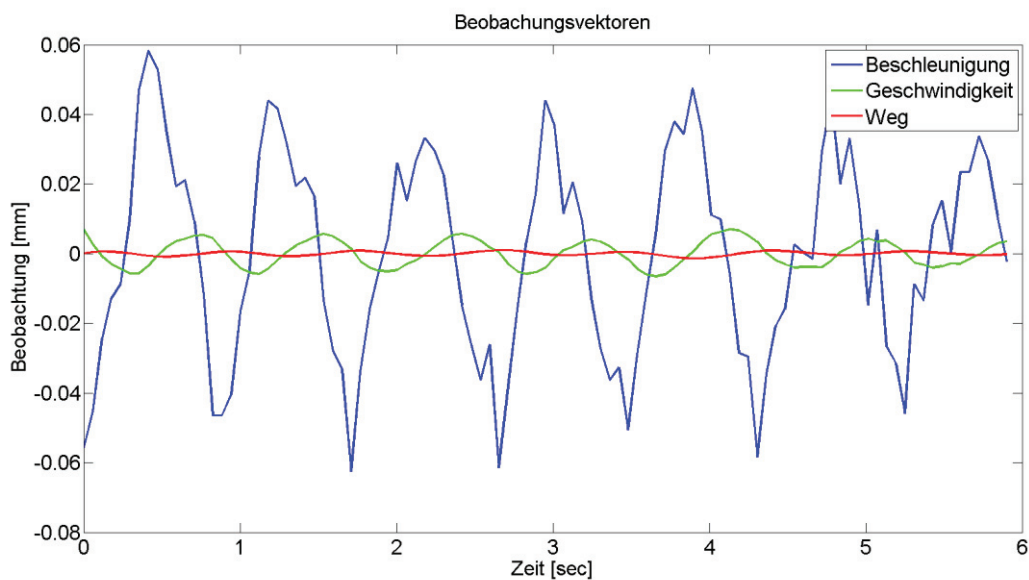


Abbildung 5.22: Integration mit Trendberücksichtigung

Abbildung 5.21 zeigt an einem Beispiel die Folgen einer Nichtberücksichtigung der Integrationsvariablen. Die Position des Messgerätes „läuft weg“. Schon nach kurzer Zeit sind die gewonnenen Daten nicht mehr brauchbar. Daher müssen die Trends immer streng berücksichtigt werden. In Abbildung 5.22 ergibt sich ein sinnvoller Verlauf des Weges.

Auch die Messdaten des Smartphones sollen mit der Methode der ausgleichenden Sinusfunktion bearbeitet werden. Ein Vergleich mit den ermittelten Werten für die Parameter der Schwingungsgleichung ist auch hier zur Verifizierung angebracht. Da die

Messrate leider sehr gering eingestellt wurde, kann nur ein kleiner Abschnitt der Daten sinnvoll berechnet werden. Dieser ist in Abbildung 5.23 dargestellt.

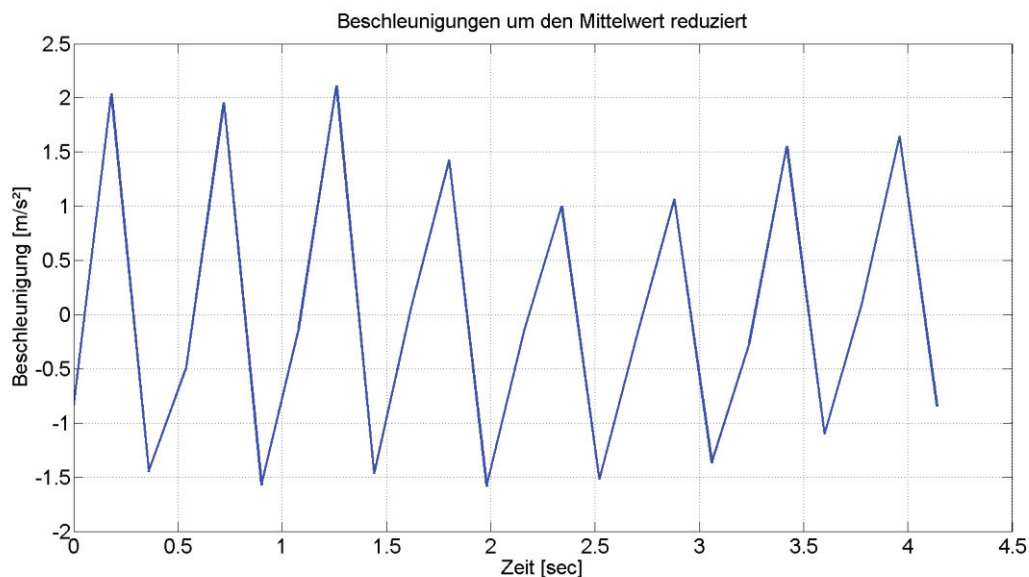


Abbildung 5.23: Abschnitt der Messdaten des Smartphones Samsung S4

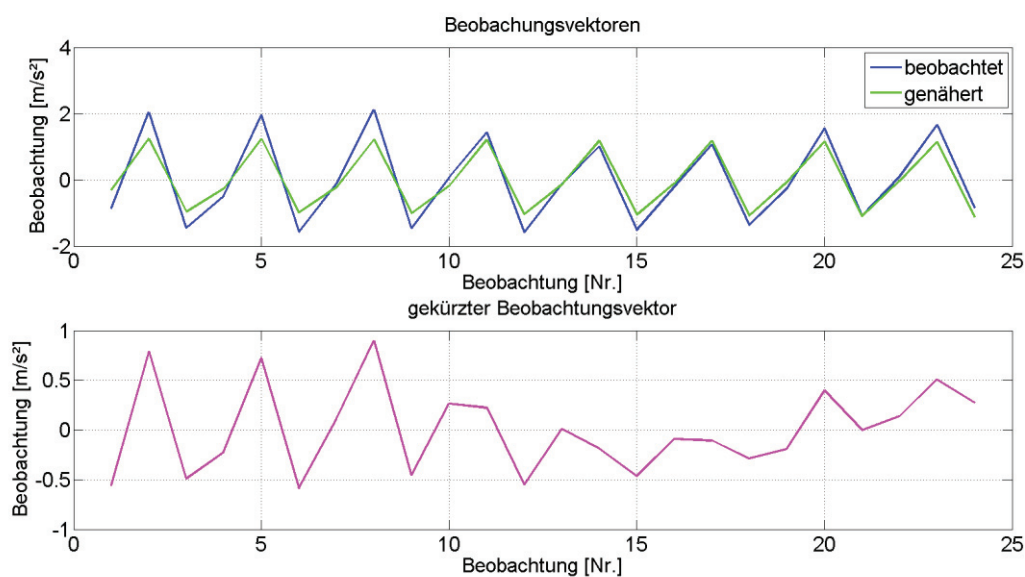


Abbildung 5.24: genäherte und gekürzte Beobachtungen der Smartphone-messung

In Abbildung 5.24 lässt sich gut erkennen, dass die Näherungswerte in diesem Abschnitt der Testmessung gut mit den Beobachtungen übereinstimmen.

Die ausgeglichene Funktion ergibt für die Amplitude $1,47 \text{ m/s}^2$ und $1,82 \text{ Hz}$ für die Frequenz, siehe Abbildung 5.25.

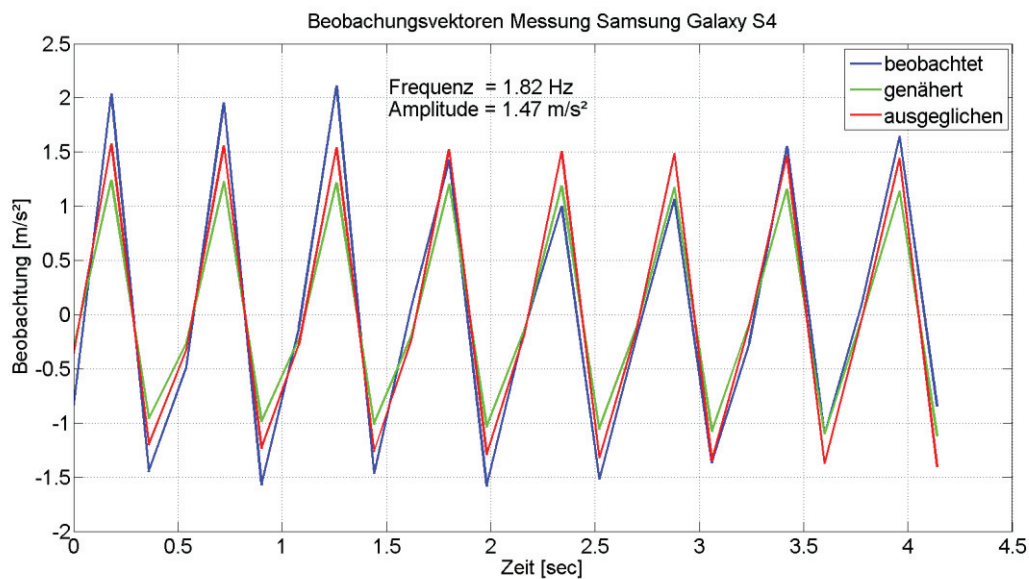


Abbildung 5.25: ausgeglichene Funktion der Testmessung mit dem Smartphone Samsung Galaxy S4

Die Werte stimmen gut mit den Werten der Frequenzanalyse überein. Die Amplitude des Weges ist auch hier wieder durch Division der Amplitude der Beschleunigung von $1,47\text{m/s}^2$ mit dem Betrag von $127,9\text{ s}^2$ entstanden.

Tabelle 5.3: Vergleich der Bestimmungsmethoden der Testmessung mit dem Smartphone

Bestimmungsmethode	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
Frequenzanalyse	1.79	11
Ausgleichung	1.82	11.5

5.4 Tachymeter

Bei der Untersuchung der Tachymeter sollten verschiedene Fragestellungen betrachtet werden. Zum einem wurde untersucht, ob die Tachymeter überhaupt mehrere Messungen pro Sekunde zu leisten vermögen oder ob die Streckenmessungen innerhalb einer gewissen Zeitspanne interpoliert werden, da die Streckenmessung mehr Zeit als der Abgriff der Richtung vom elektronischen Teilkreis benötigt. Zweitens sollte überprüft werden, ob eine Frequenzanalyse aus den gewonnenen tachymetrischen Daten möglich ist und welche Probleme dabei auftauchen. Drittens wurde untersucht, welche Messgenauigkeiten bei der Strecken- und Winkelmessung über verschiedene Entfernungen zu erwarten sind, um den Messaufbau entsprechend der erforderlichen Genauigkeit anzupassen.

5.4.1 Tachymetrische Messungen auf die Testvorrichtung zur Frequenzanalyse

Die tachymetrische Messung erfolgte orthogonal auf die Bewegungsrichtung der Testvorrichtung. Die Abtastrate ist im Gerät mit 10 Hz eingestellt worden. Effektiv kann das Leica TS30 aber nur eine Messrate von ca. 6,5 Hz leisten. Jede Streckenmessung dauert mindestens 0,14 Sekunden. Teilweise sind auch Zeitabstände von bis zu 0,7 Sekunden zwischen den Messungen möglich. Die Zeitabstände zwischen den Messungen sind nicht äquidistant. In dem Auswertebispiel hier ist ein Teil der Gesamtmessung dargestellt, welcher eine gute Äquidistanz aufweist. Die Abweichungen liegen bei 0,03 Sekunden. Zunächst ist in Abbildung 5.26 die Messreihe selbst dargestellt.

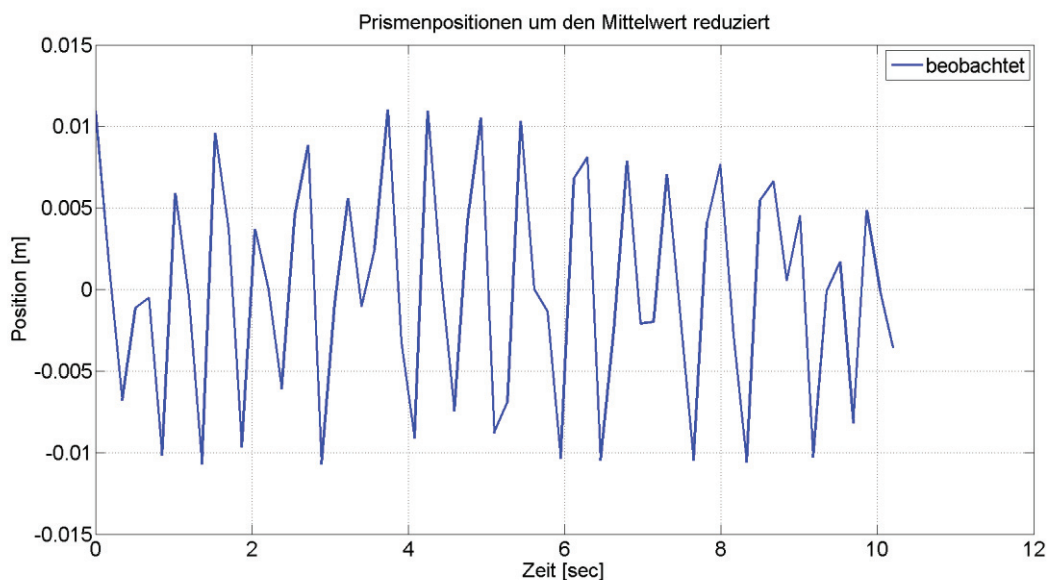


Abbildung 5.26: Beobachtungen Leica TS30

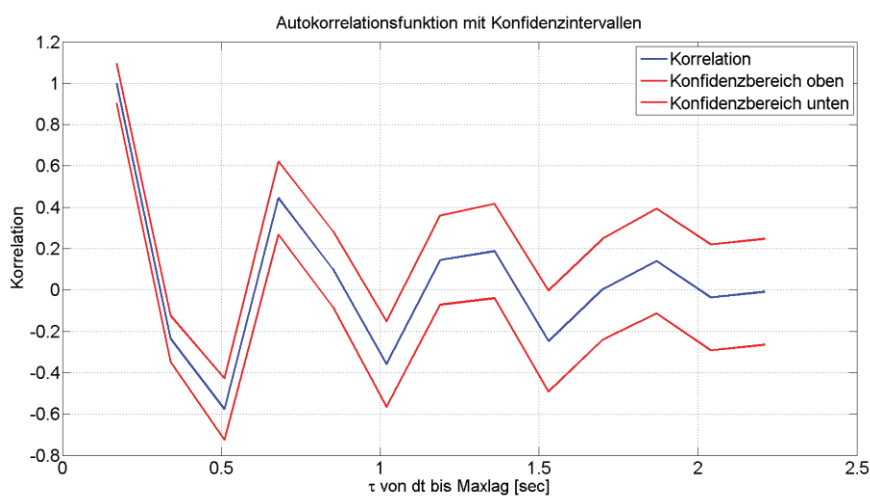


Abbildung 5.27: Korrelationsfunktion Testmessung TS30

In Abbildung 5.27 ist zu erkennen, dass die Korrelation nach der dritten Schwingung nur noch einen Wert von maximal 0,1 aufweist. Die Schwingung wird mit dem Tachymeter nicht sehr gut abgebildet.

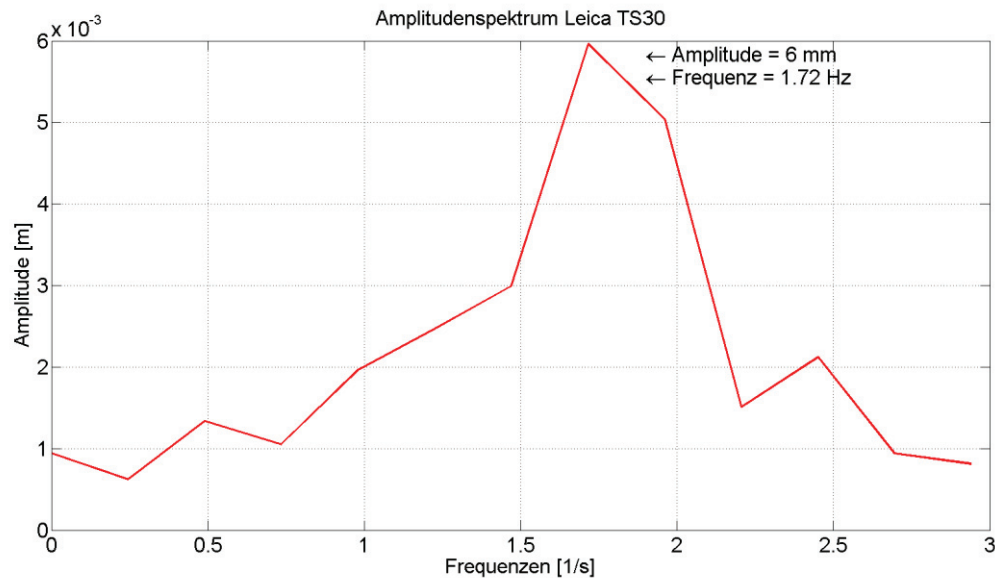


Abbildung 5.28: Amplitudenspektrum Leica TS30

Aus der Abbildung 5.28 ist eine Amplitude von nur 6 mm abzulesen. Dies stimmt nicht mit dem vorgegebenen Wert von 11 mm überein. Hier wird ein Problem der Frequenzanalyse deutlich. Aufgrund der geringen Abtastrate enthält die so gewonnene Zeitreihe nur wenig Daten. Dadurch wird das Spektrum auch nur an wenigen Punkten abgebildet. Die Schrittweite der Frequenz ist hier 0,245 Hz groß. Liegt die eigentliche Frequenz zwischen zwei Abbildungsmöglichkeiten, hier 1,72 Hz und 1,96 Hz, wird die Amplitude auf beide Frequenzen verteilt. Die Frequenz, die den geringsten Abstand aufweist erhält den größten Anteil. Durch Addition beider Anteile kann die Amplitude wieder erhalten werden. Werden beide Anteile aus Abbildung 5.28 addiert wird wieder die Amplitude von 11 mm erhalten. In dieser Auswertung ist eine Zeitspanne von 11 Sekunden betrachtet worden. Nur innerhalb einer Zeitspanne von ca. 12 Sekunden ist die Abtastrate des Tachymeters äquidistant.

Bei der Messung mit dem Lasertracker, GNSS und Smartphone sind Frequenz und Amplitude ebenfalls mit der Methode der ausgleichenden Funktion bestimmt worden. Dies wird hier auch angewendet, um einen Vergleich zwischen den Auswertemethoden anstellen zu können. Die Schwierigkeit besteht hier auch in der mangelnden Äquidistanz der Messwerte. Daher ist die Zeitreihe noch weiter gekürzt worden um plausible Ergebnisse zu erhalten. Die

Extremwerte, also die maximale Auslenkung wird durch die geringe Abtastrate nur selten detektiert, wie in Abbildung 5.29 zu sehen ist.

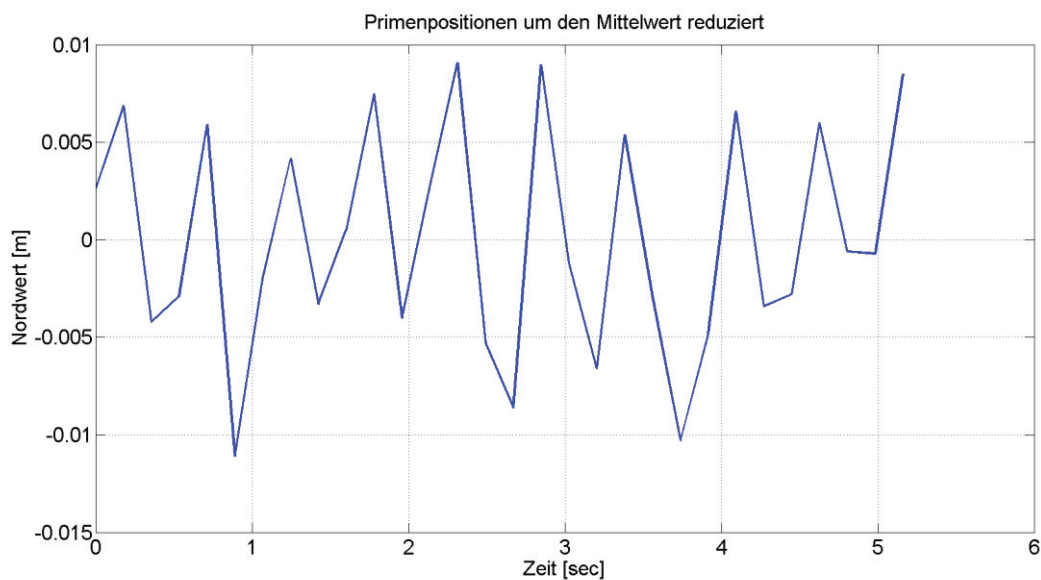


Abbildung 5.29: Ausschnitt der Zeitreihe der Testmessung mit dem TS30

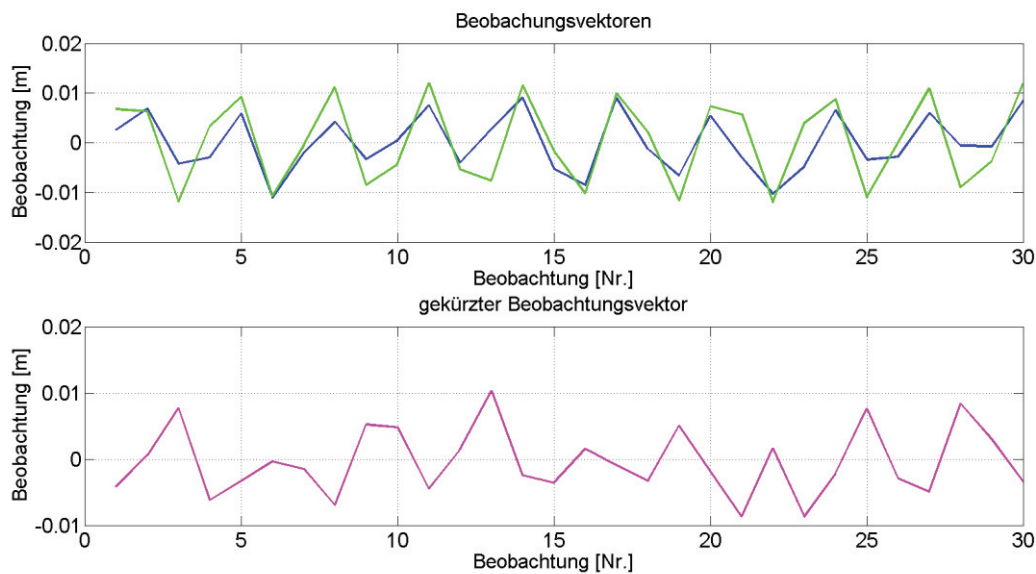


Abbildung 5.30: genäherte und gekürzte Beobachtungen der Testmessung mit dem TS30

Der Verlauf der genäherten Beobachtungen zu den tatsächlichen Beobachtungen in Abbildung 5.30 macht wenig Aussicht auf ein brauchbares Ergebnis.

Trotz der Befürchtungen kann die Frequenz mit guter Genauigkeit bestimmt werden. Die Amplitude bleibt nach der Auswertung zu klein, siehe Abbildung 5.31, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass die maximale Auslenkung nur selten detektiert worden ist, da die Abtastrate nur rund 3 mal so hoch war wie die zu rekonstruierende Frequenz.

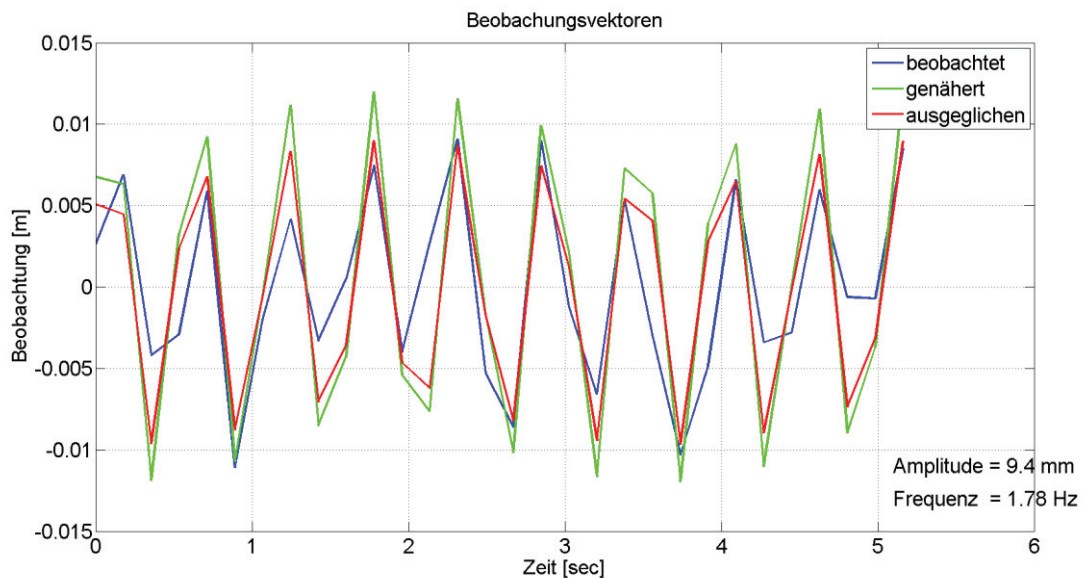


Abbildung 5.31: Ausgeglichene Funktion der Schwingung der Testmessung des TS30

Dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend, da auch bei der tachymetrischen Messung plausible Werte erhalten werden konnten. In Tabelle 5.4 sind diese verdeutlicht.

Tabelle 5.4: Vergleich der Bestimmungsmethoden der Testmessung mit dem TS30

Bestimmungsmethode	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
Frequenzanalyse	1,72	11 (6, siehe Abbildung 5.28)
Ausgleichung	1,78	9,4

5.4.2 Betrachtung der zeitlichen Äquidistanz der Tachymetermessungen

In Kapitel 5.4.1 ist die Tachymetermessung nur über einen Zeitraum von zwölf Sekunden ausgewertet worden, da nur innerhalb dieses Zeitraumes zeitlich äquidistante Messwerte vorlagen. Danach erfolgt eine neue Initialisierung der Streckenmessung. Die Streckenmessung der Leica Tachymeter arbeiten nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens. Hierbei wird die Größe des Wellenreststückes bestimmt. Die ganzzahligen Wellenzyklen können nicht bestimmt werden. Eine Auflösung des Wellenreststückes ist mit einer Relativgenauigkeit von 1/10000 der Wellenlänge möglich. Da

Tachymeter auf Streckenlängen bis in den Kilometerbereich ausgelegt sind würde sich mit einer einzigen Frequenz von 30 kHz nur eine Genauigkeit von 1 bis 2 Metern ergeben. Um trotzdem Genauigkeiten im Millimeterbereich zu erhalten sind mindestens zwei Frequenzen erforderlich. [Joeckel, et al., 5. Auflage, 2008]

Alle zwölf Sekunden erfolgt eine komplette Streckenmessung, dazwischen verbleibt der Messmodus im feinsten Maßstab, da die Zielverfolgung eingestellt ist. Da bei der Zielverfolgung die Strecke einer Messung in ähnlicher Größenordnung wie die darauffolgende Strecke liegt kann dieses Verfahren so angewendet werden. Die komplette Streckenmessung dauert ca. 0,7 Sekunden. Dieser Wert ist sehr unvorteilhaft für zeitliche Äquidistanz der Messungen, solange eine Abtastrate von unter einer Sekunde eingestellt ist.

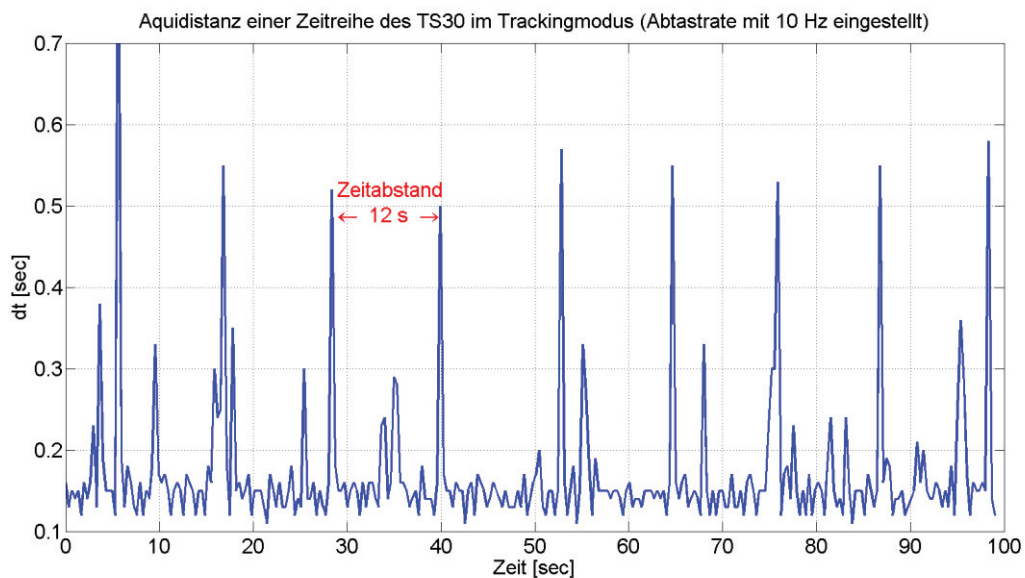


Abbildung 5.32: Äquidistanz der Zeitmessung des TS30 in Trackingmodus

Wie in Abbildung 5.32 sehr gut zu erkennen ist, dauert alle zwölf Sekunden die Streckenmessung ungefähr drei bis vier Mal so lang wie die übrigen Streckenmessungen. Dadurch entfallen an diesen Stellen Messwerte. Ein großes Problem ist nun die nachträgliche Herstellung der zeitlichen Äquidistanz. Versuche die fehlenden Messwerte zu interpolieren schlugen fehl oder brachten nicht das gewünschte Ergebnis. Aus einer langen Zeitreihe kann die Frequenz mit dem Tachymeter nicht korrekt bestimmt werden, da zur Analyse von Zeitreihen die Zeitabstände gleich groß sein müssen. So konnten zur Auswertung die Ausreißer der Zeitabstände nicht berücksichtigt werden und die Zeitreihe ist verzerrt worden.

5.4.3 Untersuchungen zur automatischen Strecken- und Richtungsmessgenauigkeit

Eine Untersuchungsreihe sollte zeigen, mit welchen Strecken- und Richtungsmessgenauigkeiten über verschiedene Distanzen hinweg zu rechnen ist. Beim Monitoring verlässt man sich auf die korrekte Arbeitsweise der Messgeräte. Aus den Datenblättern der Messgeräte können Informationen zur Genauigkeit der Richtungs- und Streckenmessgenauigkeit entnommen werden. Diese beziehen sich aber meist nur auf den Standardmessmodus. Für die Genauigkeit der Streckenmessung im Trackingmodus gibt Leica bei dem TS30 eine Genauigkeit von $3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ an und bei dem TCRP1203 eine Genauigkeit von $3 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$ an. Die Richtungsmessgenauigkeit von $0,15 \text{ mgon}$ (TS30) gilt für eine Richtung, die in beiden Fernrohrlagen gemessen wird. Im Folgenden soll die Streckenmessgenauigkeit auf ihre Korrektheit geprüft werden. Ebenfalls soll eine Aussage über die zu erwartende Richtungsmessgenauigkeit der automatischen Messung gemacht werden. Dazu sind Strecken von 50 m, 100 m, 200 m und 400 m ausgewählt worden. Diese Streckenlängen entsprechen den üblichen Distanzen einer automatischen Messung im Monitoringbereich. Die Messstrecke zur Marienkirche beträgt ca. 100 Meter und fällt damit auch in diesen Bereich. So können Aussagen über die Qualität der später gewonnenen Messdaten gemacht werden. Gleichzeitig wird geprüft ob über diese Distanzen eine Detektion von verschiedenen Schwingungen der Testvorrichtung gemacht werden können.

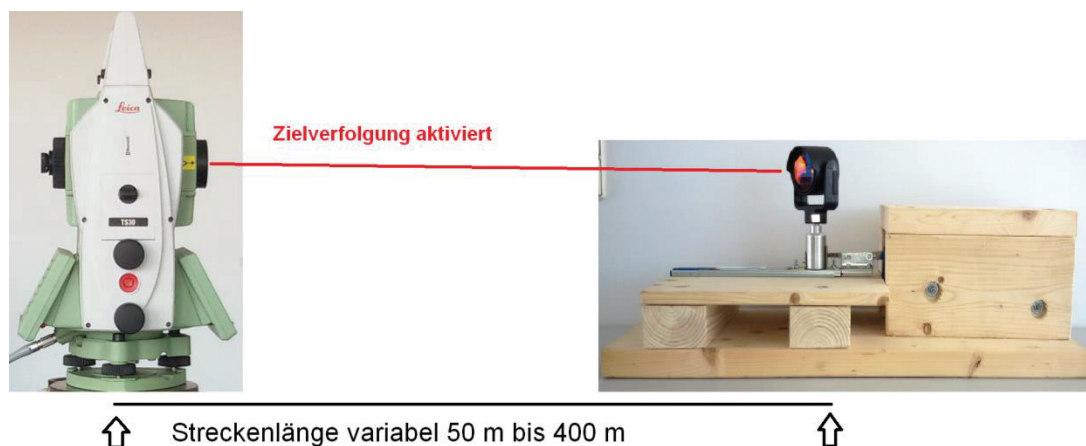


Abbildung 5.33: Detektion von Schwingungen unter Verwendung verschiedener Zielweiten

Zur Detektion der vorhandenen Schwingung, die durch die Testvorrichtung ausgeführt wurde ist diese jeweils einmal in Richtung der Streckenmessung, danach um 20° versetzt dazu,

dann um 70° versetzt und um 90° versetzt, also nur in der Achse der Richtungsmessung positioniert worden. So konnten acht verschiedenen Messungen pro Standpunkt gewonnen werden. Am Beispiel der Entfernung von 400 Meter werden alle Kombinationen dargestellt.

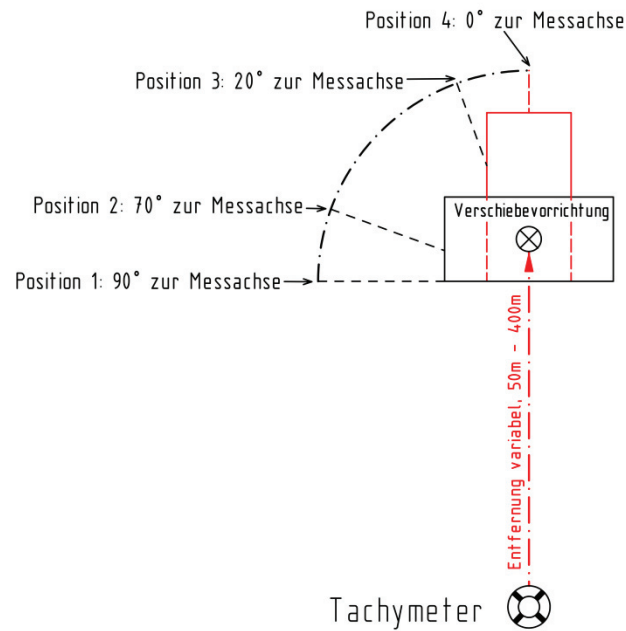


Abbildung 5.34: Prinzip der Messpositionen

In Position 1 kann die volle Amplitude von der Richtungsmessung erfasst werden. Die Streckenmessung ändert sich nicht. Die gewonnenen Daten der Streckenmessung lassen sich daher für die Angabe einer empirischen Standardabweichung der Streckenmessung auswerten.

Tabelle 5.5: Amplituden der Schwingung in Bezug auf die Position der Verschiebuvorrichtung:

Position	Amplitude Strecke [mm]	Amplitude Richtung [mm]
1	0	11
2	4	10
3	10	4
4	11	0

In Position 2 kann eine Amplitude von 4 mm in der Richtungsmessung erfasst werden, falls dies möglich ist. In Position 3 kann ebenfalls eine Amplitude von 4 mm festgestellt werden,

hier aber innerhalb der Streckenmessung. In Position 4 verbleibt die volle Amplitude von 11 mm komplett in der Streckenmessung und die Richtung ändert sich nicht. So kann hier eine empirische Standardabweichung der Richtungsmessung festgestellt werden.

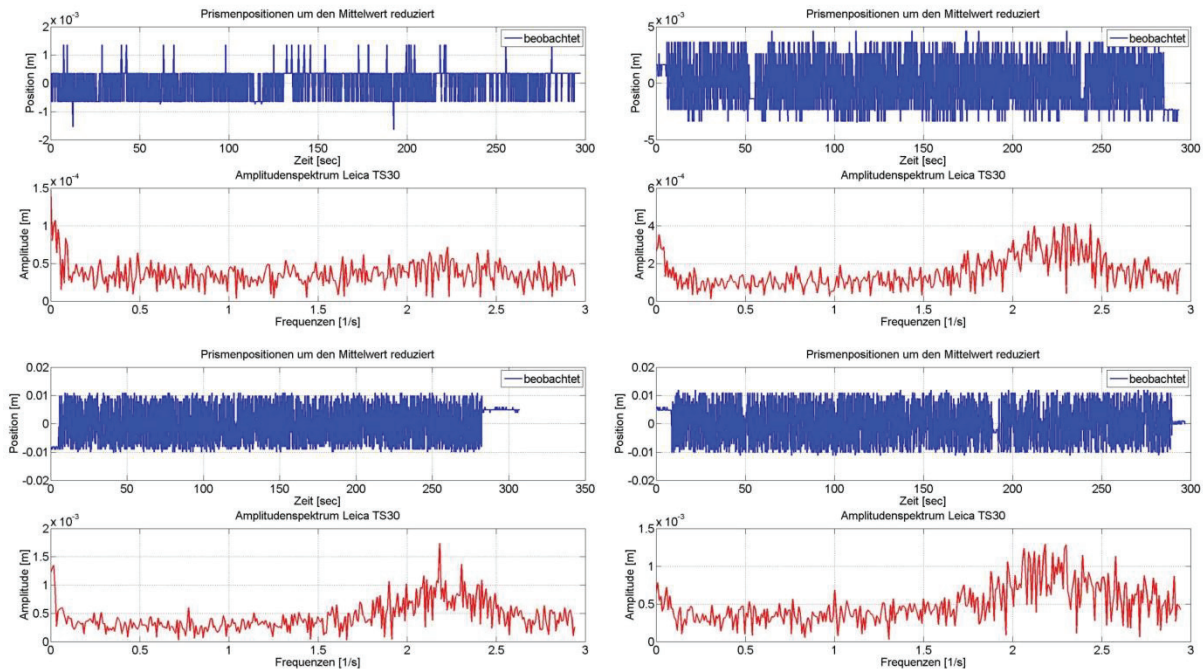


Abbildung 5.35: Streckenmessung

In Position 1, oben links, der Abbildung 5.35 wird ersichtlich, dass die Streckenmessung nur um einen geringen Betrag streut. In Position 2, rechts daneben kann die Amplitude von 4 mm über eine Strecke von 400 m gut erfasst werden. Die größeren Amplituden werden ebenfalls erfasst. Gut zu sehen ist die mangelhafte Rekonstruktion der Frequenz aus der Analyse, da die Äquidistanz der Zeitabstände der Tachymetermessung schlecht ist. Dadurch wird auch die Bestimmung der Amplitude der Streckenmessung aus der Frequenzanalyse nicht möglich. Hier werden auch in Position 4 nur Amplituden von 1,2 mm detektiert. Aus der Betrachtung der geplotteten Messwerte kann aber die jeweilige Größe abgeleitet werden. Die Strecken konnten in allen Positionen mit hoher Genauigkeit gemessen werden, daher wird auf die weitere Darstellung der Streckenmessungen bei Entfernungen von 200 m, 100 m und 50 m verzichtet. In Tabelle 5.6 ist überdies eine Aufstellung der erreichten empirischen Streckenmessgenauigkeiten aufgelistet.

Bei der Erfassung der Richtungen werden die Amplituden in Abbildung 5.36 von Position 1 bis Position 4 kleiner. Gut zu erkennen sind hier auch, dass die erfassten Richtungsamplituden im Verlauf immer kleiner werden. Zudem fällt hier auf das sich in den Messdaten viele Ausreißer der Richtungsmessung befinden, die einen Betrag von bis zu 8 cm haben. Auch in Position 4, bei der keine Bewegung quer zur Messachse stattfindet können diese Ausreißer gefunden werden. Dies lässt auf eine schlechte Erfassung der automatischen Richtungsmessung schließen und begrenzt den Arbeitsbereich des Tachymeters in Bezug auf die Richtungsmessung. Bei der Streckenmessung dagegen treten bei einer Entfernung von 400 m keine Probleme auf. Auch zu sehen ist, dass in Position 3 die Amplitude kaum durch die Frequenzanalyse detektiert wird. Die Amplituden sind auch hier im Allgemeinen nicht repräsentativ und müssen wie bei der Streckenmessung aus den Plots der Messdaten geschätzt werden.

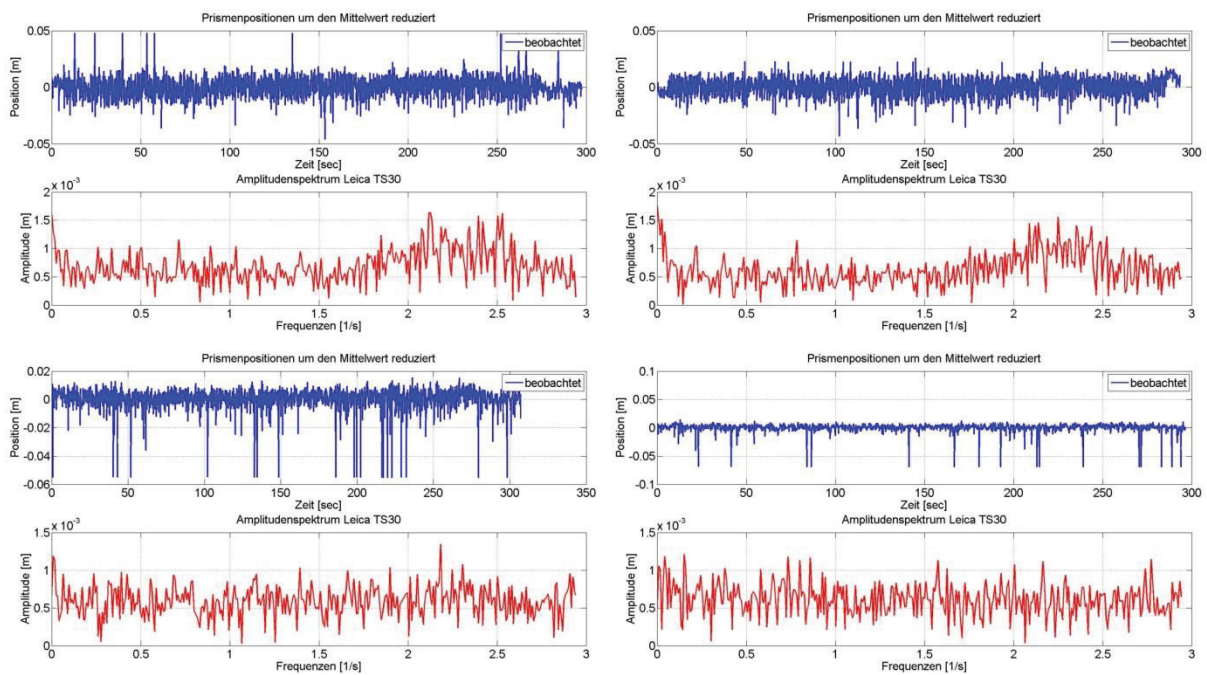


Abbildung 5.36: Richtungsmessung

Da bei einer Entfernung von 400 m viele Ausreißer in der Richtungsmessung zu erkennen sind, wird die Richtungsmessung bei 200 m ebenfalls dargestellt. Wie in Abbildung 5.37 zu erkennen ist treten bei einer Entfernung von 200 m kaum noch Ausreißer auf. Dies lässt einen Schluss zu, dass die Ausreißerhäufigkeit mit zunehmender Entfernung stark steigt.

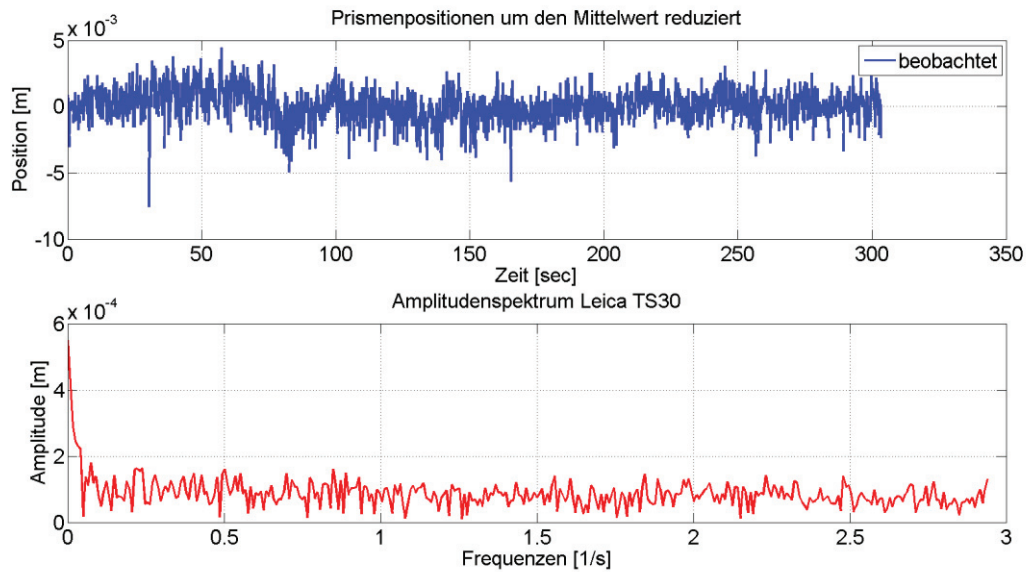


Abbildung 5.37: Position 4 bei einer Entfernung von 200 m

Die Reflektoren an der Marienkirche befinden sich ca. 100 m von den jeweiligen Tachymeterstandpunkten entfernt. Daher wird eine Darstellung einer zu erfassenden Amplitude von 4 mm auf eine Streckenlänge von 100 m nachfolgend ausgeführt.

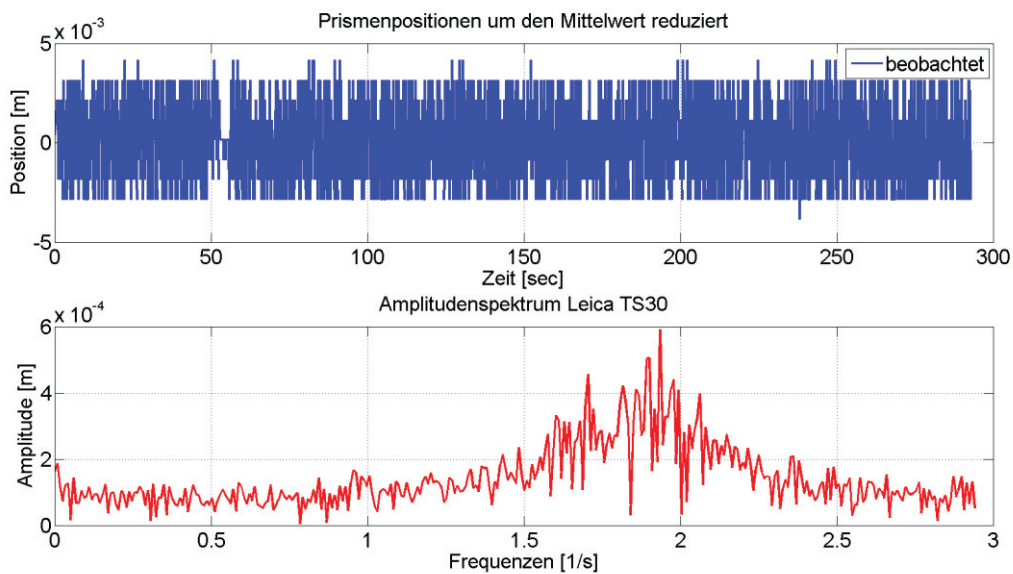


Abbildung 5.38: Position 2 bei einer Streckenlänge von 100 m

Die Erfassung der Streckenamplitude von 4 mm klappt bei einer Entfernung von 100 sehr gut, aber auch hier kann die Amplitude am besten aus dem Plot der Messdaten selbst abgeleitet werden. Über den gesamten Streckenverlauf von 50 m bis 400 m ist eine Standardabweichung der Streckenmessung von ca. 0,5 mm festgestellt worden.

In Abbildung 5.39 ist die Erfassung der Richtungsamplitude dargestellt. Hier kann die Richtungsamplitude gut erfasst werden, nur die Amplitudengröße ist wiederum am besten aus der Darstellung im Plot selbst zu entnehmen.

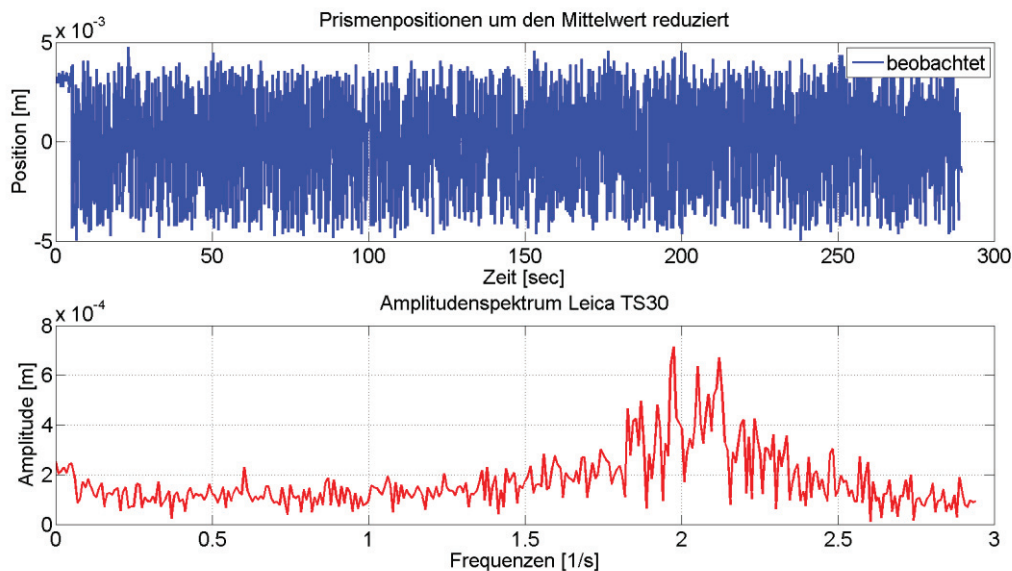


Abbildung 5.39: Position 3 bei einer Streckenlänge von 100 m

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung

Streckenlänge [m]	Standardabweichung der Richtungsmessung s_r [mm]	Standardabweichung der Streckenmessung s_d [mm]
50	0,2	0,4
100	0,6	0,5
200	1,3	0,5
400	8,5	0,5

5.4.4 Fazit zu den tachymetrischen Messungen

Bei einer Entfernung von 100 m liegen die Streckenmessgenauigkeit und die Richtungsmessgenauigkeit in gleichen Bereich von 0,5 mm. Mit diesem Ergebnis sollte es möglich sein an der Marienkirche Amplituden von 1,4 mm zu detektieren. Die Analyse der

Frequenz wird auch dabei das Problem darstellen, da aufgrund der schlechten zeitlichen Äquidistanz die zu erfassende Frequenz über ein Frequenzband gespreizt wird. Dadurch sind die richtigen Amplituden ebenfalls schlecht aus der Frequenzanalyse festzustellen. Hier muss die Amplitude entweder aus der Darstellung der Plots abgeleitet werden, oder es werden zeitlich äquidistante Teile der Zeitreihen betrachtet, aus denen die Frequenz und Amplitude besser zu bestimmen ist.

Eine neuere Gerätegeneration, wie das TS16 oder die TS60 von Leica sollten hier in der Lage sein bessere Ergebnisse zu liefern. Die optimierten Distanzmesssysteme dieser Geräte erlauben es mit einer Abtastrate von bis zu 20 Hz zu messen. Laut Aussage des Leica Service sind auch die Zyklen der kompletten Streckenmessung von zwölf Sekunden auf 15 Minuten angehoben worden. Das lässt auf eine bessere zeitliche Äquidistanz hoffen, da die Synchronisation der einzelnen Sensoren überarbeitet wurde. [Grimm, 2015]

5.5 Zusammenfassung der Testmessungen

Alle Messungen, welche zeitgleich auf die Testvorrichtung stattgefunden haben werden hier zusammenhängend betrachtet.

Tabelle 5.7: Vergleich aller Testmessungen in Bezug auf den Lasertracker

	Frequenz [Hz]		Amplitude [mm]	
	Frequenzanalyse	Ausgleichung	Frequenzanalyse	Ausgleichung
Lasertracker	1,75	1,76	10,3	10,8
GNSS	1,75	1,78	10,1	10,6
Smartphone	1,79	1,82	11	11,5
Tachymeter	1,72	1,78	11	9,4

In Tabelle 5.7 ist zu erkennen, dass alle Messgeräte die vorgegebene Amplitude und die Frequenz nachweisen konnten. Bei den unterschiedlichen Messgeräten treten nur geringe Abweichungen in Bezug auf den Betrag der Amplitude und Frequenz auf.

6 Messungen an der Kirche

Die Messungen an der Marienkirche fanden am 02.03.2016 statt. Zeitgleich wurden von verschiedenen Sensoren an unterschiedlichen Orten Daten erfasst. Ein Nivel210 Neigungsmesser war oberhalb der Glocken, nachfolgend Nivel210 Oktogon genannt, angebracht. Ein weiteres Nivel210, nachfolgend Nivel 210 Server, wurde unterhalb der Glocken installiert. Am Messpunkt des Nivel210 Server war ebenfalls ein Beschleunigungssensor SBG IG-500E angebracht. Ein weiterer Beschleunigungssensor, das Smartphone Samsung Galaxy S4 ist auf Höhe des Oktogons befestigt worden. Auf Höhe des Überganges vom gemauerten Turm zum eigentlichen Kirchturmhelm ist die Antennenhalterung für den GNSS Empfänger angebracht. Auf gleicher Höhe sind zwei Reflektoren, jeweils nach Norden und Westen ausgebrichtet an den Turm befestigt.

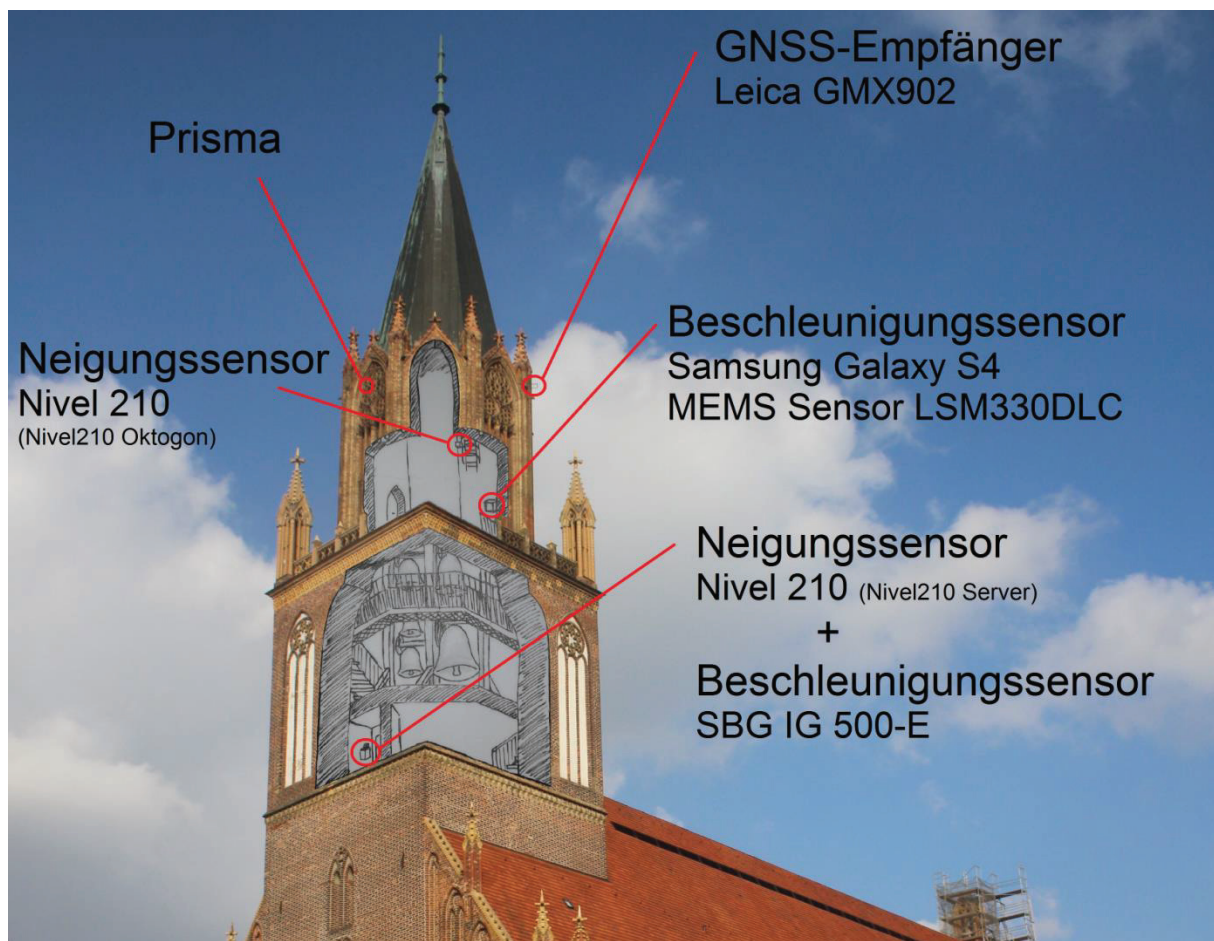


Abbildung 6.1: Übersicht der Sensoren

6.1 Bestimmung der Frequenzen der Kirchenglocken

Für die spätere Auswertung der Messungen ist es sehr wichtig die Frequenzen der Kirchenglocken zu bestimmen. Damit ist nicht die Tonlage der einzelnen Glocke gemeint, sondern hier soll die Schwingfrequenz der Glockenauslenkung bestimmt werden. Erst mit den Frequenzen der Glocken und den erfassten Frequenzen lassen sich Rückschlüsse auf eine Wechselwirkung von den Kirchenglocken und dem Mauerwerk ziehen. Die detektierten Frequenzen von 1,14 Hz, 1,26 Hz und 1,40 Hz würden sich sonst in keinen Zusammenhang bringen lassen. Zur Frequenzbestimmung ist ein Video des Glockenspiels gedreht worden. Dieses wurde im Nachhinein ausgewertet und daraus mit hoher Genauigkeit die Frequenzen bestimmt.



Abbildung 6.2: Glockenstuhl

Tabelle 6.1: Bestimmung der Glockenfrequenzen

Glocke	Frequenz [Hz]
Marienglocke	0,38
Johannesglocke	0,42
Gebetsglocke	0,465
Sakramentsglocke	0,48
Lob- und Dankglocke	0,50

6.2 GNSS

6.2.1 Messaufbau

Die Aufzeichnungsrate der GNSS Empfänger ist mit 20 Hz gewählt worden, um eine möglichst gute Rekonstruktion der zu erwartenden Schwingung zu ermöglichen. Die Länge der Basislinie zwischen Rover am Kirchturm und Referenz auf dem Dach der Hochschule beträgt genau einen Kilometer. Ein großes Problem bereitete die Auswertung der GNSS Messdaten, da die Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten im Tagesverlauf über mehrere Stunden versagte.



Abbildung 6.3: GNSS Basisstation mit Blick auf die Marienkirche

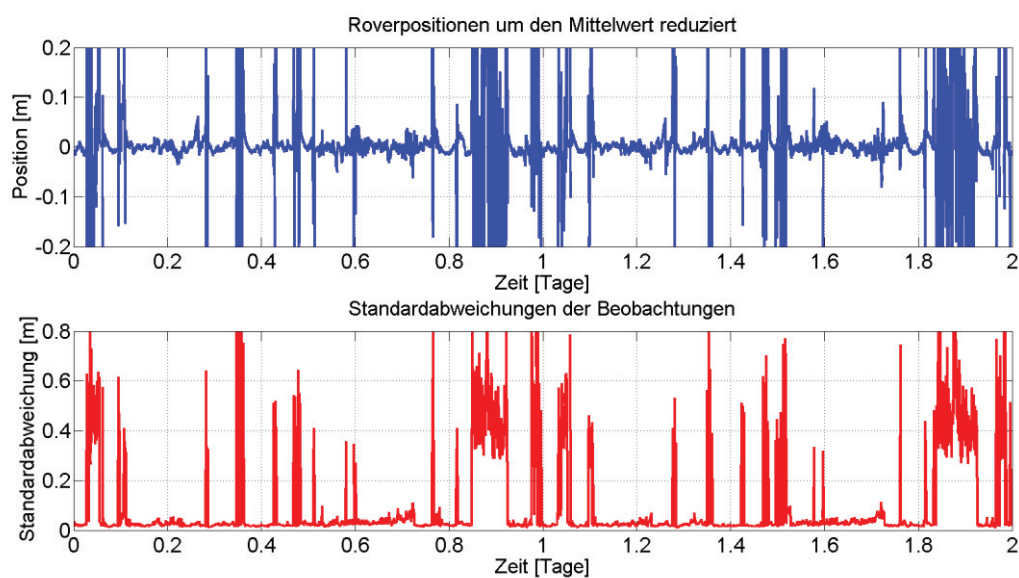


Abbildung 6.4: Beobachtungen des Rovers über den Zeitraum von zwei Tagen

In Abbildung 6.4 wird der Verlust der Trägerphasenmehrdeutigkeiten verdeutlicht. Man kann anhand des Plots über zwei Tage sehen, dass die Verluste periodisch auftreten. Als Ursache werden Mehrwegeeffekte vermutet, welche durch die Dachkonstruktion und durch das Dachmaterial (Kupfer) des Kirchturmhelmes ausgelöst wurden.

Bei dem Probeläuten der Kirchenglocken funktionierte das System aber einwandfrei und es konnten Messdaten gesammelt und ausgewertet werden.

6.2.2 Analyse der Messdaten

Zuerst werden die gewonnenen Messdaten in einem Plot dargestellt. Für die weitere Auswertung ist es weiterhin unerlässlich die Daten von eventuellen Trends zu befreien, da die Trends zu verfälschten Ergebnissen führen würden. Hier ist das Probeläuten aller Kirchenglocken über einen Zeitraum von sechs Minuten ausgewertet worden. Diese Zeitspanne ist aus der Mitte des Probeläutens so gewählt worden, dass der Anfang und das Ende des Probeläutens keinen Einfluss auf die Bestimmung der Größe der Amplitude haben.

Falls über den eigentlichen Zeitraum der Schwingungen ausgewertet wird, verringert sich die Größe der Amplitude, da ja in der Ruhephase keine Schwingung auftritt. Dargestellt werden im Rahmen dieser Bachelorarbeit nur die Nordwerte der Roverpositionen. Die Kirchenglocken schwingen in Nord-Süd-Richtung, somit treten keine Schwingungen in Ost-West-Richtung auf.

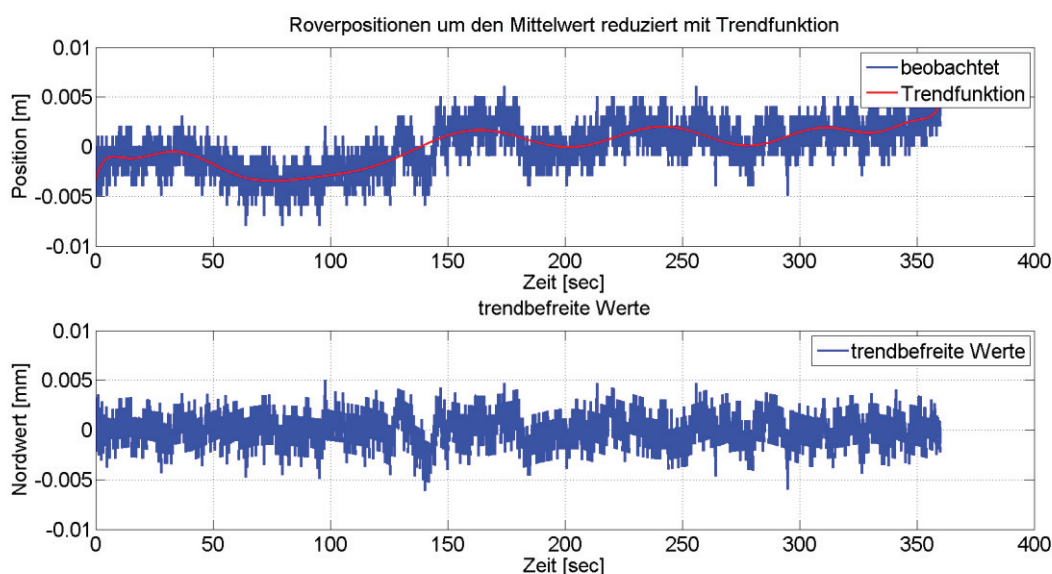


Abbildung 6.5: Rohmesswerte und trendbefreite Messwerte

Schon aus den trendbefreiten Messwerten lässt sich abschätzen, dass sich ein Spitze-Tal-Wert von maximal 3 mm abzeichnet. Die Streuung der Werte der GNSS Messung liegt unterhalb der angegebenen Standardabweichung von 2 cm. Das lässt hoffen hier eine Schwingung detektieren zu können.

Aus der Autokorrelationsfunktion, siehe Abbildung 6.6, lässt sich schon eine Zeitliche Periodizität entnehmen. Innerhalb einer Zeitspanne von zehn Sekunden sind gut elf Schwingungen zu erkennen. Somit besitzt die größte Schwingung einen Wert von ca. 1,1 Hz.

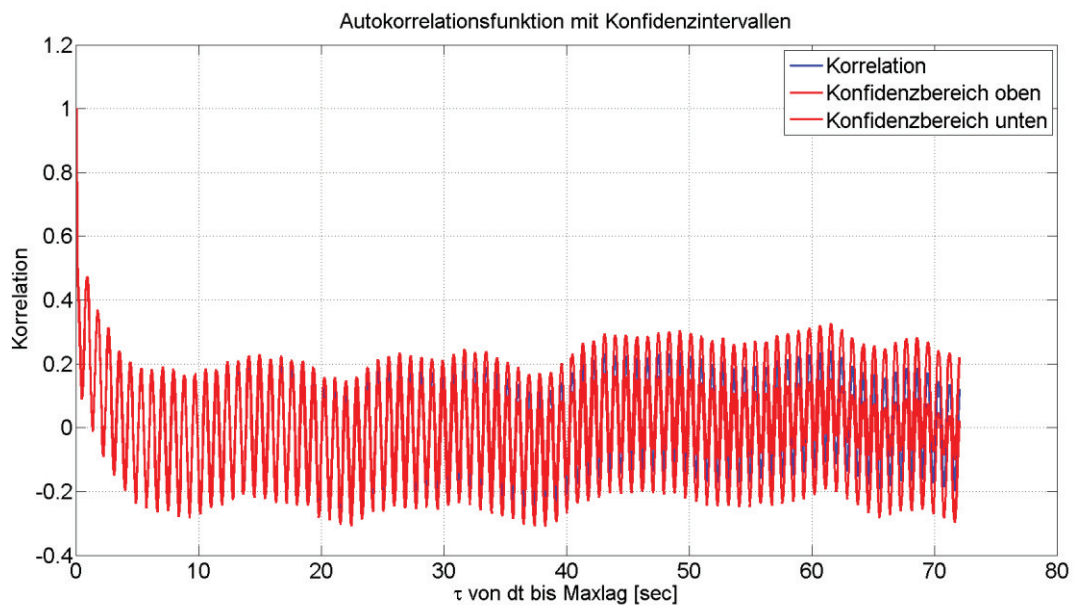


Abbildung 6.6: Autokorrelationsfunktion der GNSS Messung

Im nächsten Schritt findet die Frequenzanalyse statt. Da die Abtastrate mit 20 Hz eingestellt wurde können Frequenzen von bis zu 10 Hz festgestellt werden. In der ist zur besseren Übersicht ein Frequenzbereich bis zwei Hertz dargestellt, da darüber hinaus keine signifikanten Frequenzen festgestellt werden konnten.

In Abbildung 6.7 ist da Amplitudenspektrum dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Peak bei 1,14 Hz mit einer Amplitude von knapp einem Millimeter. Ein weiterer Peak mit einer Frequenz von 0,13 Millimeter liegt bei einer Frequenz von 1,26 Hz. Auch bei einer Frequenz von 1,38 Hz ist ein Peak zu erkennen, welcher sich mit einer Amplitude von 0,08 Millimeter kaum noch vom Messrauschen unterscheidet. Ebenfalls können die Glockenfrequenzen der Marienglocke und der Johannesglocke mit 0,38 Hz und 0,42 Hz mit Amplituden von jeweils 0,11 mm und 0,10 mm aufgefunden werden. Die Glockenfrequenzen der restlichen Glocken können nicht festgestellt werden.

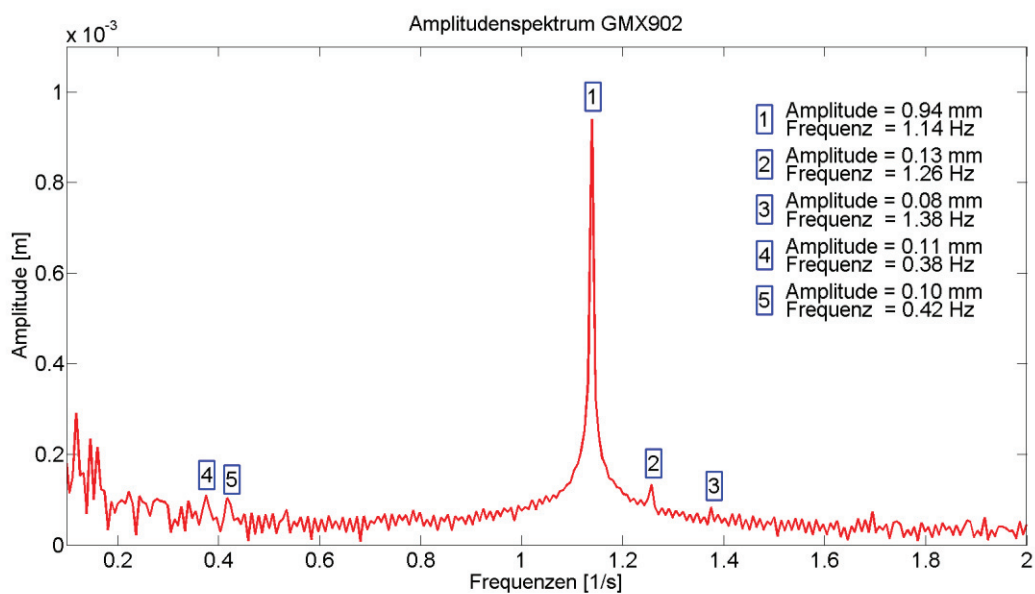


Abbildung 6.7: Amplitudenspektrum der GNSS Messung

Analog zu Kapitel 5.2 wird die größte Frequenz zusätzlich aus einem Ausgleichsmodell bestimmt. Zur besseren Anschauung wird dabei ein Beobachtungsvektor von acht Sekunden Länge verwendet, so können die Ergebnisse direkt in der Plotansicht betrachtet werden.

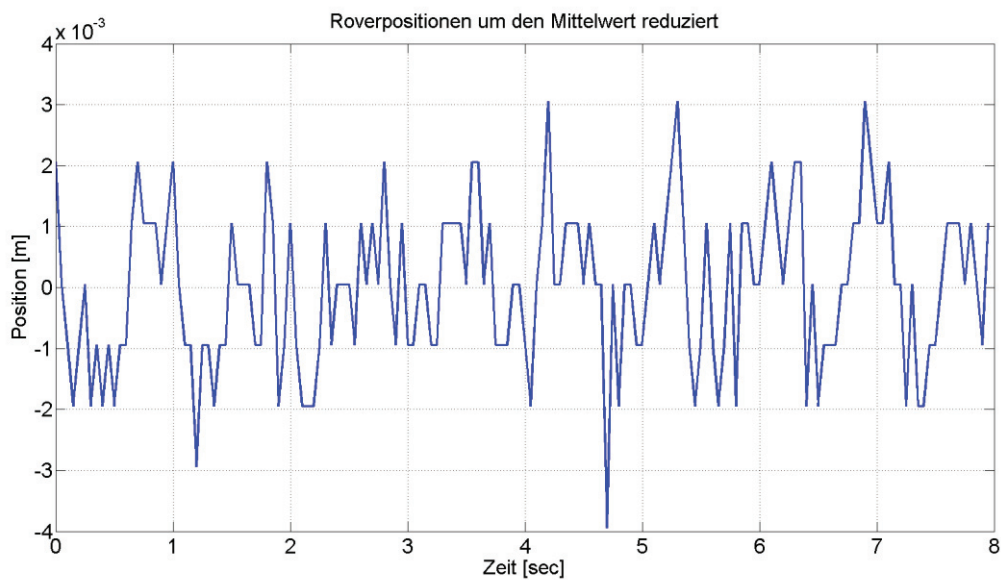


Abbildung 6.8: Positionen des Rovers als Ausschnitt der GNSS Messung

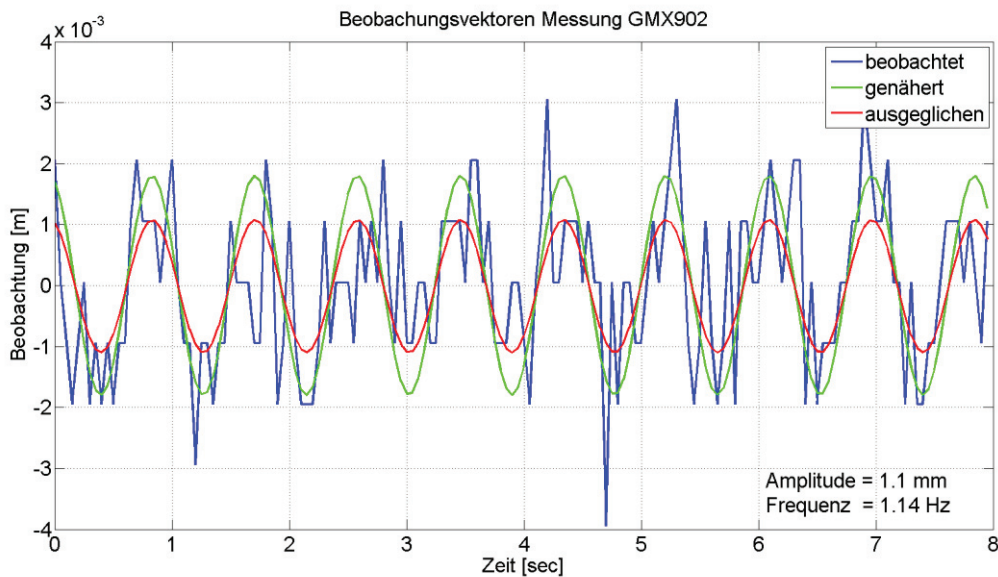


Abbildung 6.9: ausgeglichene Funktion der GNSS Messung

Abbildung 6.9 verdeutlicht die Parameter der ausgeglichenen Funktion. Die Frequenz ist hier genau nachgewiesen worden. Die Amplitude fällt etwas höher aus. Dieser Unterschied konnte schon in Kapitel 5.2 nachgewiesen werden. Im Vergleich zur Frequenzanalyse ist dies eine Bestätigung der dort berechneten Werte.

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Frequenzen und Amplituden der GNSS Messung

Frequenz	Amplitude [mm]	Faktor zu 1,14 Hz
1,14	0,94	
1,26	0,13	7
1,38	0,08	12
0,38	0,11	8
0,42	0,10	9

6.3 Beschleunigungssensoren

6.3.1 Messaufbau

Zwei verschiedene Beschleunigungssensoren sind im Rahmen dieser Bachelorarbeit verwendet worden. Zum einem ein SBG IG-500E, welcher mit einer Genauigkeitsangabe von 0,5 mg, also $0,005 \text{ m/s}^2$ angegeben ist. Der zweite Sensor ist ein Beschleunigungsmesser welcher in einem Smartphone integriert ist. Der Sensor trägt die Bezeichnung LSM330DLC und ist im Smartphone Samsung Galaxy S4 verbaut. Eine Genauigkeitsangabe ist im Datenblatt des Herstellers nicht zu finden gewesen. Daher ist die Standardabweichung beider Sensoren empirisch bestimmt worden. Das Samsung Galaxy S4 kommt hier auf einen Wert von $0,008 \text{ m/s}^2$ und der SBG IG-500E auf einen Wert von $0,01 \text{ m/s}^2$. Diese Werte beruhen auf einer Abtastfrequenz von 20 Hz. Die Genauigkeitsangabe ist bei diesen beiden Sensoren immer an die Abtastfrequenz gebunden. Bei einer Abtastung, welche eine niedrigere Frequenz aufweist als die Maximalfrequenz werden die einzelnen Werte integriert. Das bedeutet, die Werte werden summiert und daraus wird ein Mittelwert gebildet. Die Standardabweichung sinkt hier mit der Wurzel des Quotienten aus der Maximalfrequenz und der Abtastfrequenz.

Das Samsung Galaxy S4 ist im Oktogon auf der Höhe des Nivel210 abgebracht, der SBG IG-500E unterhalb des Glockenstuhls zusammen mit dem unteren Nivel210. Somit ist das Smartphone recht hoch am Turm angebracht und die Werte der Auslenkung sollten denen der Messungen mit GNSS und den Tachymetern ähneln. Die Messwerte des SBG IG-500E sollten niedrigere Amplituden aufweisen.

6.3.2 Analyse der Messdaten des Smartphone

Die Messdaten werden zunächst wieder als Rohdaten grafisch in einem Plot dargestellt.

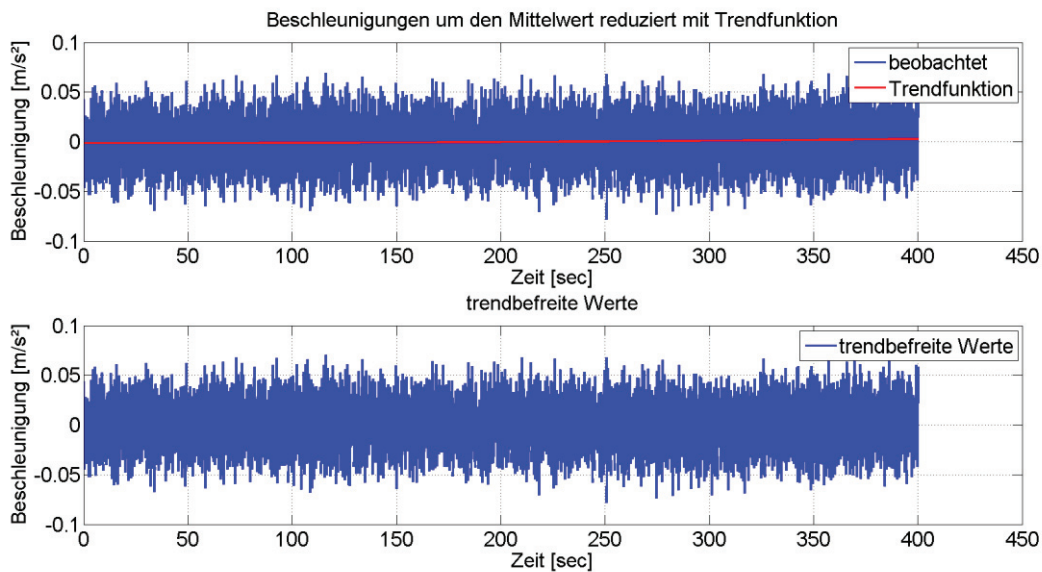


Abbildung 6.10: Beobachtungsdaten des Samsung Galaxy S4

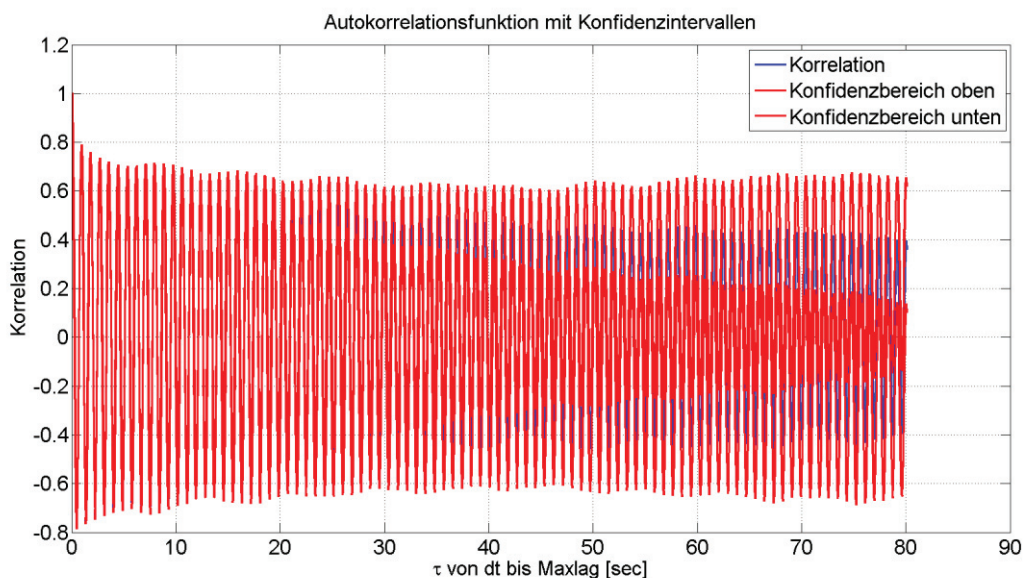


Abbildung 6.11: Autokorrelationsfunktion der Smartphonemessung

Anhand der Autokorrelationsfunktion lässt sich die Frequenz abschätzen. Die lange Korrelationslänge ist deshalb vorhanden, da die Messwerte hier weit oberhalb des Rauschens liegen.

In Abbildung 6.12 ist das Amplitudenspektrum dargestellt. Die Frequenzen können, wie in Abbildung 6.7 dargestellt, nachgewiesen werden. Die Peaks bei 1,14 Hz, 1,26 Hz und 1,40 Hz sind deutlich sichtbar. Die Frequenzen der beiden größten Glocken liegen im Messrauschen.

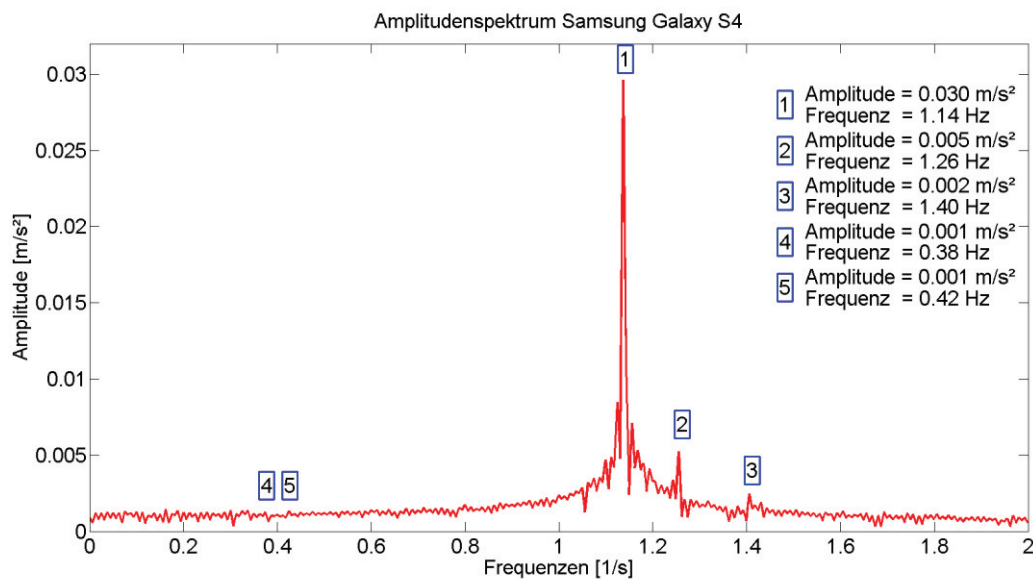


Abbildung 6.12: Amplitudenspektrum der Smartphonemessung

Die Angabe der Beschleunigungswerte ist aber nicht sehr praktisch. Interessanter sind hingegen Angaben zu den zurückgelegten Wegen. Hier wird wieder wie in 5.3 verfahren. Aus den Beschleunigungswerten werden durch doppelte Integration nach der Zeit Wege bestimmt. Der Faktor ist $1/(2 \cdot \pi \cdot f)^2$, im Falle der Frequenz von 1,14 Hz ergibt dies $1/51,31 \text{ s}^2$. Nach Anbringen dieses Faktors wird als Amplitude der Schwingung mit 1,14 Hz ein Wert von 0,6 Millimeter erhalten. Dies ist ein durchaus akzeptabler Wert, welcher 2/3 so groß ist wie aus der Messung mit GNSS, da das Smartphone ja auch einige Meter unterhalb der GNSS Antenne angebracht ist. Auch die anderen Beschleunigungswerte können so umgerechnet werden. Eine Zusammenfassung erfolgt in der Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Messergebnisse der Messung mit dem Smartphone

Frequenz	Amplitude [m/s²]	Amplitude [mm]	Faktor zu 1,14 Hz
1,14	0,030	0,6	
1,26	0,005	0,1	6
1,40	0,002	0,03	18
(0,38)	(0,001)	(0,2)	(3)
(0,42)	(0,001)	(0,2)	(3)

6.3.3 Analyse der Messdaten des SBG IG-500E

Analog zur Messung mit dem Smartphone werden die Messwerte zunächst wieder in einem Plot dargestellt.

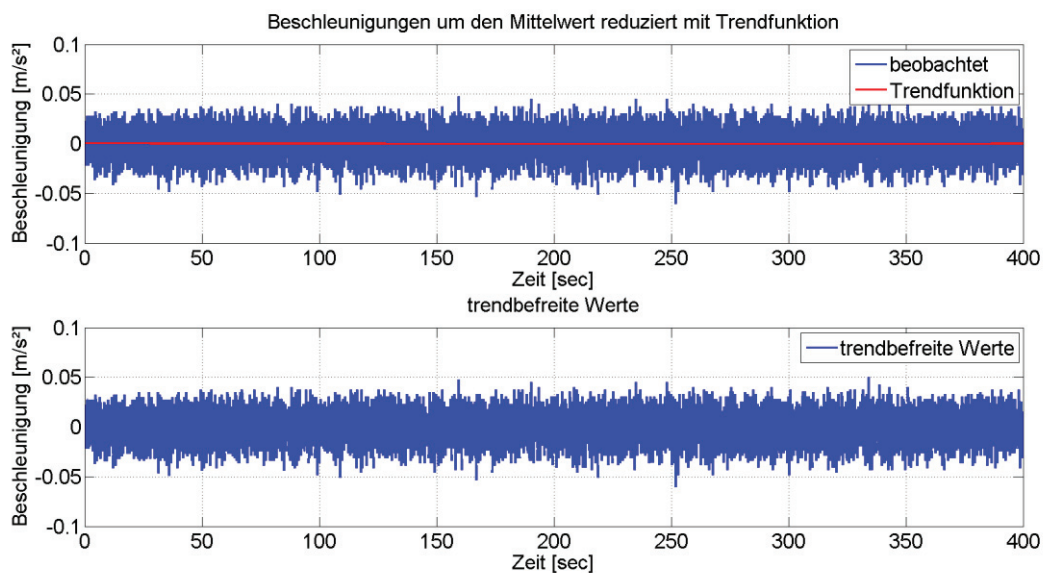


Abbildung 6.13: Beobachtungsdaten des SBG IG-500E

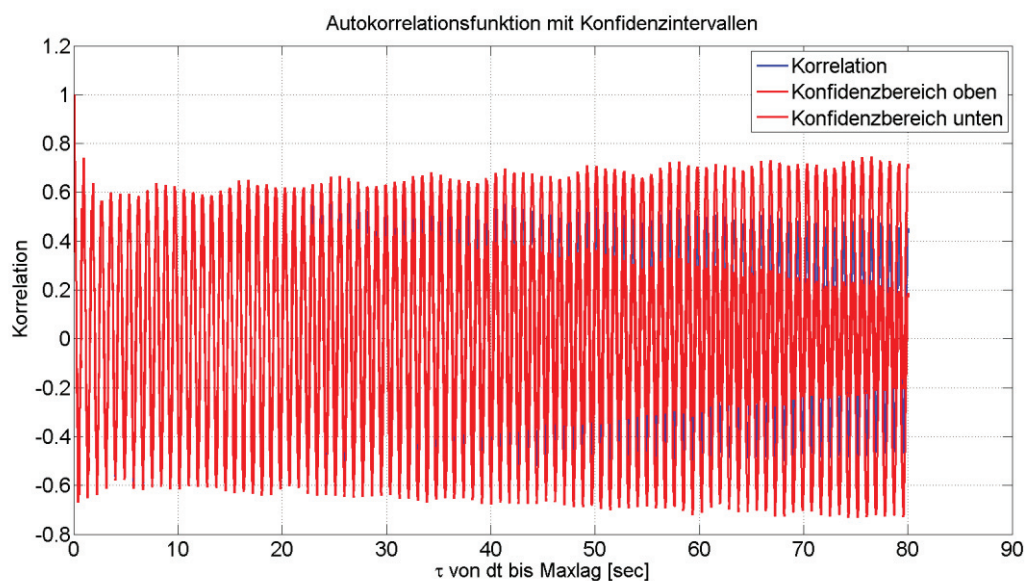


Abbildung 6.14: Autokorrelationsfunktion der Messung mit dem SBG IG-500E

Anhand der Autokorrelationsfunktion lässt sich auch hier die Frequenz abschätzen. Die Korrelationslänge ist in etwa genau so groß wie bei der Messung mit dem Smartphone.

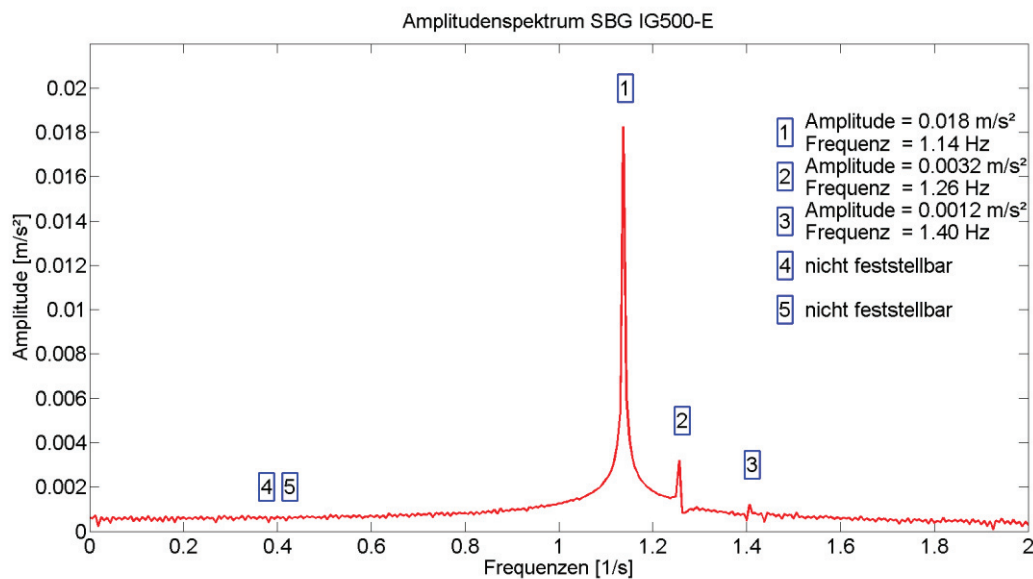


Abbildung 6.15: Amplitudenspektrum der Messung mit dem SBG IG-500E

In Abbildung 6.15 ist das Amplitudenspektrum dargestellt. Die Frequenzen werden, wie in Abbildung 6.12 dargestellt, nachgewiesen. Die Peaks bei 1,14 Hz, 1,26 Hz und 1,40 Hz sind auch hier vorhanden. Die Frequenzen der beiden größten Glocken können nicht gefunden werden. Die Amplituden werden wie in Kapitel 6.3.2 mit Hilfe der Integration berechnet.

Tabelle 6.4: Zusammenstellung der Frequenzen und Amplituden der Messung mit dem SBG IG-500E

Frequenz	Amplitude [m/s^2]	Amplitude [mm]	Faktor zu 1,14 Hz
1,14	0,018	0,35	
1,26	0,0032	0,05	7
1,40	0,0012	0,02	20
(0,38)	nicht nachweisbar		
(0,42)	nicht nachweisbar		

6.3.4 Fazit zu den Messungen mit den Beschleunigungssensoren.

Die Amplituden des Beschleunigungssensors, welcher weiter oben angebracht ist haben einen Faktor von 1,7 zu den Amplituden des unteren Beschleunigungssensors. Der Unterschied ist durch die verschiedenen Höhen durchaus plausibel.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messungen mit den Beschleunigungssensoren brauchbare Ergebnisse lieferten. Durch die Umrechnung der Amplituden der Beschleunigung

in Amplituden des Weges lassen sich sogar Aussagen über die Auslenkung des Kirchturmes treffen. Zusätzlich können die Amplituden mit denen der Messungen der Neigungssensoren verglichen werden um Aussagen über den Zusammenhang der Neigungen zu Auslenkungen des Kirchturmes zu treffen. In Zukunft sollte noch ein weiterer Beschleunigungssensor an der obersten Messstation angebracht werden um direkte Vergleiche dieser Messungen mit den Messungen von GNSS und Tachymeter treffen zu können.

6.4 Neigungssensor

Im Kirchturm sind zwei Leica Nivel210 Neigungssensoren verbaut. Primäre Einsatzgebiete dieser Sensoren sind Erfassungen kleinster Neigungsbeträge über einen längeren Zeitraum. Die Abtastrate dieser Sensoren ist mit 3 Hz recht klein. Diese Sensoren sind in das DABAMOS Projekt integriert und liefern rund um die Uhr Daten, die in einer Datenbank gespeichert werden. Diese Messdaten sind von Herrn Philipp Engel zur Auswertung bereitgestellt worden.

6.4.1 Messaufbau

Ein Sensor unterhalb des Glockenstuhls angebracht. Ein zweiter Nivel210 ist auf Höhe des Oktogons verbaut. Die dritte Messstation, auf Höhe der GNSS Antenne ist bei dem Probeläuten nicht besetzt gewesen.

6.4.2 Analyse der Messdaten des oberen Nivel210

Die Amplituden werden hier als Neigungswerte angegeben. Zuerst werden die Messwerte wieder als Plot dargestellt.

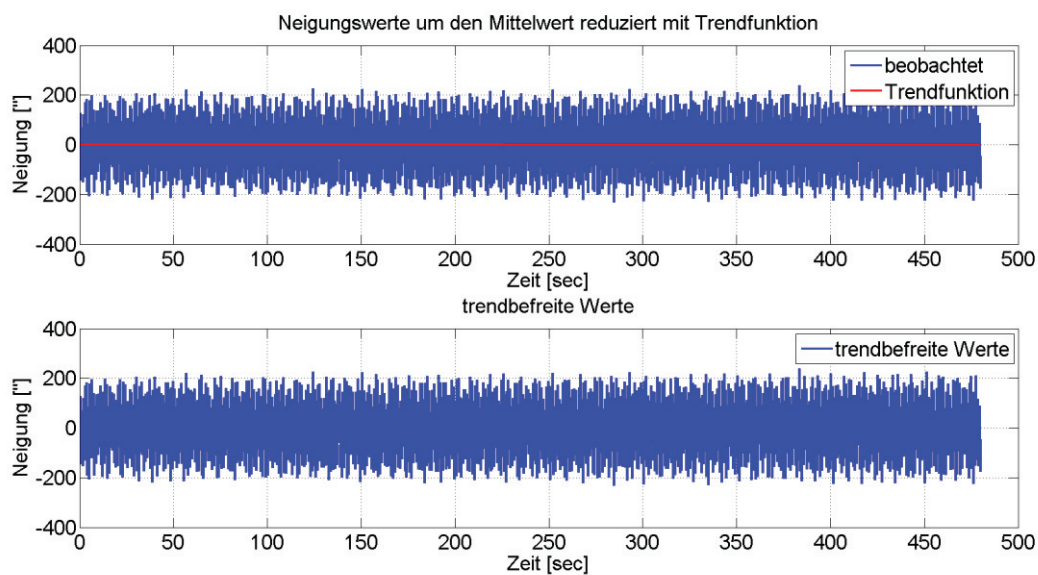


Abbildung 6.16: Messdaten Nivel210 Oktogon

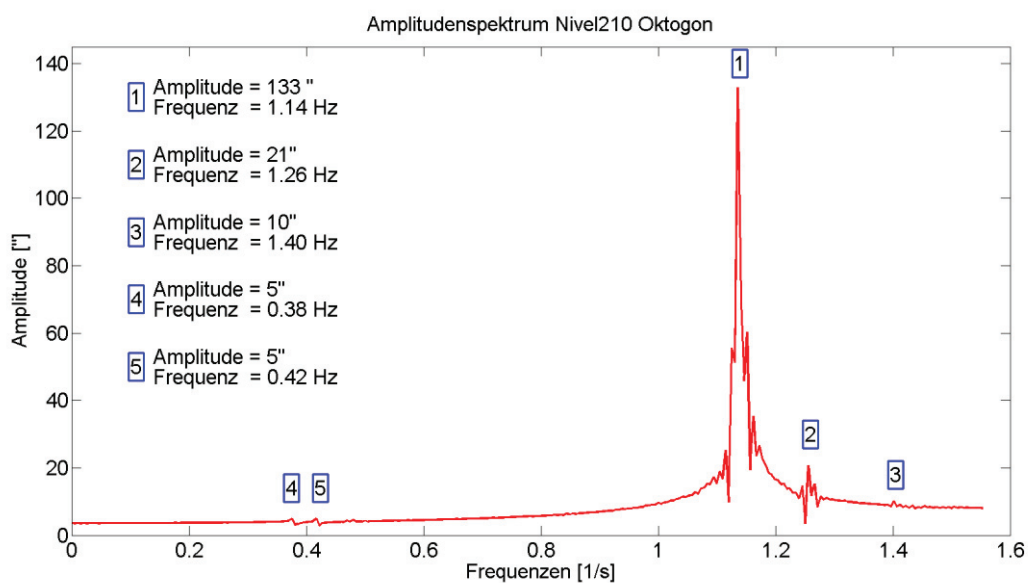


Abbildung 6.17: Amplitudenspektrum Nivel210 Oktogon

Im Amplitudenspektrum, dargestellt in Abbildung 6.17, können alle Frequenzen aus den vorherigen Messungen bestätigt werden. Sowohl die Frequenzen 1 bis 3 als auch die zwei größten Kirchenglocken treten hier auf. Da die Nivel210 Daten mit höherer Auflösung liefern ist es sogar möglich die anderen drei Kirchenglocken zu identifizieren, siehe Abbildung 6.18.

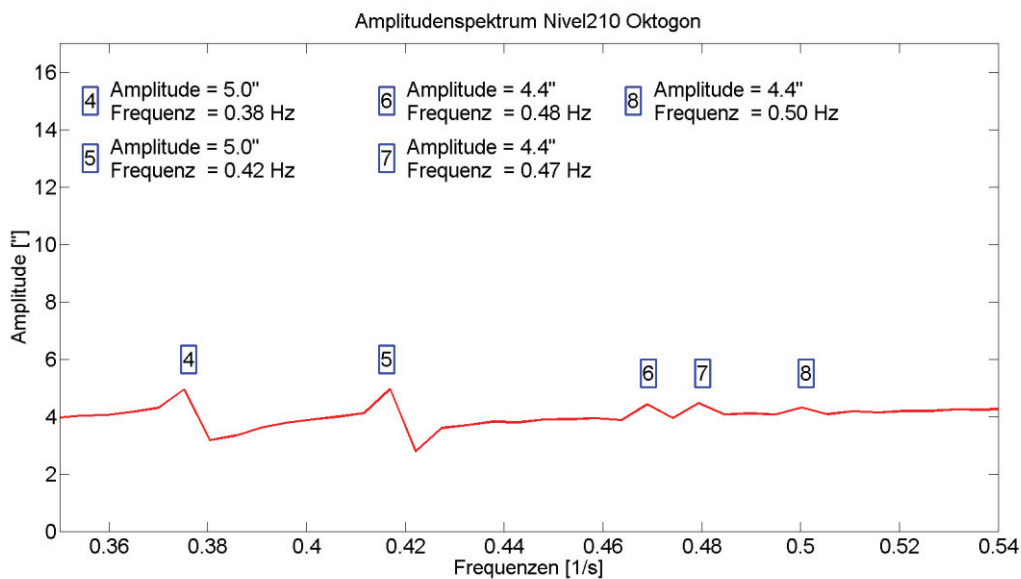


Abbildung 6.18: Ausschnitt des Amplitudenspektrum des Nivel210 Oktogon

Somit sind die Werte für die Schwingfrequenzen der fünf Kirchenglocken aus der Videoaufzeichnung bestätigt worden.

6.4.3 Analyse der Messdaten des unteren Nivel210

Die Messwerte des Nivel210 Server werden als Plot dargestellt.

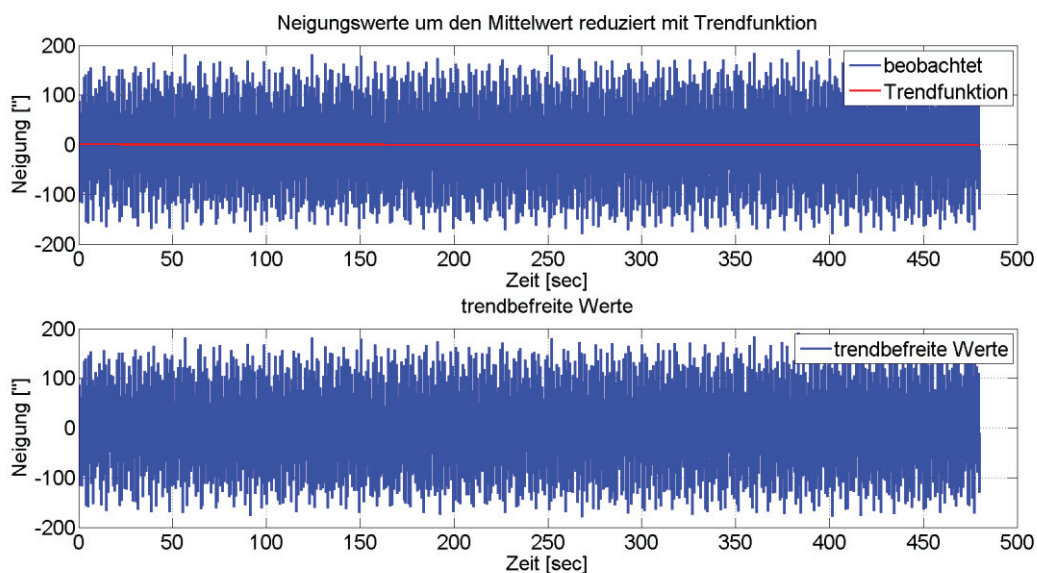


Abbildung 6.19: Beobachtungsdaten Nivel210 Server

Anhand der Beobachtungsdaten kann ausgesagt werden, dass die Messwerte der Nivel210 einen zu vernachlässigen Trend im Bezug zur aufgenommenen Messgröße besitzen.

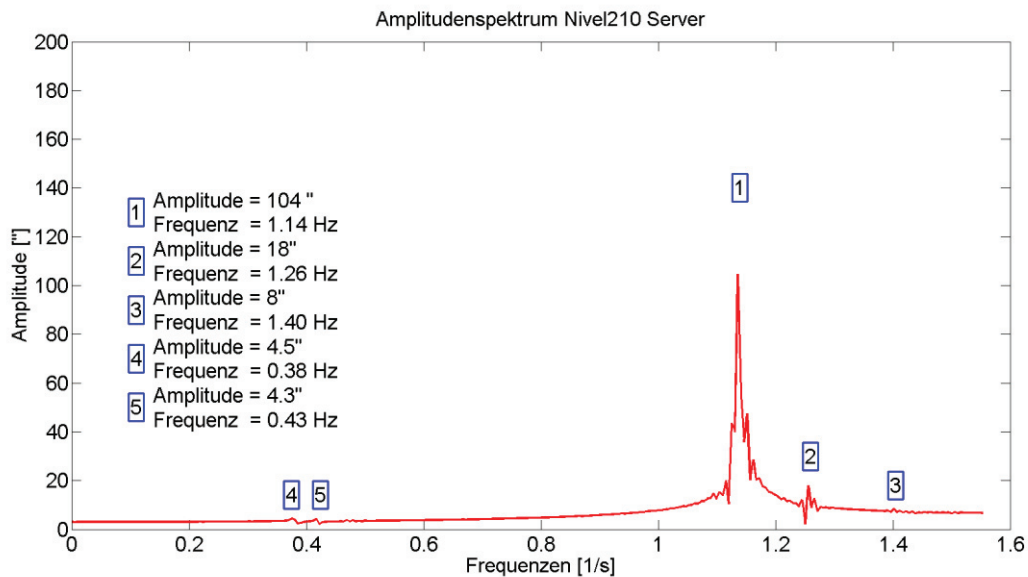


Abbildung 6.20: Amplitudenspektrum des Nivel210 Server

Die gewonnenen Werte ähneln stark den Werten des Nivel210 Oktogon. Nur die Amplituden fallen etwas kleiner aus, die Neigungswerte weisen ein Größenverhältnis von 80 % zu denen aus dem Oktogon auf. Alle Kirchenglocken, sowie die drei Frequenzen bei 1,14 Hz, 1,26 Hz und 1,40 Hz werden nachgewiesen.

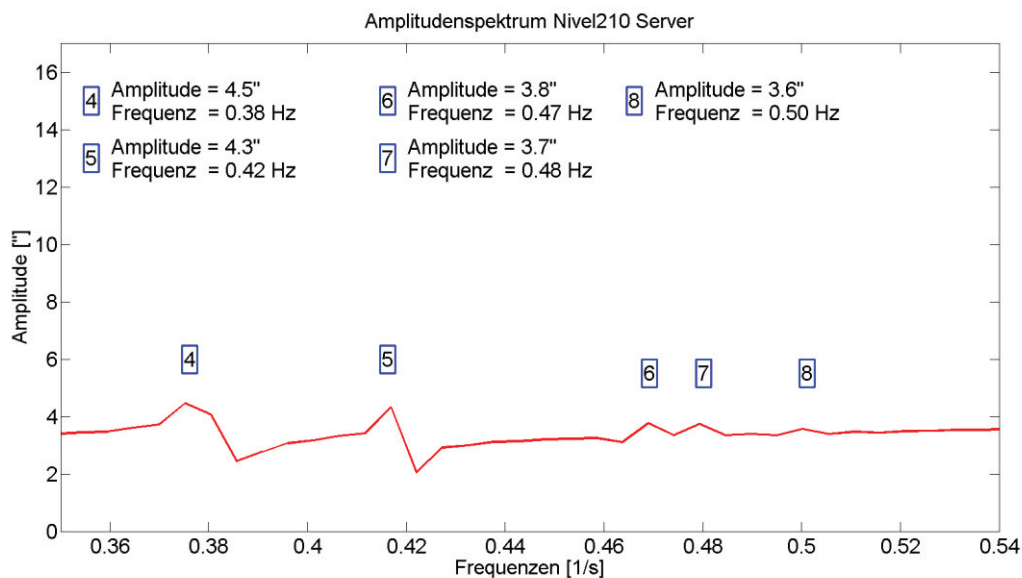


Abbildung 6.21: Ausschnitt des Amplitudenspektrums Nivel210 Server

6.4.4 Fazit zu den Neigungssensoren

Mit den Neigungssensoren konnten alle Frequenzen der Kirchenglocken gefunden werden. Die hohe Genauigkeit der Neigungsmessung spiegelt sich in einem sehr rauscharmen Amplitudenspektrum wieder. Der Verdacht, dass sich Frequenzen aufgrund der geringen

Abtastrate nur schwer nachweisen lassen würden, konnte nicht bestätigt werden. Die Neigungssensoren sind in hohem Maße geeignet um Frequenzen im Bereich bis maximal 1,5 Hz nachzuweisen.

Tabelle 6.5: Vergleich der Ergebnisse der beiden Nivel210

Sensor	Nivel210 Oktogon	Nivel210 Server	Verhältnis
Frequenz	Amplitude [“]	Amplitude [“]	
1,14	133	120	1,1
1,26	21	18	1,2
1,40	10	8	1,2
0,38	5,0	4,5	1,1
0,42	5,0	4,3	1,2

Leider lassen sich aus den Amplituden der Nivel210 Messungen kaum Rückschlüsse auf die eigentliche Auslenkung des Kirchturmes ziehen, da es sich hierbei um Neigungswerte handelt. Diese können nicht so ohne weiteres in eine Auslenkung umgerechnet werden. Üblicherweise wird die Bogenformel verwendet, dabei wird aber unter der Voraussetzung gearbeitet, dass die Verformungslinie des Objektes eine Gerade ist. Hier müsste erst ein Modell zur Geometrie der Verformungslinie aufgestellt werden. Dies ist im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht vorgesehen. So können die Amplitudenwerte der Nivel210 immerhin mit den Amplituden der Messungen der Beschleunigungsmesser verglichen werden.

Tabelle 6.6: Vergleich Neigungsmesser und Beschleunigungsmesser

Sensor	Smartphone	SBG IG-500E	Nivel Oktogon	Nivel Server
Amplituden	[mm]	[mm]	[“]	[“]
Frequenz [Hz]				
1,14	0,6	0,35	133	120
1,26	0,1	0,05	21	18
1,40	0,03	0,02	10	8

Aus Tabelle 6.6 kann entnommen werden dass die Amplitude des Neigungsmessers Nivel210 Server von 120 " einer Auslenkung des Kirchturmes von 0,35 mm entspricht, da beide Geräte nebeneinander auf einer Konsole aufgebaut waren. Der Faktor der Amplituden zwischen beiden Nivel210 beträgt 1,2 und zwischen beiden Beschleunigungssensoren 1,7. Das Nivel210 Oktagon und das Smartphone befanden sich nicht in gleicher Höhe aufgebaut. Daher weisen beide Faktoren einen Unterschied auf.

6.5 Tachymeter

Als Tachymeter wurden ein Leica TS30 und ein Leica TCRP1203 gewählt. Als Abtastrate ist bei beiden Geräten 10 Hz eingestellt worden, was effektiv rund 6,5 Hz sind. Wie schon in Kapitel 5.4.2 beschrieben sollte die schlechte zeitliche Äquidistanz ein Problem darstellen, welches die Frequenz- und Amplitudenbestimmung beeinflusst. Dennoch sollte vor allem die Bestimmung der Amplitude aus der Darstellung im Plot möglich sein.

6.5.1 Messaufbau

Diese sind ca. 100 Meter von der Kirche entfernt in verkehrstechnisch sicheren Bereichen aufgebaut worden. Das TCRP1023 befand sich nördlich der Kirche auf dem Innenhof des ehemaligen Radisson Blu Hotels. Beim TCRP1203 sollten sich die Auslenkungen des Kirchturmes in der Streckenmessung widerspiegeln. Das Leica TS30 befand sich im Innenhof des Blutspendezentrums, westlich der Kirche. Hier sollten sich die Auslenkungen des Turmes in der Richtungsmessung widerspiegeln. Beide Geräte wurden im Synchrotrack Modus betrieben, welcher eine Synchronisation der Richtungs- und Neigungssensoren des Gerätes auf die Streckenmessung vollzieht.



Abbildung 6.22: Lage der Instrumentenstandpunkte [MV, 2016]

6.5.2 Auswertung der Messdaten des TCRP1203

Zuerst sollen Messdaten betrachtet werden, welche über einen Zeitraum von acht Minuten ausgewertet wurden. Diese werden als Plot dargestellt und anschließend wird die Frequenzanalyse durchgeführt.

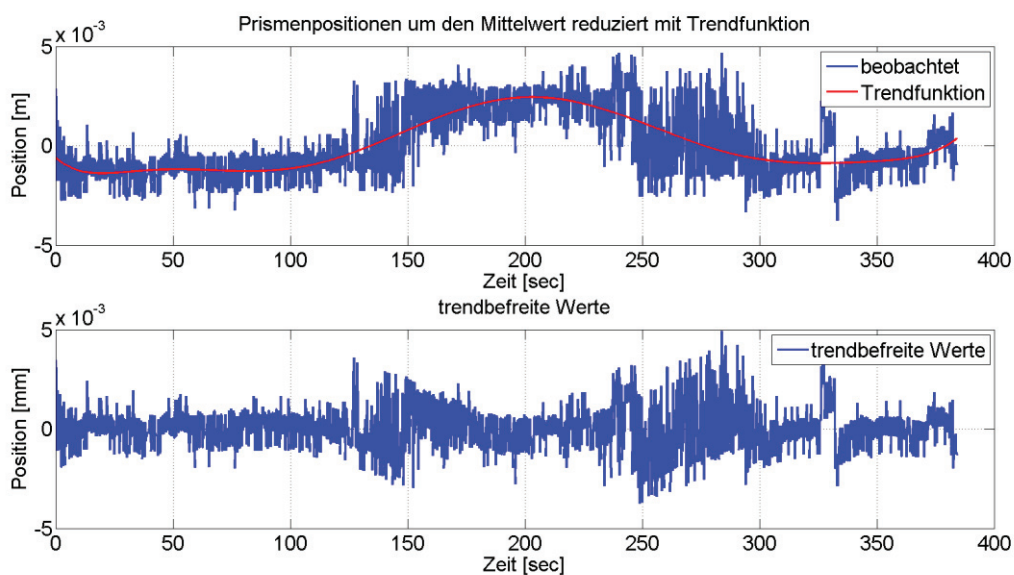


Abbildung 6.23: Messwerte des TCRP1203

In Abbildung 6.23 ist die Anwendung einer höherwertigen Trendbeseitigung zu erkennen. So können die Messwerte gut zentriert werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass durch die Trendbeseitigung nicht eventuelle Frequenzen verlorengehen.

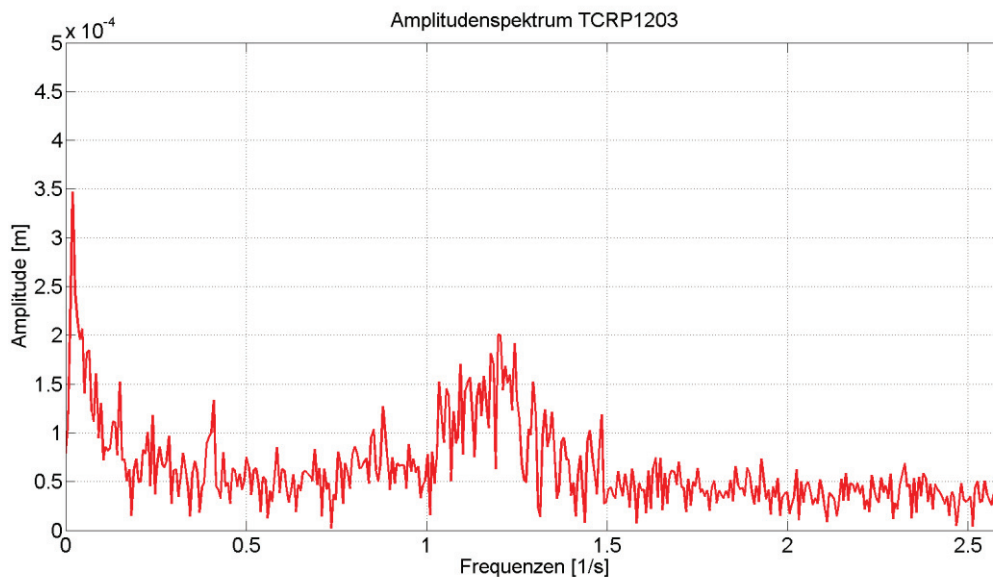


Abbildung 6.24: Amplitudenspektrum TCRP1203

Aus dem Amplitudenspektrum geht hervor, dass die zu erwartende größte Amplitude bei 1,14 Hz nicht entnommen werden kann. Es gibt einige Peaks in diesem Bereich, aber die Werte liegen um die 0,15 Millimeter. Dies ist kein zufriedenstellendes Ergebnis, was auf die mangelhafte zeitliche Äquidistanz zurückzuführen ist. Um dieses Problem zu minimieren ist in Anschluss ein Ausschnitt des Messzeitraumes von ca. elf Sekunden ausgewertet worden.

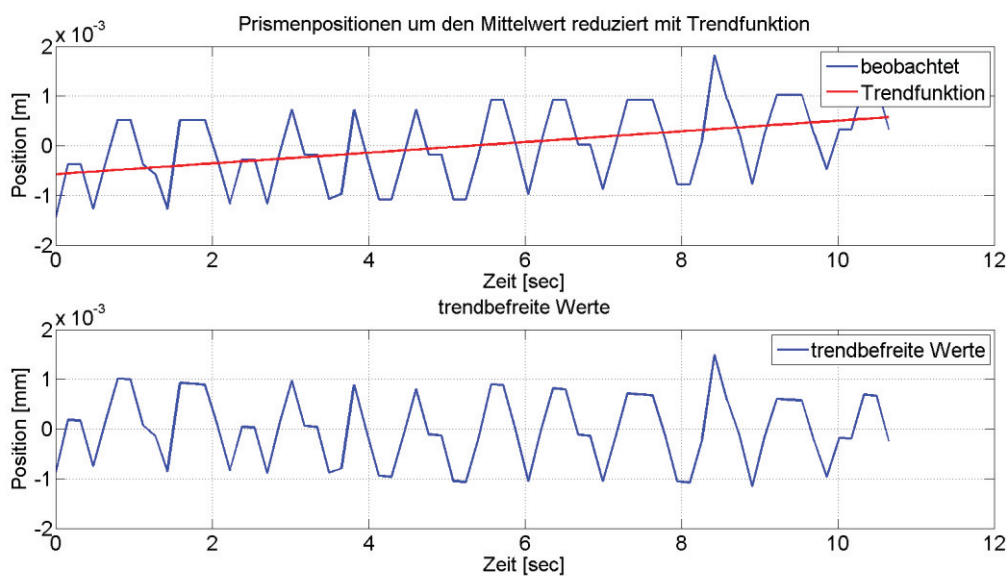


Abbildung 6.25: Ausschnitt der Messwerte des TCRP1203

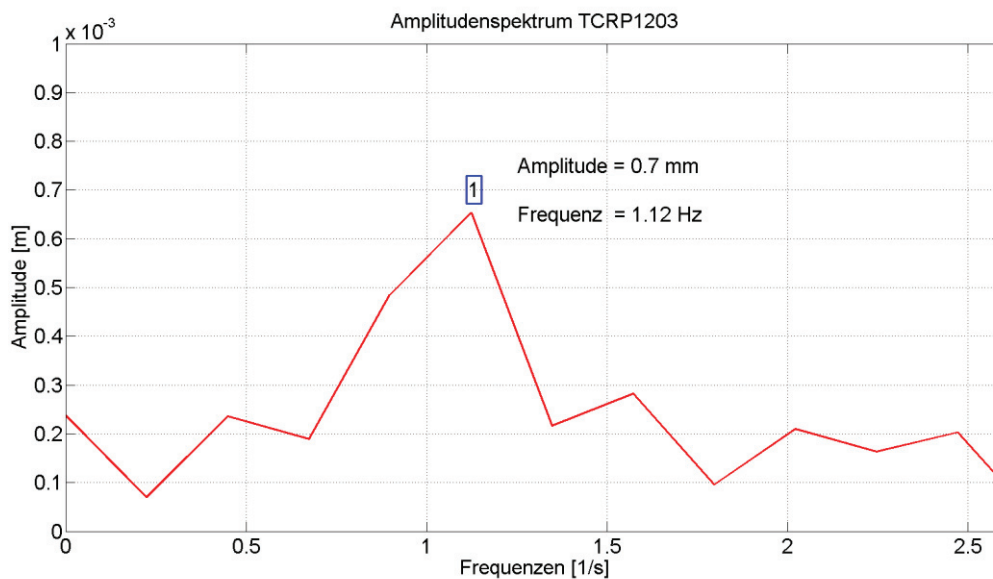


Abbildung 6.26: Amplitudenspektrum des Ausschnitts der Daten des TCRP1203

Wie in Abbildung 6.26 zu erkennen ist, kann die Amplitude bestimmt werden. Das Spektrum wirkt etwas zu klein, hier ist der Effekt zu sehen, dass sich das eigentliche Spektrum auf zwei Peaks verteilt. Werden beide Peaks addiert wird ein Wert von 1,1 Millimeter erhalten.

Das Ergebnis der Frequenzanalyse soll wieder mit einer Amplitudenbestimmung mittels Ausgleichung verglichen werden.

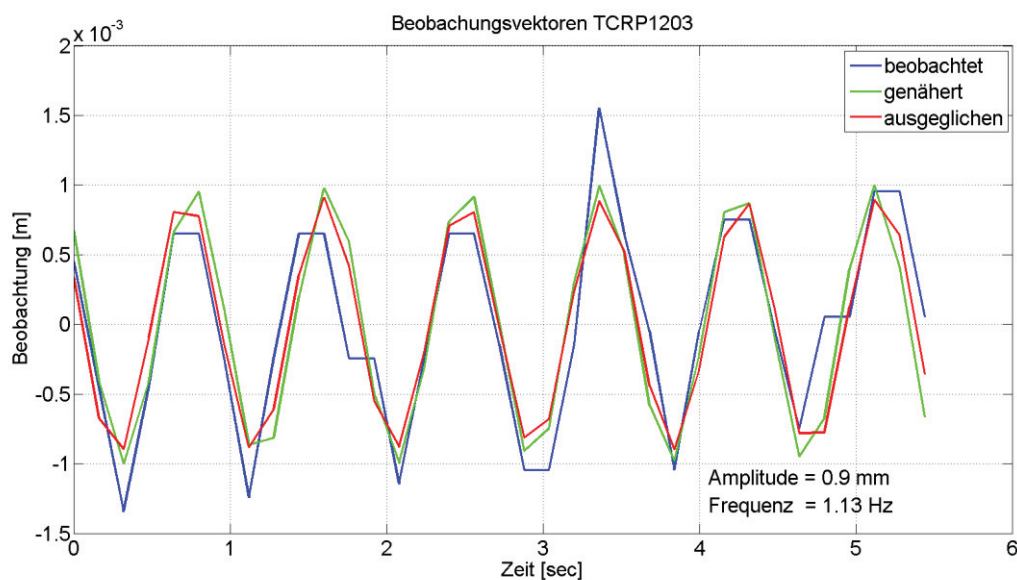


Abbildung 6.27: Amplitudenbestimmung mittels Ausgleichung (TCRP1203)

Die Frequenz wird in ähnlicher Weise geschätzt, die Amplitude ist hier etwas größer. Der Vergleich beider Auswerteverfahren ist zufriedenstellend verlaufen.

6.5.3 Auswertung der Messdaten des TS30

Die Messdaten des TS30 werden zunächst wieder als lange Zeitreihe von sieben Minuten dargestellt. Auch war die Auswertung des Amplitudenspektrums nicht zufriedenstellend.

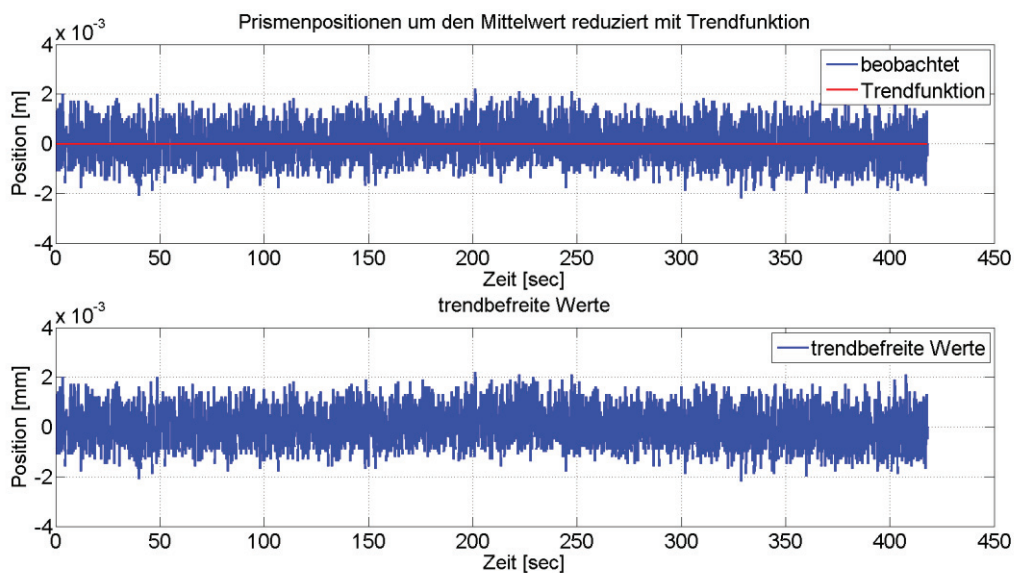


Abbildung 6.28: Messdaten über sieben Minuten des TS30

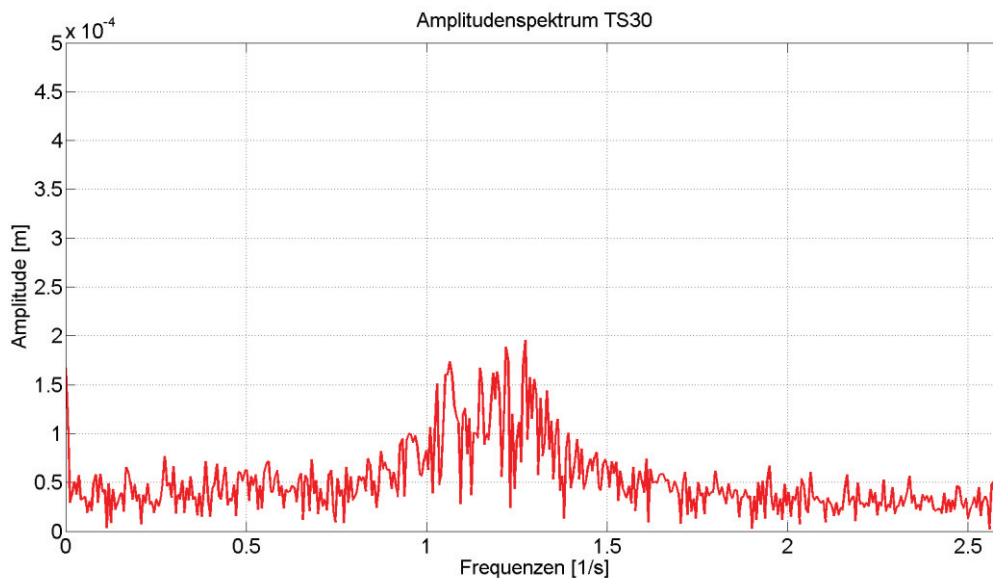


Abbildung 6.29: Amplitudenspektrum der Messung mit dem TS30

Um ein besseres Ergebnis zu erhalten ist aus der langen Zeitreihe wieder ein kurzes Stück ausgewählt worden, welches innerhalb der Zeitspanne der Neuinitialisierung der Streckenmessung von zwölf Sekunden liegt.

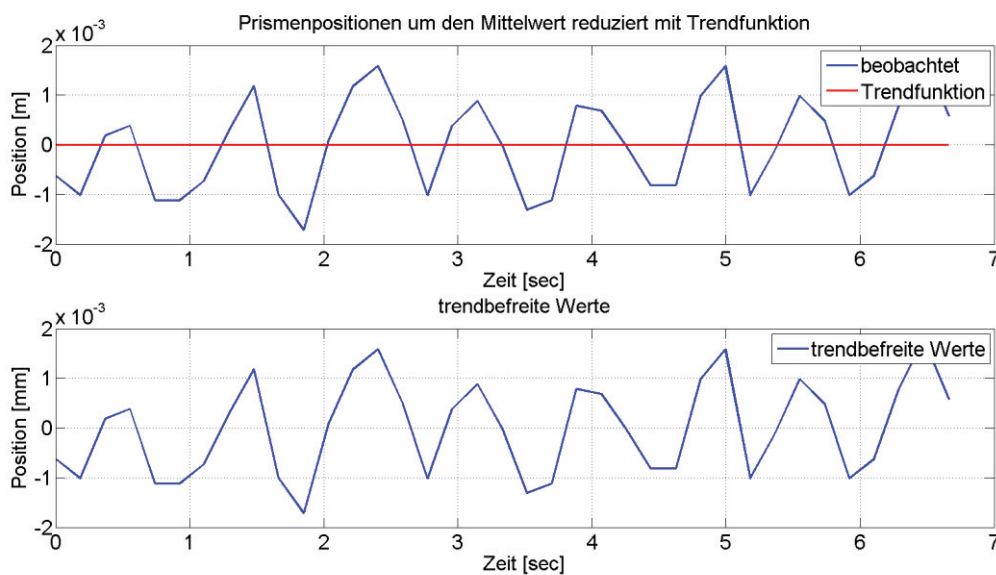


Abbildung 6.30: kurze Zeitreihe des TS30

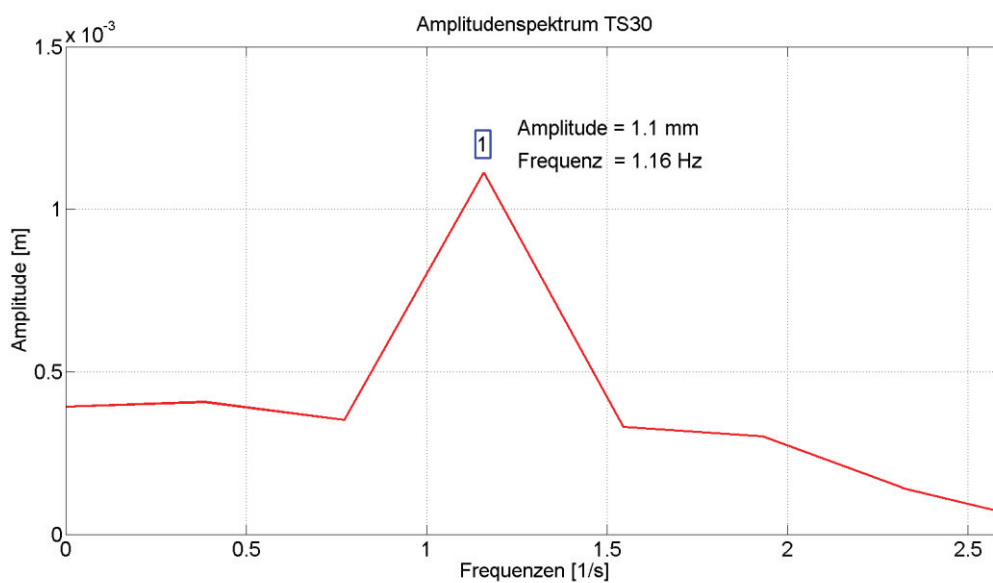


Abbildung 6.31: Amplitudenspektrum der kurzen Zeitreihe (TS30)

Die Bestimmung der Amplitude und Frequenz liefert im Gegensatz zur Bestimmung aus der langen Zeitreihe gute Ergebnisse. Die Amplitude ist in etwa so groß, wie diese aus dem Plot der Messdaten, siehe Abbildung 6.28, zu erwarten ist.

Auch diese Ergebnisse werden nun mit einer Bestimmung mittels Ausgleichung verglichen.

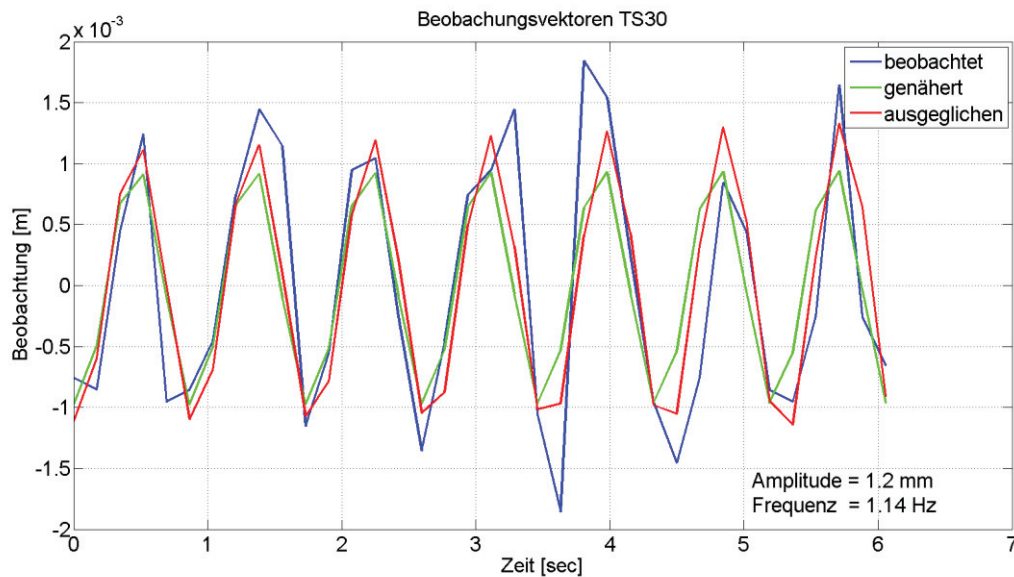


Abbildung 6.32: Amplitudenbestimmung mittels Ausgleichung (TCRP1203)

Die Werte stimmen auch hier sehr gut überein und lassen beide Analyseverfahren zur Bestimmung der vorherrschenden Amplitude und Frequenz gleichwertig erscheinen.

6.5.4 Fazit zu den Tachymetern

Die Auswertung der Tachymeterdaten erwies sich schwieriger als gedacht. Nur die Schwingung mit der größten Amplitude konnte nachgewiesen werden.

Für die Analyse von Zeitreihen ist die zeitliche Äquidistanz der Messwerte ein sehr wichtiges Kriterium. Hier kann nur auf neue Gerätegenerationen gewartet werden, welche neben der Messgenauigkeit auch eine exakte Zeitgleichheit der Messungen aufweisen.

Die Ergebnisse der Tachymetermessungen werden zu besserer Übersicht in Tabellenform zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Vergleich der Tachymetermessungen

Messgerät	Methode	Frequenz [Hz]	Amplitude [mm]
TCRP1203	Frequenzanalyse	1,12	0,7
TCRP1203	Ausgleichung	1,13	0,9
TS30	Frequenzanalyse	1,16	1,1
TS30	Ausgleichung	1,14	1,2

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit allen Messmethoden konnten Schwingungen am Kirchturm nachgewiesen werden. Dabei erwiesen sich so klassische Messmethoden wie die tachymetrischen Messungen als schwierig auswertbar. Hier ist weiterer Untersuchungsbedarf gegeben. Um eine exaktere Datenanalyse zu verwirklichen, können bessere Interpolationsalgorithmen gesucht werden. So können die Auswirkungen der zeitlich schlechten Äquidistanz minimiert werden. Auch andere Messgeräte liefern möglicherweise bessere Ergebnisse.

Bei der Langzeitqualität des GNSS Messsystems traten Probleme durch Mehrwegeeffekte auf. Hier besteht Untersuchungsbedarf, da das Monitoring in der jetzigen Konfiguration zu oft keine schlüssigen Ergebnisse liefert.

Die Tauglichkeit der Neigungssensoren für diese Messaufgabe konnte nachgewiesen werden. Das Problem der schwierigen Umrechnung der Neigungswerte in Strecken ist noch nicht gelöst worden.

Erstaunt hat die Tatsache, dass sich schon einfache Smartphones als Detektoren für diese Schwingungen geeignet haben. Nicht nur die Frequenz, sondern auch die Amplitude der Schwingungen konnte mit den Beschleunigungsmessern nachgewiesen werden. Dabei liegen die Ergebnisse im selben Bereich wie die Ergebnisse anderer Sensoren.

Die Befürchtung, dass sich der Kirchturm um mehrere Zentimeter oder gar Dezimeter bewegt konnte entkräftet werden. Es treten zwar Schwingungen am Kirchturm auf, welche durch das Glockenspiel verursacht werden, aber diese sind von der Amplitude her sehr klein. Die Frequenzen der Kirchenglocken konnten nachgewiesen werden, sowie deren Auswirkungen auf das Mauerwerk. Dazu soll Tabelle 7.1 verdeutlichen wie sich die Schwingungen der Kirchenglocken auf die Gebäudesubstanz auswirken.

Tabelle 7.1: Zusammenstellung gemessener Glocken- und Gebäudefrequenzen

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

Das Gebäude schwingt mit einem konstanten Faktor von drei im Bezug zu den Glocken. Dies ist physikalisch gesehen die dritte Harmonische. Die Frequenz von 1,14 Hz liegt wahrscheinlich nahe der Eigenfrequenz des Kirchturmes. Denn nur bei dieser Frequenz wird die eigentliche Glockenfrequenz der Marienglocke besonders verstärkt.

Annahmen über eine große Amplitude konnten widerlegt werden. Hier scheint der Körper des Menschen und dessen Sensoren besonders empfindlich auf den Schalldruck der Kirchenglocken zu reagieren. So kommt es zu einer Überlastung des Gleichgewichtssinns und die Gebäudeschwingungen werden so verstärkt wahrgenommen.

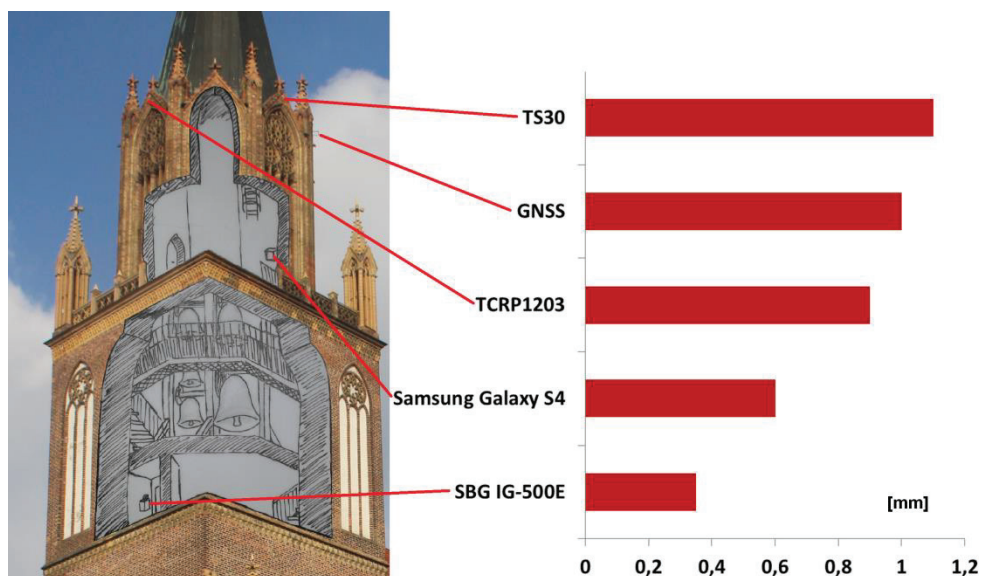


Abbildung 7.1: Darstellung der Amplituden der Kirchturmschwingung

8 Literaturverzeichnis

Faro. 2012. Faro Lasertracker Vantage Technische Spezifikationen. 2012.

Foppe, Karl. 2015. *Skript Analyse stochastischer Prozesse*. Hochschule Neubrandenburg : s.n., 2015.

Grimm, Hornung. 2015. Leica ATRplus - Leistungssteigerung der automatischen Messung und Verfolgung von Prismen. Heerbrugg : Wichmann, 2015.

Joeckel, Stober und Huet. 5. Auflage, 2008. *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Heidelberg, München, Landsberg, Berlin : Herbert Wichmann Verlag, 5. Auflage, 2008.

Larisch, Hans-Jürgen. 2013. *Skript Sensorik und spezielle Auswertemethoden*. Hochschule Neubrandenburg : s.n., 2013.

Möser, Hoffmeister, Müller, Schlemmer, Staiger, Wanninger. 4. Auflage 2012. *Handbuch Ingenieurgeodäsie, Grundlagen*. Dresden : Wichmann, 4. Auflage 2012.

Muffert, M, Eling, C. und Kuhlmann, H. 2009. Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Frequenzbereich. *Schriftenreihe des DVW: Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten*. 2009, Bd. 59.

MV, Geoportal. 2016. GeoPortal.MV. www.gaia-mv.de/gaia/gaia.php. [Online] 01. 02 2016. [Zitat vom: 06. 03 2016.]

Neuner, H. und K., Foppe. 2009. Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich. *Schriftenreihe des DVW: Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten*. 2009, Bd. 59.

Rinner, K. 1978. Entwicklungstendenzen in der Ingenieurgeodäsie. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*. 1978, S. 161 - 166.

Stadt Neubrandenburg. 1998. *Marienkirche Neubrandenburg*. Rostock : Hinstorff Verlag GmbH, 1998.

Sternberg, Harald, et al. 2014. Multi-Sensor-Systeme ind der Ingenieurgeodäsie - Grundlagen und Überblick. *Schriftenreihe des DVW: Multi-Sensor-Systeme - Bewegte Zukuntsfelder*. 2014, Bd. 75.

Wikipedia. 2016. Marienkirche (Neubrandenburg). www.wikipedia.org. [Online] 09. 01 2016. [Zitat vom: 11. 02 2016.]
[https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Marienkirche_\(Neubrandenburg\)&oldid=149982342](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Marienkirche_(Neubrandenburg)&oldid=149982342).

Wikipedia. 2016. Alias-Effekt. www.wikipedia.org. [Online] 06. 01 2016. [Zitat vom: 11. 03 2016.]
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Alias-Effekt&oldid=149956058>.

Wikipedia. 2016. Das brennende Neubrandenburg. *Wikipedia.org*. [Online] 22. 02 2016. [Zitat vom: 24. 02 2016.]
https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Das_brennende_Neubrandenburg&oldid=151809779.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Die Marienkirche heute.....	7
Abbildung 1.2: Innenansicht [Stadt Neubrandenburg, 1998], Seite34	8
Abbildung 1.3: Das brennende Neubrandenburg [Wikipedia, 2016].....	9
Abbildung 1.4: Die zerstörte Kirche 1952 [Wikipedia, 2016].....	10
Abbildung 1.5: Aufsetzen des Helmes [Stadt Neubrandenburg, 1998], Seite 111.....	12
Abbildung 1.6: Ostgiebel der Marienkirche [Wikipedia, 2016].....	13
Abbildung 2.1: Unterteilung der Ingenieurgeodäsie	14
Abbildung 3.1: Akku-Säbelsäge	18
Abbildung 3.2: Auszug Schwerlastregal.....	19
Abbildung 3.3: Schiene, Winkel und Reflektoradapter.....	19
Abbildung 3.4: Die aufgebaute Vorrichtung	20
Abbildung 3.5: Zeichnungsableitung aus Inventor	21
Abbildung 3.6: Rohfertigung der Halterung mit GNSS Antennen	22
Abbildung 3.7: Anbringen der Antennenhalterung	22
Abbildung 4.1: Beispiel für eine Zeitreihe	23
Abbildung 4.2: Beispiel für ein Energiespektrum	25
Abbildung 4.3: Darstellung eines Alias-Effektes [Wikipedia, 2016]	25
Abbildung 5.1: Faro Lasertracker Vantage	26
Abbildung 5.2: Messaufbau der kombinierten Testmessung	27
Abbildung 5.3: beobachtete Prismenpositionen des Faro Vantage.....	28
Abbildung 5.4: Autokorrelationsfunktion mit Konfidenzintervallen.....	28
Abbildung 5.5: Amplitudenspektrum Faro Tracker	29
Abbildung 5.6: Beobachtungen, Näherungswerte und gekürzte Beobachtungen.....	30
Abbildung 5.7: ausgeglichene Schwingung.....	30
Abbildung 5.8: Roverpositionen	32
Abbildung 5.9: Autokorrelationsfunktion GMX902	32
Abbildung 5.10: Amplitudenspektrum der GNSS Testmessung.....	33
Abbildung 5.11: genäherte und gekürzte Beobachtungen Testmessung GMX902	33
Abbildung 5.12: ausgeglichene Schwingung der GNSS Testmessung	34
Abbildung 5.13: Testmessung GMX902 mit geringer Abweichung zu Gitternord	35
Abbildung 5.14: Amplitudenspektrum der Testmessung mit geringer Nordabweichung.....	35
Abbildung 5.15: Antennenadapter 15 ° und 30 °	36
Abbildung 5.16: Testmessung mit geringer Höhenänderung	36
Abbildung 5.17: Amplitudenspektrum der Testmessung mit geringer Höhenänderung	37
Abbildung 5.18: Beschleunigungswerte um den Mittelwert reduziert der Testmessung mit dem Samsung Galaxy S4.....	38
Abbildung 5.19: Autokorrelationsfunktion der Testmessung mit dem Samsung Galaxy S4	38
Abbildung 5.20: Amplitudenspektrum der Smartphone Testmessung.....	39
Abbildung 5.21: Integration ohne Trendberücksichtigung	41
Abbildung 5.22: Integration mit Trendberücksichtigung.....	41
Abbildung 5.23: Abschnitt der Messdaten des Smartphones Samsung S4	42
Abbildung 5.24: genäherte und gekürzte Beobachtungen der Smartphonemessung	42
Abbildung 5.25: ausgeglichene Funktion der Testmessung mit dem Smartphone Samsung Galaxy S443	
Abbildung 5.26: Beobachtungen Leica TS30.....	44

Abbildung 5.27: Korrelationsfunktion Testmessung TS30	44
Abbildung 5.28: Amplitudenspektrum Leica TS30.....	45
Abbildung 5.29: Ausschnitt der Zeitreihe der Testmessung mit dem TS30	46
Abbildung 5.30: genäherte und gekürzte Beobachtungen der Testmessung mit dem TS30	46
Abbildung 5.31: Ausgegliche Funktion der Schwingung der Testmessung des TS30	47
Abbildung 5.32: Äquidistanz der Zeitmessung des TS30 in Trackingmodus	48
Abbildung 5.33: Detektion von Schwingungen unter Verwendung verschiedener Zielweiten	49
Abbildung 5.34: Prinzip der Messpositionen.....	50
Abbildung 5.35: Streckenmessung	51
Abbildung 5.36: Richtungsmessung	52
Abbildung 5.37: Position 4 bei einer Entfernung von 200 m	53
Abbildung 5.38: Position 2 bei einer Streckenlänge von 100 m	53
Abbildung 5.39: Position 3 bei einer Streckenlänge von 100 m	54
Abbildung 6.1: Übersicht der Sensoren	56
Abbildung 6.2: Glockenstuhl	57
Abbildung 6.3: GNSS Basisstation mit Blick auf die Marienkirche	58
Abbildung 6.4: Beobachtungen des Rovers über den Zeitraum von zwei Tagen	58
Abbildung 6.5: Rohmesswerte und trendbefreite Messwerte	59
Abbildung 6.6: Autokorrelationsfunktion der GNSS Messung.....	60
Abbildung 6.7: Amplitudenspektrum der GNSS Messung	61
Abbildung 6.8: Positionen des Rovers als Ausschnitt der GNSS Messung	61
Abbildung 6.9: ausgeglichene Funktion der GNSS Messung.....	62
Abbildung 6.10: Beobachtungsdaten des Samsung Galaxy S4	64
Abbildung 6.11: Autokorrelationsfunktion der Smartphonemessung.....	64
Abbildung 6.12: Amplitudenspektrum der Smartphonemessung	65
Abbildung 6.13: Beobachtungsdaten des SBG IG-500E.....	66
Abbildung 6.14: Autokorrelationsfunktion der Messung mit dem SBG IG-500E	66
Abbildung 6.15: Amplitudenspektrum der Messung mit dem SBG IG-500E.....	67
Abbildung 6.16: Messdaten Nivel210 Oktogon	69
Abbildung 6.17: Amplitudenspektrum Nivel210 Oktogon.....	69
Abbildung 6.18: Ausschnitt des Amplitudenspektrum des Nivel210 Oktogon	70
Abbildung 6.19: Beobachtungsdaten Nivel210 Server	70
Abbildung 6.20: Amplitudenspektrum des Nivel210 Server	71
Abbildung 6.21: Ausschnitt des Amplitudenspektrums Nivel210 Server.....	71
Abbildung 6.22: Lage der Instrumentenstandpunkte	74
Abbildung 6.23: Messwerte des TCRP1203	74
Abbildung 6.24: Amplitudenspektrum TCRP1203	75
Abbildung 6.25: Ausschnitt der Messwerte des TCRP1203	75
Abbildung 6.26: Amplitudenspektrum des Ausschnitts der Daten des TCRP1203	76
Abbildung 6.27: Amplitudenbestimmung mittels Ausgleichung (TCRP1203)	76
Abbildung 6.28: Messdaten über sieben Minuten des TS30	77
Abbildung 6.29: Amplitudenspektrum der Messung mit dem TS30.....	77
Abbildung 6.30: kurze Zeitreihe des TS30	78
Abbildung 6.31: Amplitudenspektrum der kurzen Zeitreihe (TS30)	78
Abbildung 6.32: Amplitudenbestimmung mittels Ausgleichung (TCRP1203)	79
Abbildung 7.1: Darstellung der Amplituden der Kirchturmschwingung	81

10 Formelverzeichnis

Formel 4.1: Erwartungswert eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 30	23
Formel 4.2: Varianz eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 30	23
Formel 4.3: Autokovarianzfunktion eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 31	24
Formel 4.4: Autokorrelationsfunktion eines stochastischen Prozesses [Neuner, et al., 2009] S. 32	24
Formel 4.5: Fourier-Kosinus-Transformation [Foppe, 2015] S. 115.....	24
Formel 4.6: Nyquist-Frequenz	25
Formel 5.1: ungedämpfte harmonische Schwingung	29
Formel 5.2: Schwingungsgleichung der Beschleunigung	39
Formel 5.3: Geschwindigkeit, die erste Integration der Beschleunigung nach der Zeit.....	40
Formel 5.4: der Weg, die zweite Integration der Beschleunigung nach der Zeit.....	40
Formel 5.5: Ergebnis der doppelten Integration	40

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einteilung von Multi-Sensor-Systemen [Sternberg, et al., 2014]	16
Tabelle 2.2: Übersicht von Vor- und Nachteilen von GNSS als Messsystem.....	17
Tabelle 3.1: Kombinationsmöglichkeiten der Adapter	20
Tabelle 5.1: Vergleich der Ergebnisse der Bestimmung von Frequenz und Amplitude der Messung mit dem Lasertracker	31
Tabelle 5.2: Vergleich der Bestimmungsmethoden für die GNSS Testmessung	34
Tabelle 5.3: Vergleich der Bestimmungsmethoden der Testmessung mit dem Smartphone.....	43
Tabelle 5.4: Vergleich der Bestimmungsmethoden der Testmessung mit dem TS30	47
Tabelle 5.5: Amplituden der Schwingung in Bezug auf die Position der Verschiebungsvorrichtung: ...	50
Tabelle 5.6: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung.....	54
Tabelle 5.7: Vergleich aller Testmessungen in Bezug auf den Lasertracker	55
Tabelle 6.1: Bestimmung der Glockenfrequenzen	57
Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Frequenzen und Amplituden der GNSS Messung	62
Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Messergebnisse der Messung mit dem Smartphone	65
Tabelle 6.4: Zusammenstellung der Frequenzen und Amplituden der Messung mit dem SBG IG-500E	67
Tabelle 6.5: Vergleich der Ergebnisse der beiden Nivel210.....	72
Tabelle 6.6: Vergleich Neigungsmesser und Beschleunigungsmesser	72
Tabelle 6.7: Vergleich der Tachymetermessungen.....	79
Tabelle 7.1: Zusammenstellung gemessener Glocken- und Gebäudefrequenzen	81