



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Einrichtung eines ingenieurgeodätischen Monitoring Systems in der Marienkirche in Neubrandenburg

Masterarbeit

im

Studiengang Geodäsie und Geoinformatik
der Hochschule Neubrandenburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Engineering (M.Eng)

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe
Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Heger

vorgelegt von: Benjamin Sackel

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2015-0636-5
Neubrandenburg, September 2015

Erklärung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die hier vorliegende Masterarbeit von mir selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst wurde und ich ausschließlich die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Materialien verwendet habe.

Neubrandenburg, _____

Ort, Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit ist in Zusammenarbeit mit der Hochschule Neubrandenburg entstanden. Auf diesem Wege möchte ich mich bei allen bedanken, die mir bei der Vorbereitung und Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe und Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Heger für die Ermöglichung dieser Arbeit und ihre fachliche Unterstützung. Ebenso danke ich M.Eng. Philipp Engel für die Ideen und die Umsetzung der Messstationen in der Marienkirche.

Auch Dipl.-Ing. Olaf Keitsch danke ich für die Softwarelösung der Neigungssensoren sowie Sebastian Geschwind für die Herstellung und Hilfe bei der Anbringung der Konsolen und aller relevanten Bauteile.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mir während meiner gesamten Studienzzeit immer unter die Arme griffen. Und zu guter Letzt danke ich meiner Freundin für ihre Geduld mit mir und die notwendigen A...ttre zur Fertigstellung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit einem ingenieurgeodätischen Gebäudemonitoring der Marienkirche in Neubrandenburg. Dabei soll mit verschiedenen Messinstrumenten nachgewiesen werden, ob sich der Kirchturm unter dem Einfluss der pendelnden Kirchenglocken beim Glockenspiel bewegt. Dazu kommen Tachymeter, Neigungssensoren und Beschleunigungssensoren zum Einsatz.

In dieser Masterarbeit wird zunächst die Marienkirche Neubrandenburg als Messobjekt beschrieben. Anschließend werden die Grundlagen zum geodätischen Monitoring gelegt und die verwendeten Messinstrumente erklärt. Es folgen diverse Testmessungen der Messinstrumente und das theoretische und praktische Vorgehen bei der Auswertung stochastischer Prozesse. Abschließend werden Messungen am Kirchturm beschrieben.

Abstract

This master thesis deals with a geodetic engineer monitoring of the Marienkirche in Neubrandenburg. It is to be investigated if the church steeple moves by ringing the church bells. To examine the movement different geodetic devices will be tested. These devices are tachymeters, inclinometers and accelerometers.

The first topic of this master thesis is the description of the Marienkirche in Neubrandenburg. After that, the basics of geodetic monitoring will be communicated. Following the measuring instruments will be explained and different tests with them will be described. Then the stochastic processes will be treated in a theoretical and practical way. At the end different measurements in the church will be explained.

Schlagwörter:

Marienkirche Neubrandenburg, Monitoring, Ingenieurgeodäsie, Tachymeter, Neigungssensor, Beschleunigungssensor, Stochastischer Prozess, Matlab, Datentransfer, DaBaMoS

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	1
Vorwort	2
Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
1. Einleitung	6
1.1 Motivation.....	7
2. Die Marienkirche Neubrandenburg	8
2.1 Historie der Neubrandenburger Marienkirche.....	8
2.2 Architektur der Marienkirche Neubrandenburgs.....	10
2.3 Der Kirchturm und die fünf Glocken.....	11
3. Monitoring	14
3.1 Bewegungs- und Deformationserscheinungen.....	15
3.2 Methoden zur Überprüfung aus der Vermessung und der Messtechnik.....	19
3.3 Vorüberlegung zur Bewegungsdetektion der Marienkirche.....	20
3.4 Messinstrumente und Sensoren.....	22
3.4.1 Das Tachymeter.....	22
3.4.2 Der Neigungssensor.....	26
3.4.3 Der Beschleunigungssensor.....	31
3.5 Kommunikation und Datentransfer.....	34
3.5.1 RS-232.....	34
3.5.2 USB.....	35
3.5.3 Ethernet.....	35
3.5.4 WLAN.....	36
3.5.5 Richt - WLAN.....	37
3.5.6 Free Space Optics.....	37
3.5.7 Mobiles Internet.....	37
3.5.8 Bluetooth.....	38
4. Untersuchung der Messinstrumente	39
4.1 Tachymeter.....	39
4.1.1 Vorüberlegung.....	39
4.1.2 Testmessungen und Auswertung.....	41
4.1.3 Fazit zu den Tachymetern.....	56
4.2 Neigungssensoren.....	57
4.2.1 Vorüberlegung.....	57
4.2.2 Testmessungen und Auswertung.....	59
4.2.3 Fazit zu den Neigungssensoren.....	71
4.3 Beschleunigungssensoren.....	72
4.3.1 Vorüberlegung.....	72
4.3.2 Testmessungen und Auswertung.....	74
4.3.3 Fazit zu den Beschleunigungssensoren.....	86
5. Analyse von Zeitreihen	87
5.1 Theoretische Prozessanalyse.....	87
5.2 Nyquist-Kriterium.....	92
5.3 Umsetzung der Signalanalyse mit Matlab.....	93
5.3.1 Einlesen der erzeugten Messdaten.....	93
5.3.2 Erzeugen einer Zeitreihe.....	95

5.3.3 Erzeugen der Stationarität.....	96
5.3.4 Erzeugen des Powerspektrums.....	96
5.3.5 Plotten der Daten.....	98
6. Probeläuten der Kirchenglocken.....	100
6.1 Vorbereitung.....	100
6.2 Messablauf während des Probeläutens.....	102
6.2.1 Tachymetrische Messung.....	102
6.2.2 Neigungsmessung.....	103
6.3 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.....	104
6.3.1 tachymetrische Messung.....	104
6.3.2 Neigungsmessung.....	114
6.3.3 Berechnung der seitlichen Auslenkung als Klothoide.....	121
7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring.....	124
7.2 Auswahl der Standorte.....	124
7.2 Die Konsolen der Messstationen.....	126
7.3 DaBaMoS – Messclient.....	127
7.4 Dauermessung eines Neigungssensors.....	128
7.5 Schwingungsmessung mit Beschleunigungssensoren.....	134
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	140
9. Abbildungsverzeichnis.....	143
10. Tabellenverzeichnis.....	146
11. Quellenverzeichnis.....	147

1. Einleitung

Gebäude, Bauwerke und bauliche Anlagen sind schon immer Bestandteil unseres Lebens. Je nach Anforderung und Funktion werden Bauwerke unterschiedlich betrachtet. So sind gewöhnliche Wohngebäude weniger aufwendig und komplex wie bspw. eine Brücke oder ein Tunnel. Diese sogenannten Ingenieurbauwerke sind in ihrer Komplexität kaum noch zu überschauen. Neben ihrem Design müssen auch andere Aspekte mit berücksichtigt werden. Dazu zählen Anforderungen wie eine ästhetische Außenwirkung, Energieeffizienz und die Kosten bei der Planung und Umsetzung des Bauvorhabens. Hinzu kommen diverse physikalische Eigenschaften wie Druckfestigkeit, Durchhang, Torsion, Schwankungen und damit verbunden eine gewisse Langlebigkeit. Um diese Eigenschaften zu untersuchen und die Gebäudeinformationen diesbezüglich aktuell zu halten, wird das sogenannte Monitoring eingesetzt. Dazu werden verschiedenste Instrumente aus dem vermessungstechnischen Bereich, aber auch spezielle Sensoren aus der Geo- oder Messtechnik eingesetzt. Die damit erzeugten Messwerte geben Informationen über den Zustand des Bauwerkes. Erreicht dieser Zustand ein kritisches oder sogar bedrohliches Ausmaß, werden Maßnahmen zum Schutz des Objektes und seiner Umgebung eingeleitet.



*Abbildung 1: Kirchturm der Marienkirche
Neubrandenburg*

1.1 Motivation

Die Kirche St. Marien im Zentrum Neubrandenburgs gilt seit über 700 Jahren als Wahrzeichen der Stadt. Im Jahre 2007 sorgte eine große Spendenaktion dafür, dass die Kirche einen neuen Glockenstuhl mit fünf neuen Glocken bekam. Während des Glockenspiels an Hochfeiertagen sind Schwingungen im Kirchturm zu spüren, die durch das Pendeln der Glocken ausgelöst werden sollen. Um festzustellen, ob messbare Schwingungen existieren und um welchen Betrag sich der Kirchturm bewegt, wurden durch die Hochschule Neubrandenburg zwei geodätische Prismen am Kirchturm befestigt. Diese Prismen können vom Boden aus mit vermessungstechnischen Instrumenten beobachtet werden.

Diese ersten Schritte des Gebäudemonitorings an der Marienkirche sollen im Zuge dieser Masterarbeit aufgenommen und erweitert werden. Dazu werden verschiedene Sensoren auf ihre Eigenschaften im Monitoringbetrieb untersucht und festgestellt, ob sie für den Einsatz in und an der Marienkirche geeignet sind.

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

Die Marienkirche Neubrandenburg gehört zu den bedeutendsten Gebäuden der Backsteingotik Norddeutschlands. Sie ist mittlerweile über 700 Jahre alt. Das Bauwerk mit seinem 90 Meter hohen Turm steht im Zentrum Neubrandenburgs. Nach mehreren Zerstörungen durch Kriegsgeschehen, Brände und Natureinwirkung wurde die Marienkirche wieder aufgebaut und restauriert und dient nun als Baudenkmal, Kulturstätte und Konzerthalle.

2.1 Historie der Neubrandenburger Marienkirche

Im Jahre 1248 gründete der Markgraf Johann I. von Brandenburg die Stadt Neubrandenburg. Am 04. Januar des selben Jahres beauftragte er seinen Getreuen Herbord von Raven damit eine Pfarrkirche errichten zu lassen. Der damalige Bau bestand aus einem Feldsteinfundament, welches eine Holzkonstruktion trug. Etwa 1270 wurde der Holzbau durch ein Gebäude aus Granitblöcken ersetzt. Eine weitere Umgestaltung sorgte dafür, dass die Pfarrkirche letztendlich aus Backstein gefertigt wurde. Das Bauwerk wurde im Jahre 1298 fertig gestellt und erhielt am 31. August 1298 seine feierliche Weihe durch den Bischof von Havelberg. Da die Weihe zu Ehren der Jungfrau Maria durchgeführt wurde, erhielt die Pfarrkirche den Namen Marienkirche. Dem erst erbauten Kirchenschiff folgte der Kirchturm in der Mitte des 14. Jahrhunderts.

1591 wütete ein starker Sturm über der Stadt Neubrandenburg. Dieser sorgte dafür, dass die Turmspitze der Marienkirche herunterstürzte. Im Jahre 1614 richtete eine Stadtbrand enorme Schäden in Neubrandenburg an. Erneut wurde die Marienkirche beschädigt. Einige Jahre später wurde die Kirche von einem Blitz getroffen. Der Einschlag zerstörte die Kirchturmuhre und das Geläut. Die Stadt Neubrandenburg musste im Jahre 1655 durch die Folgen des 30-jährigen Krieges Konkurs anmelden. 1676 folgte erneut ein großer Stadtbrand bei dem nur wenige Häuser verschont wurden. Von dem Brand beschädigt, stürzte der Kirchturm auf das Kirchenschiff und zerstörte das Mittelschiffsgewölbe. Auf Grund der Geldknappheit der Stadt Neubrandenburg konnte das Dach nur notdürftig mit Brettern geschlossen werden.

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

Eine Spendenaktion des Herzogs Adolph Friedrich sorgte dafür, dass 1754 ein Neubau der Orgel realisiert werden konnte. In den Jahren 1832 – 41 wurde die Kirche, unter der Leitung des Schinkelschülers Friedrich Wilhelm Büttel, wieder aufgebaut. Im August 1841 wurde die Marienkirche feierlich eingeweiht. Am 29./30. April 1945 wurde die Stadt Neubrandenburg fast vollständig zerstört. Grund war ein Stadtbrand, ausgelöst durch Brandschatzung der Roten Armee. Dabei wurden 80,4% des Stadtgebietes vernichtet. Die Marienkirche brannte vollständig aus und stand seitdem viele Jahre als Kirchenruine im Zentrum Neubrandenburgs (ABB 2).



Abbildung 2: Kirchenruine 1975

[bricks.eurob.org]

Da die Ruine der Marienkirche als einsturzgefährdet eingestuft wurde, bestand ein Konflikt zwischen Neuaufbau oder Abriss. Mit der Auflage eine Konzerthalle und ein Kunstmuseum zu gestalten, ging die Kirchenruine per Kaufvertrag am 04. November 1975 an die Stadt Neubrandenburg über. Beteiligte an diesem Vertrag waren die Evangelisch- Lutherische Landeskirche Mecklenburgs, die Stadt und der Bezirk Neubrandenburg. Ein Jahr später wurden die Arbeiten für den Wiederaufbau aufgenommen. Im Jahre 1979 wurde die Marienkirche zum Baudenkmal erklärt. Sie gilt als Leitbau des gotischen Backsteinbaus mit besonderer nationaler und internationaler Bedeutung.

Nach einer Ausschreibung für die Gestaltung des Innenausbaus und die Umgestaltung zum Konzertsaal bekam der Neubrandenburger Architekt Josef Walter den Zuspruch für dieses Projekt. Er überzeugte mit seinem Konzept des Ausbaus der Kirche als Konzerthalle und Kunstgalerie. Diese Pläne wurden nach der Wiedervereinigung Deutschlands 1990 vom Bauministerium des Landes verworfen und eine erneute, internationale Ausschreibung fand statt. Der Gewinner des Wettbewerbs zur Umgestaltung des Konzertsaals war der finnische Architekt Professor Pekka Salminen. Ab dem Jahre

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

1997 fanden Baustellenkonzerte statt um den Wiederaufbau der Kirche und den Umbau zur Konzerthalle zu finanzieren. Am 13. Juli 2001 fand ein feierliches Eröffnungskonzert der Marienkirche Neubrandenburg statt. Ein Jahr später wurde der neu gestaltete Kirchplatz übergeben. Im September 2002 wurde einer Dauerausstellung im Kirchturm eröffnet. Sie trägt den Titel „Wege zur Backsteingotik - In Neubrandenburg zur Wehr und Zier“. Die Errichtung eines neuen Glockenstuhls und die Anbringung von fünf Glocken fand im Jahre 2007 statt. Am 24. Juni des selben Jahres wurden die Glocken feierlich geweiht.

[konzertkirche-nb.de], [neubrandenburg.de], [mv-trip.de], [Buller; Wotin, 2001]

2.2 Architektur der Marienkirche Neubrandenburgs

Bis zu ihrer Zerstörung nach dem zweiten Weltkrieg war die Marienkirche eine langgestreckte Hallenkirche mit neun Jochen und drei Kirchenschiffen. Sie wurde im gotischen Stil und aus Backstein gefertigt. Der 90 Meter hohe Kirchturm befindet sich im Westen des Gebäudes. Im Unterbau des Turms erinnern alte Feldsteine an den früheren Bau des 13. Jahrhunderts. Der Rest der Kirche wurde zu Beginn des 13. Jh. aus Backstein errichtet. Im Osten wird die Kirche von einer prunkvoll verzierten Fassade begrenzt. Die Strebepfeiler dieser Schaufassade spiegeln die damalige Einteilung der Kirche in drei Kirchenschiffe wieder. Der Innenraum besteht aus einem breiten Mittelschiff, welches von zwei halb so breiten Seitenschiffen begrenzt ist. Der künstlerisch gestaltete Ostgiebel gilt als einer der wertvollsten Giebel der norddeutschen Backsteingotik. Die fünf Fialtürme teilen das Giebeldreieck in vier Abschnitte. Die beiden äußeren Teile sind mit jeweils einem Fenster versehen, die inneren mit zwei Fenstern. Die typisch gotischen, spitz zulaufenden Fenster sind mit Maßwerken in den Wimpergen verziert (ABB 3).

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

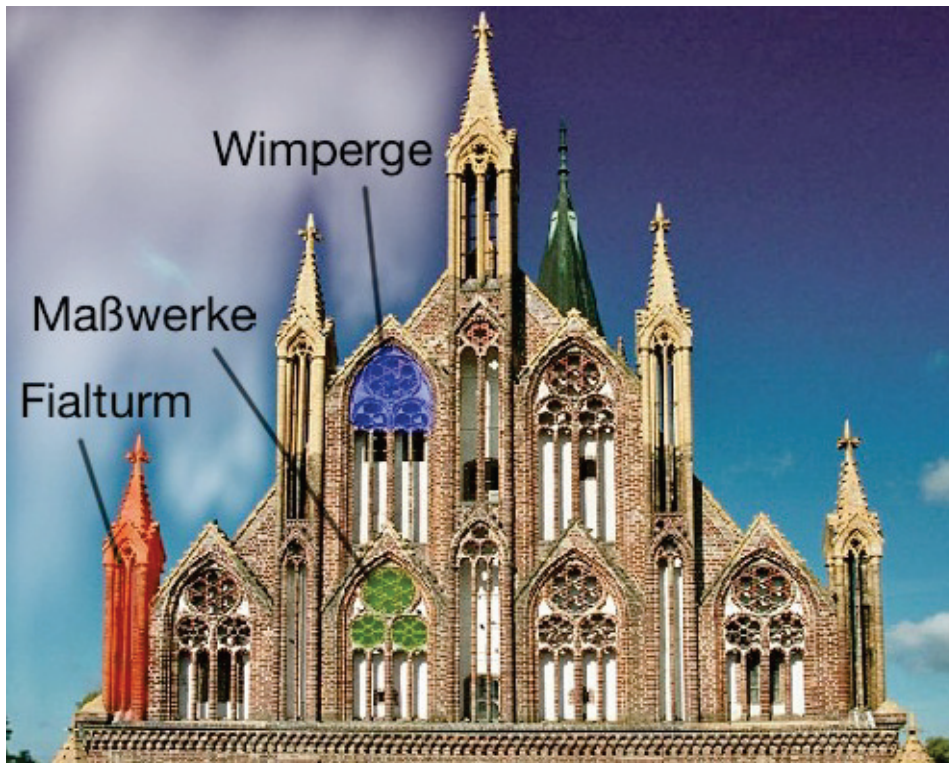


Abbildung 3: Ostgiebel der Marienkirche

[seenplatte-entdecken.de]

Nach der Zerstörung durch den zweiten Weltkrieg wurde die Marienkirche wieder aufgebaut. Der Ostgiebel und der Kirchturm wurden rekonstruiert. Nach vielen Diskussionen erhielt der Turm wieder ein Spitzdach aus Kupfer. Die Kirche sollte damit den HKB - Turm überragen und wieder das höchste Gebäude der Stadt Neubrandenburg werden.

Der Innenraum der Kirche wurde umgestaltet und zu einem Konzertsaal umfunktioniert. Die neu gestaltete Konzerthalle besteht aus modernsten Architekturelementen. Mit ihrer Konstruktion aus Beton, Holz und Glas wirkt sie wie eingesetzt in das alte Backsteingemäuer.

[bricks.eurob.org], [konzertkirche-nb.de]

2.3 Der Kirchturm und die fünf Glocken

Der Kirchturm im Westen der Marienkirche erhebt sich als viereckiger Backsteinturm aus der 4,7 Meter starken Westwand. Dieser quadratische Grundriss wird bis zu einer Höhe

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

von 45 Metern fortgesetzt. Jede der vier Fassaden ist mit je drei gotischen Fenstern versehen. Wobei die Wimperge der Mittleren Fenster mit jeweils einer Turmuhr ausgestattet sind. Den Abschluss des viereckigen Turmabschnittes bilden vier Fialtürme in den jeweiligen Ecken. Ab einer Höhe von 45 Metern beginnt ein achteckiger Abschnitt des Kirchturms, dessen Seiten mit aufwendigen Maßwerken verziert sind. Darüber befindet sich das Spitzdach der Marienkirche. Der Innenausbau des Kirchturms besteht größtenteils aus einem Betonkern. Im Foyer der Kirche befinden sich zwei Fahrstühle, die die Besucher bis an das obere Ende der Westwand führen. Von dort führt eine Rundtreppe durch den Kirchturm. Hinter den Turmuhren in einer Höhe von 35 Metern befindet sich der Glockenstuhl mit seinen fünf Glocken. Oberhalb des Glockenstuhls befindet sich das Ende des viereckigen Turms und der Beginn des Oktogons. Im Oktogon sind acht synchronisierte Beamer an den Wänden angebracht, die den Besuchern Filmsequenzen des historischen Neubrandenburgs präsentieren. Über zwei Ausgänge kann dieser Bereich verlassen und dadurch die Aussichtsplattform betreten werden.

Die Glocken im Westturm der Marienkirche waren mehreren Zerstörungen, Erneuerungen und Restaurationen unterzogen. Sie wurden im Jahre 1655 durch einen Blitzschlag zerstört. Danach folgten Brände, ein Turmeinsturz und eine Entwendung im Jahre 1917. Am Ende des ersten Weltkrieges befand sich lediglich eine Glocke im Glockenstuhl der Marienkirche. 1922 wurden drei neue Stahlglocken ergänzt. Der große Stadtbrand am Ende des zweiten Weltkrieges sorgte dafür, dass der Kirchturm und mit ihm die Kirchenglocken vernichtet wurden. Im Jahre 1956 wurden die Glocken notdürftig überarbeitet und in einem stählernen Glockenstuhl aufgehängt. Eine große Spendenaktion unter dem Titel „5 Glocken für Neubrandenburg“ brachte im Jahre 2006 genügend Gelder ein um einen neuen hölzernen Glockenstuhl zu errichten und ihn mit fünf bronzenen Glocken zu bestücken (ABB 4). Im Zuge dieser Erneuerung wurde der Umgang um das Oktogon geschaffen und für Besucher als Aussichtsplattform zugänglich gemacht.

Die heutigen Glocken:

2. Die Marienkirche Neubrandenburg

Name	Durchmesser [mm]	Gewicht [kg]	Schlagton
Lob- und Dankglocke	894	538	h'
Sakramentsglocke	984	702	a'
Gebetsglocke	1045	828	gis'
Johannesglocke (Sonntagsglocke)	1322	1695	e'
Marienglocke	1710	3363	h°

Tabelle 1: Die fünf Glocken der Marienkirche

Die Glocken können unterschiedlich angeschlagen werden. Eine Möglichkeit ist das Hammerwerk an jeder Glocke, welches einen Schlagimpuls ausübt. Die andere Möglichkeit besteht darin, die Glocke zum Pendeln zu bringen. Dabei schwingt der Klöppel und stößt an den Schlagring der Glocke.

[konzertkirche-nb.de]



Abbildung 4: Glockenstuhl mit den fünf Glocken

[konzertkirche-nb.de]

3. Monitoring

Jedes Bauwerk durchläuft stets einen gewissen Alterungsprozess. Im Laufe der Zeit verändern sich die chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Baumaterialien und wirken sich somit auf das Gesamtbauwerk aus. Dieser Prozess wird durch Wettereinflüsse zusätzlich beschleunigt.

Veranschaulichen lässt sich dies am Beispiel einer Straße. Durch Temperaturschwankungen während des gesamten Jahres dehnt sich das Material aus und zieht sich auch wieder zusammen. Diese periodischen Spannungen sind aber nicht ohne Folgen. Es entstehen Mikrorisse in der Oberfläche in denen sich Feuchtigkeit sammelt. Diese Feuchtigkeit ist ebenfalls von der Witterung beeinflusst. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes erstarrt das eingelagerte Wasser zu Eis. Bei der Änderung des Aggregatzustandes vergrößert sich das Volumen des Eises. Diese Volumenänderungen wirken sich auch auf den Straßenbelag aus. Das gesammelte Wasser bringt die Oberfläche der Straße zum aufplatzen.

Ein anderer bedeutender Einfluss für die Veränderung von Bauwerkseigenschaften sind Wind und Sonneneinstrahlung. Je nach Höhe und Oberfläche eines Gebäudes kann es durch stetigen Wind, Böen aber auch anderen Impulsen in Schwingungen versetzt werden. Die Sonne sorgt für eine einseitige Erwärmung des Gebäudes. Durch die Temperaturunterschiede auf Sonnen- und Schattenseite dehnen sich die Bausubstanzen unterschiedlich aus. So kann bei hohen Gebäuden mit kreisrundem Schaft, wie z.B. Fernsehturm in Berlin eine Taumelbewegung bestimmt werden.

Um solche und weitere Phänomene schon während des Baus und auch lange nach ihrer Fertigstellung zu beurteilen, kann sich der Ingenieur verschiedenster messtechnischer Verfahren bedienen. Während der Erschaffung solcher Ingenieurbauwerke werden die Arbeiten als baubegleitende Vermessung bezeichnet. Ist das Gebäude oder die Anlage fertiggestellt, werden nachfolgende Messungen als Monitoring betitelt.

Die wesentlichen Aufgaben des Monitorings sind: „

- Beitrag zum Nachweis der Stand- und Funktionssicherheit des überwachten Objekts, Beitrag zur Gewährleistung eines störungsfreien Betriebes einer Anlage;

3. Monitoring

- rechtzeitiges Erfassen von Veränderungen („Frühwarnung“), um Gefährdungen für das Objekt sowie für die Umgebung zu vermeiden oder wenigstens zu mindern;
- Beweissicherung zur Schadensdokumentation und zur Klärung der Ursachen von Schäden;
- Möglichkeit zur Prognose des mutmaßlichen Verhaltens in der näheren Zukunft und des Verhaltens unter bestimmten Belastungsfällen;
- Überprüfung von Konstruktions- und Materialeigenschaften mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Modellvorstellungen über das Objekt und sein Verhalten – hieraus folgt die Möglichkeit einer verbesserten Prognose;
- (Wissenschaftlicher) Erkenntnisgewinn für vergleichbare Objekte, insbesondere im Hinblick auf Planung ähnlicher Bauwerke und für Sanierungen.“

[Heunecke; et al., 2013]

Die Vorgehensweise ist daher wie folgt. Es geht darum einen aktuellen Zustand zu erfassen, ihn mit vergangenen zu vergleichen und evtl. Vorhersagen zu treffen. Dazu wird zunächst eine Epoche 0 („Null“) bestimmt, die frei von Einflüssen und Änderungsprozessen ist. Meist wird diese Epoche nach Fertigstellung des Baus angelegt. Diese gilt dann als Referenz für folgende Epochen. Die einzelnen Epochen können relativ zur ersten betrachtet werden, oder aber zu einer anderen. Dies wird beispielsweise bei Rutschhängen oder bei Gletscherbewegungen angewendet. Oftmals müssen Veränderungen nicht in ihrer Gesamtheit betrachtet werden, sondern lediglich die neue Veränderung nach einem letzten Ereignis. Bei Hängen könnte das ein Extremereignis bspw. eine Sturmflut sein, bei Gletschern ein Hitzemonat.

3.1 Bewegungs- und Deformationserscheinungen

Jede Veränderung, egal wie komplex, kann so auf einfache geometrische Bewegungen zurückgeführt werden. Diese können sich aus Translationen, Rotationen und Skalierungen zusammensetzen. Was bei großen und massiven Ingenieurbauwerken sofort ins Auge fällt, ist eine Translation in Z-Richtung, eine sogenannte Setzung. Der Boden unter dem

3. Monitoring

Bauwerk wird, durch die auf ihm liegende Last, verdichtet und ändert somit sein Volumen. Die Folge ist eine Absenkung des Bauwerks. Je nach Last des Bauwerks und der Bodenbeschaffenheit kann die Setzung räumlich und zeitlich verschieden sein. Ist der Untergrund, wie in *Abbildung 5* unregelmäßig verdichtet, kann die Setzung zu einer Schiefstellung des Bauwerkes führen. Die verschiedenen Untergrundsubstanzen führen auch zu verschiedenen Speichermöglichkeiten für Grundwasser. Dies kann die Verdichtung und damit die Setzung verlangsamen oder beschleunigen. Um die örtliche Tragfähigkeit des Bodens zu untersuchen, wurde 1941 in Berlin Tempelhof ein „Schwerbelastungskörper“ errichtet. Dieser 12.650 Tonnen schwere Betonzylinder sollte den Druck und die Belastung eines geplanten Bauwerkes simulieren. Messungen ergaben, dass sich der „Schwerbelastungskörper“ in den ersten 2,5 Jahren um 19,3 cm gesetzt hatte.

[berliner-unterwelten.de]

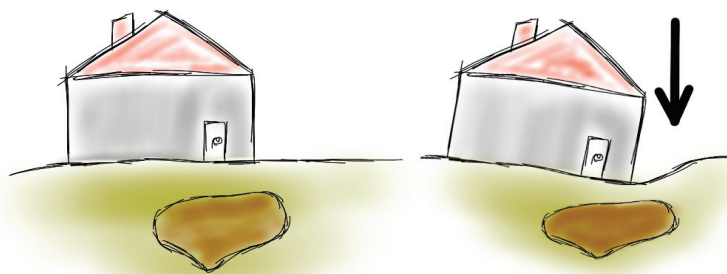


Abbildung 5: Setzung

Neben der Translation in Z-Richtung, welche eine Verschiebung in der Höhe zur Folge hat, können auch Bewegungen in X- und Y-Richtung auftreten. Diese sind beispielsweise bei Talsperren oder Staumauern zu beobachten. Diese massiven Bauwerke werden benötigt um eine gewünschte Wasserversorgung für Mensch und Natur zu regulieren. Dabei wird eine Wassermenge in einem Staubecken oder einem Stausee aufgehalten und kann dosiert freigesetzt werden. Die Füllmenge im Staubecken wirkt auf die Staumauer. Je höher der Wasserstand im Staubecken, desto mehr Masse drückt gegen das Bauwerk. Dies hat eine gewisse Translation zur Folge. *Abbildung 6* zeigt eine Gewichtsstaumauer. Ein keilförmiger Querschnitt zeichnet diesen Bautyp aus. Die Wassermassen werden lediglich durch das Gewicht des Bauwerks aufgehalten. Eine Krümmung ist nicht vorgesehen, sodass die Kräfte der Wassermasse nicht abgeleitet werden, sondern senkrecht auf der Staumauer wirken.

[talsperren.net]

3. Monitoring

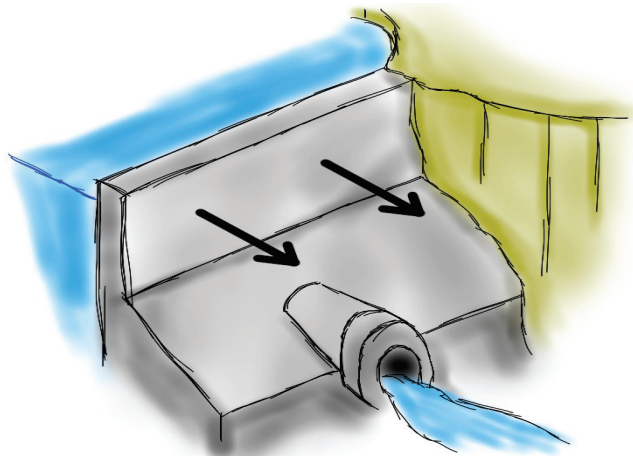


Abbildung 6: Translation einer Talsperre

Der über 300 Meter hohe Cayan Tower im Hafen Dubais ist ein Beispiel für eine Verdrehung um die Z-Achse. Allerdings ist diese Torsion beabsichtigt. Der Wolkenkratzer hat eine viereckige Grundfläche und ist in seiner Gesamthöhe von 306 Metern um 90° im Uhrzeigersinn verdreht. Durch die Schwerkraft und das Eigengewicht des Gebäudes kann diese Verdrehung verstärkt werden. Dies wird als sekundärer Twist bezeichnet (ABB 7). Um das Gebäude vor Materialschäden durch diesen ungewollte Verdrehung zu schützen, wurde die innere Stützkonstruktion modifiziert.

[architectmagazine.com]

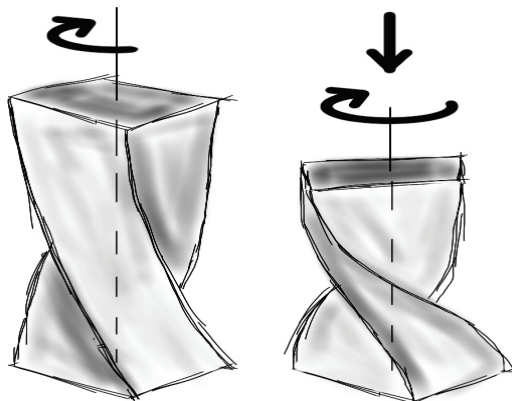


Abbildung 7: Rotation um die Stehachse

Eine weitere Verdrehung, um eine horizontal verlaufende Achse, ist durch den Windeinfluss auf Brücken bekannt. Bei der Tacoma-Narrows-Brücke, in den USA, führte diese Verdrehung sogar zum Einsturz. Am 07.11.1940 wirkte ein Starkwind auf die Brücke und versetzte diese in eine Torsionsschwingung. Der kontinuierliche Wind verstärkte dabei

3. Monitoring

die Eigenfrequenz der Brücke. Sie verdrehte sich um ihre Längsachse, entlang der Fahrbahn (ABB 8). Als die Verdrehung zu stark wurde, versagte das Material und die Brücke wurde zerstört.

[bernd-nebel.de]

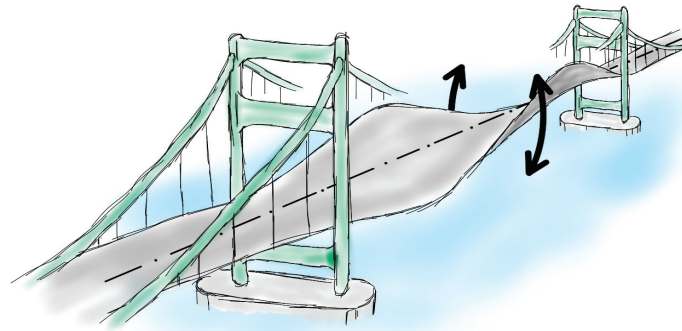


Abbildung 8: Torsion um die Längsachse der Tacoma Narrows Brücke

Die letzte Grundbewegung ist die Skalierung. Ähnlich wie bei der Setzung kommt es hierbei zu einer Kompression oder Dehnung der verwendeten Materialien und somit zur Längenänderung. Gründe dafür sind Druck, Zug oder Temperaturänderungen. Auf Tunnelröhren wirkt ein großer Druck durch die darüber befindliche Erdschicht. Dabei kann sich der Tunnelquerschnitt verkleinern (ABB 9). Ein weiteres Beispiel sind Brücken. Durch Temperatureinflüsse dehnt sich das Material aus oder zieht sich zusammen. Aus diesem Grund werden Widerlager an einer Brückenseite verbaut. Diese Widerlager geben der Brücke Platz um die Längenänderungen zu kompensieren.

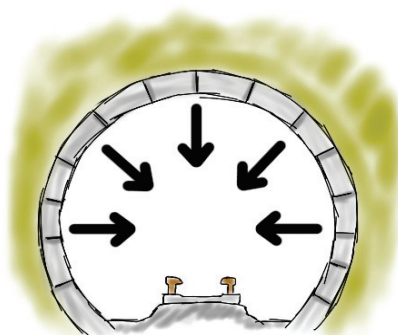


Abbildung 9: Skalierung eines Tunnelquerschnittes

So können alle erdenklichen Bewegungen, die auf Bauwerke wirken, auf diese Grundbewegungen zurückgeführt werden. Da die Einflüsse auf die Bauwerke oft sehr

3. Monitoring

komplex sind und verschiedene Einflüsse sich überlagern, ergibt sich die Gesamtbewegung aus einer Kombination der Grundbewegungen.

3.2 Methoden zur Überprüfung aus der Vermessung und der Messtechnik

Ebenso komplex wie die Messaufgaben, sind auch die verfügbaren Messinstrumente und die damit verbundenen Messmethoden. Je nach Einsatzgebiet, Größe des Messobjektes und der geforderten Genauigkeit kann zwischen unterschiedlichen Verfahren gewählt werden. In landwirtschaftlichen Bereichen kann es gefordert sein, dass flächenmäßige Veränderungen in einem Gebiet aufgedeckt werden sollen. Dazu ist die Messung mit einem Global Positioning System (GPS) oder sogar die Fernerkundung von Vorteil. Allerdings sind mit dieser Methode nur Genauigkeiten möglich, die einige Meter betragen. Für die geforderten Aufgaben reichen diese Genauigkeiten allerdings aus. Ist eine höhere Genauigkeit gefordert, wird auf das differenzielle GPS oder sogar auf die Tachymetrie zurückgegriffen. Um dann solch große Gebiete zu vermessen, muss der betriebene Aufwand dementsprechend höher sein. Sind die Messobjekte von kleinerem Ausmaß, so müssen die Messinstrumente und die Messmethoden angepasst werden.

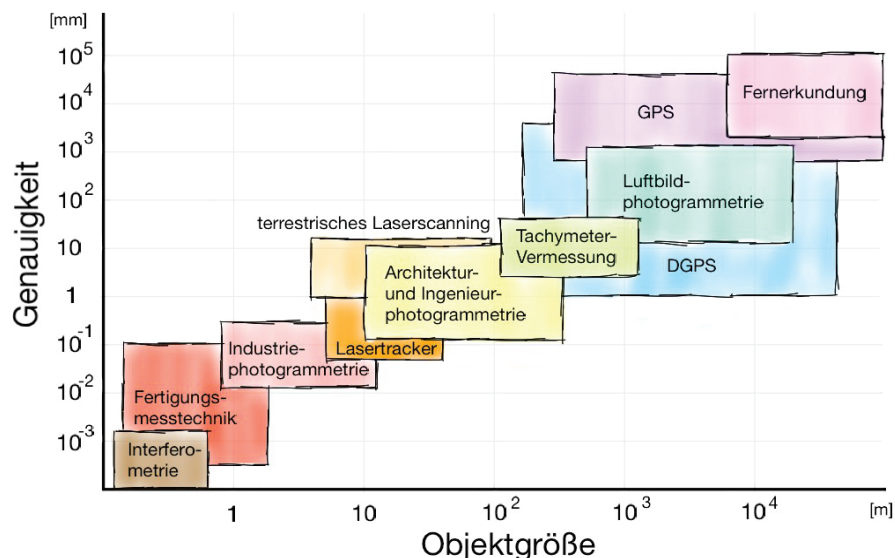


Abbildung 10: Messverfahren und deren Genauigkeiten

[Luhmann, 2010]

Im industriellen Bereich werden oft Bauteile oder Baugruppen nach einer vorher

3. Monitoring

festgelegten Vorgabe gefertigt. Im Anschluss werden diese Bauteile vermessen und einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen. Bei diesem sogenannten Prototyping und Reverse-Engineering sind oft Genauigkeiten von unter einem Millimeter gefordert. Dies ist mit GPS nicht zu erreichen. Dafür werden spezielle Messanlagen unter Laborbedingungen eingerichtet. Um diese geforderten Genauigkeiten erreichen zu können wird eine Koordinatenmessmaschine oder ein Messarm eingesetzt. Diese Messinstrumente liefern Genauigkeiten von wenigen Zehntel Millimetern. Sie sind allerdings auf einen Arbeitsbereich von ca. einem Meter beschränkt. *Abbildung 10* zeigt eine schematische Auflistung der Messmethoden und -instrumente, je nach Objektgröße und möglicher Genauigkeit.

Beim Monitoring ist es wichtig, sich der Methodik zu bedienen, die die zu erwartende Bewegung detektieren kann. Dabei sind die Größe und die Genauigkeit zu beachten. Hierbei beziehen sich diese Parameter auf die erwartete Bewegung, die zu untersuchen ist. Ist die erwartete Bewegung nur sehr klein, muss sie daher sehr genau bestimmt werden. Die Wahl des Messinstrumentes muss dementsprechend ausfallen. Eine Translation kann sowohl mit einem satellitengestützten Messsystem, aber auch mit einem Dehnungsmessstreifen untersucht werden. Die Satellitenmessung ist für einen große Translation bis zu vielen Metern geeignet, leistet aber nur eine Genauigkeit im Zentimeterbereich. Der Dehnungsmessstreifen hat nur einen Arbeitsbereich von wenigen Zentimetern, liefert aber eine Auflösung unterhalb eines Millimeters. Eine weitere Rolle spielt die Art der Bewegung. Soll bspw. eine Rotation um eine bestimmte Achse nachgewiesen werden, ist es manchmal von Nachteil ein Längenmessgerät einzusetzen, da die geforderte Messgröße nur über Umwege zu erreichen ist.

3.3 Vorüberlegung zur Bewegungsdetektion der Marienkirche

Bei einer geodätischen Überwachungsmessung bzw. Monitoring müssen einige Vorüberlegungen getroffen werden: „

- die Ursache der erwarteten Deformationen und ihre Variationen;
- die Ausdehnung des durch Deformationen mutmaßlich beeinflussten Bereichs;
- Betrag und Richtung der zu erwartenden Veränderungen der Objektgeometrie;
- den voraussichtlichen zeitlichen Ablauf der Veränderung;

3. Monitoring

- wichtige Randbedingungen (Zugänglichkeit des Objektes, äußere Einflüsse wie Vibrationen, Wärmeabstrahlung);
- die Form der Bereitstellung der Ergebnisse;
- den vertretbaren Aufwand und den Kostenrahmen.“

[Heunecke; et al., 2013]

Bei der Marienkirche Neubrandenburg handelt es sich um eine Bewegung des 90 Meter hohen Kirchturms. Dieser soll auf Grund des Glockenspiels in eine periodische Schwingung versetzt werden. Die Bewegung wird in einem Betrag von wenigen Zentimetern in Schwingungsrichtung der Glocken erwartet. Um diese Bewegung festzustellen, werden verschiedene Messinstrumente und Sensoren eingesetzt. Einige davon sollen für eine spätere Dauermessung vorbereitet werden.

Um die ersten Erkenntnisse der Bewegungsgröße und der Bewegungsrichtung zu untersuchen, wurden zwei geodätische Prismen an der nördlichen und westlichen Fassade der Marienkirche installiert. Diese befinden sich in einer Höhe von ca. 56m, knapp unterhalb des Spitzdaches des Kirchturms (*ABB 11*). Diese beiden Prismen können von Bodenstandpunkten aus mit einem Tachymeter erfasst werden. Mit einer Treckingmessung von zwei Tachymetern auf jeweils ein Prisma sollen eine vermutete, periodische Schwingung während des Glockenspiels erfasst werden. Die veränderten Koordinaten der Prismen spiegeln dann die Bewegung und den Ausschlag des Kirchturms wieder.

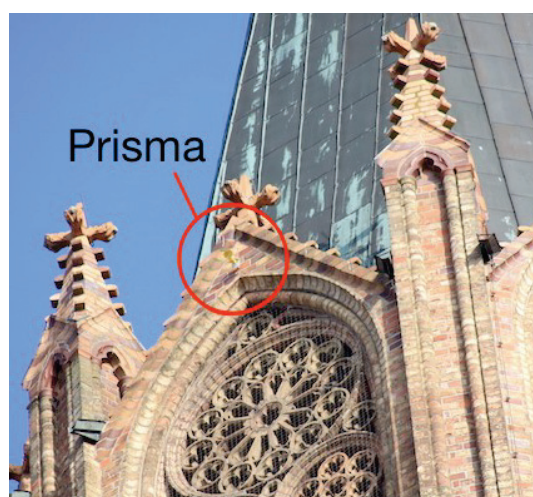


Abbildung 11: Geodätisches Prisma an der Marienkirche

3. Monitoring

Eine weitere Methode zur Überprüfung dieser Schwingung ist der Einsatz von Neigungssensoren. Dabei werden LEICA Nivel 210 Sensoren verwendet. Diese sollen in verschiedenen Höhen des Kirchturms angebracht werden und während des Glockenspiels eine Neigung aufzeichnen. Durch das Neigungsverhalten in den unterschiedlichen Etagen soll eine Aussage über das Bewegungsverhalten des Turms getroffen werden können. Um einen gewissen Kostenrahmen nicht zu übersteigen, werden weitere Low-Cost-Neigungssensoren überprüft, ob sie den Anforderungen einer solchen Überwachungsmessung genügen.

Für die Aufzeichnung einer Schwingbewegung in der Marienkirche können ebenfalls Schwingungssensoren eingesetzt werden. Diese sollen die Impulse durch die Glocken aufzeichnen und Aufschluss über die Auswirkung auf das Gebäude liefern. Diesbezüglich ist eine Verwendung von modernen Smartphones vorgesehen. Der Stand der Technik macht es möglich mit den verbauten Sensoren ebenfalls Schwingungen oder sogar Neigungen zu messen.

3.4 Messinstrumente und Sensoren

3.4.1 Das Tachymeter

Das Tachymeter („Schnellmesser“) ist ein Messgerät zur Bestimmung von dreidimensionalen Koordinaten. Es ist das am häufigsten verwendete Messinstrument bei terrestrischen Messaufgaben. In Verbindung mit einem Stativ ist es nahezu überall einsetzbar. Die Aufgaben verteilen sich in den Gebieten der Landesvermessung, Katastermessung und im ingenieurgeodätischen Bereich. Es dient zur Vermessung von Topografie, Gebäuden, Industrieanlagen und noch vielem mehr. Dabei können Messpunkte dreidimensional erfasst, oder bereits berechnete Punkte in die Örtlichkeit übertragen werden.

Frühere Vermessungsaufgaben wurden mit einem optischen Theodoliten, zur Winkelmessung, und einer separaten Streckenmessung durchgeführt. Um damit eine hohe Präzision erreichen zu können, musste der Aufwand dementsprechend hoch sein. Auch heutzutage ist eine Streckenmessung, bspw. mit dem Messband anfällig für Messfehler. Beim Messen von langen Strecken kommt es vor, dass die Reichweite des Messbandes

3. Monitoring

nicht ausreicht und das Messband erneut angelegt werden muss. Das erneute Anlegen zieht Genauigkeitseinbußen mit sich. Durch die Trennung von Richtungs- und Streckenmessung ist der spätere Rechenaufwand umfangreich.

Heutige Tachymeter vereinen Richtungs- und Streckenmessung miteinander. Sie werden als elektrooptische Messinstrumente bezeichnet. Ausgehend vom Koordinatenursprung im Inneren des Messinstruments (X_0, Y_0, Z_0) , werden neue Messpunkte mit Hilfe des Polarverfahrens bestimmt. Die gemessene Horizontalrichtung H_z , der Vertikalwinkel V und die Schrägstrecke s dienen dabei als Grundlage für die Berechnung der Neupunktkoordinaten (X_N, Y_N, Z_N) . Dies geschieht mit den folgenden Formeln. Moderne Tachymeter besitzen eine Rechereinheit, mit der diese Koordinaten geräteintern berechnet werden können.

$$\begin{aligned}X_N &= X_0 + s \cdot \cos(\Delta H_z) \cdot \sin(\Delta V) \\Y_N &= Y_0 + s \cdot \sin(\Delta H_z) \cdot \sin(\Delta V) \\Z_N &= Z_0 + s \cdot \cos(\Delta V)\end{aligned}$$

Für die Richtungsmessung besitzt ein Tachymeter zwei Teilkreise, einen für die Horizontalrichtung und einen für den Vertikalwinkel. Das Tachymeter ist, um eine senkrechte Stehachse und um eine dazu rechtwinklig verlaufende Kippachse, drehbar gelagert. Die Teilkreise befinden sich jeweils an diesen Drehachsen um die aktuelle Winkelstellung zu messen. Zur Erfassung dieser Winkel gibt es verschiedene Teilkreise mit passenden Ableseeinrichtungen. Eine Möglichkeit besteht aus einem binär codierten Teilkreis. Jeder abgelesene Code entspricht einer bestimmten Winkelstellung. Eine andere Möglichkeit ist eine gleichbleibende schwarz-weiß Einteilung des Teilkreises. Während der Rotation um die betreffende Achse werden die hell-dunkel Unterschiede gezählt und somit ein Winkelunterschied zur vorherigen Stellung bestimmt. Dies wird als Inkrementalverfahren bezeichnet. Die Teilkreise bestehen meist aus einer Glasscheibe, in die die jeweilige Codierung geätzt ist. Je nach Größe des Teilkreises, der Ablesemethode und der Unterteilung der Codierung sind unterschiedliche Genauigkeiten möglich.

Die elektrooptische Streckenmessung wird mit einem ausgesendeten Lichtstrahl realisiert. Dabei werden zwei Verfahren unterschieden, die Laufzeitmessung und das Phasenvergleichsverfahren. Bei der Laufzeitmessung, auch „time of flight“ genannt, wird ein Lichtimpuls vom Tachymeter ausgesendet. Dieser Impuls durchläuft die Atmosphäre, trifft im Zielpunkt auf einen Reflektor, wird von dort zurückgeworfen und vom Tachymeter

3. Monitoring

wieder empfangen. Für diesen Vorgang wird die Zeit gemessen, die der Lichtimpuls für die Strecke benötigt. Mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit von 299 792 458 m/s wird die zurückgelegte Strecke berechnet. Das Phasenvergleichsverfahren, auch „continuous wave“ betitelt, arbeitet mit einer konstant ausgesendeten Lichtwelle. Diese Lichtwelle wird mit verschiedenen Frequenzen oder Amplituden aufmoduliert. Durch diese Aufmodulierung ergibt sich eine Zusammenstellung von verschiedenen Wellen auf einer Trägerwelle (ABB 12). Die einzelnen Wellen werden geräteintern erzeugt und ausgesendet. Wenn sie vom Reflektor zurückgeworfen und wieder empfangen werden, besitzen sie eine Phasenverschiebung zum ausgesendeten Messsignal. Durch das Zählen der vollen Wellenperioden und dem Wellenreststück wird eine Grobmessung möglich. Das phasenverschobene Reststück wird anschließend mit den feineren Wellen aufgelöst (ABB 13).

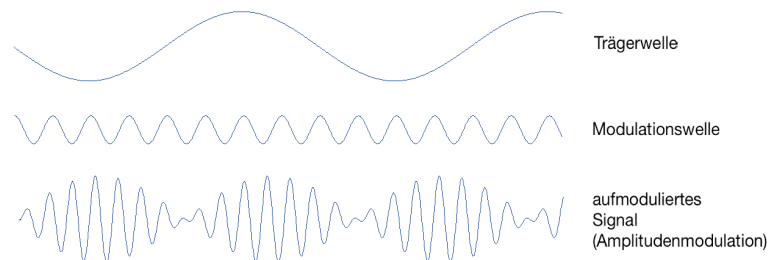


Abbildung 12: Aufmodulierung einer Trägerwelle

[eigene Darstellung mit MATLAB]

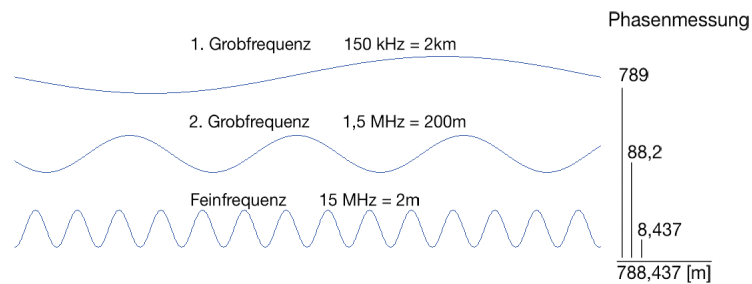


Abbildung 13: Auflösung der Phasenmessung

[Ingensand, 2012]

Da bei Monitoringaufgaben Kleinigkeiten entscheidend sein können, ist auch die Wahl des passenden Tachymeters wichtig. Es spielen die Genauigkeiten und auch die Messfrequenz, in der eine Messung ausgeführt und abgespeichert werden kann, eine wichtige Rolle. *Tabelle 2* zeigt verschiedene Fabrikate unterschiedlicher Hersteller mit den jeweiligen Parametern.

Die Genauigkeiten der Richtungsmessung sind je nach Fabrikat buchbar. Diese beziehen

3. Monitoring

sich auf eine in zwei Fernrohrlagen gemessene Richtung. Die unterschiedlichen Genauigkeiten ergeben sich nicht aus der Herstellung oder unterschiedlichen Teilkreisen für die Messung, sondern aus einer softwareseitigen Abschwächung der Messergebnisse. Die Streckenmessgenauigkeit setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Ein Teil ist ein konstanter Fehler, der bei jeder Messung auftritt, der andere Teil ist eine streckenabhängige Ungenauigkeit. Dabei werden zwei Messmodi unterschieden. Die Standardmessung liefert eine höhere Genauigkeit bei längerem Zeitaufwand. Dies wird hauptsächlich bei Messungen auf einzelne Ziele angewendet. Bei diesem Messmodus wird im Phasenvergleichsverfahren jede Frequenz der ausgesendeten Messwelle aufs Neue ausgewertet. Der Treckingmodus hingegen wird für Monitoringaufgaben verwendet, bei dem ein Ziel verfolgt wird und eine kontinuierliche Messung erforderlich ist. In diesem Messmodus werden die Daten der Grobmessung gespeichert und für mehrere, folgende Feinmessungen angewendet. Die Genauigkeit leidet dabei zu Gunsten der kürzeren Messzeit.

Hersteller	Typ	Richtungsmessung Stdabw. nach ISO 17123-3	Streckenmessung Standardabweichung nach ISO 17123-4			
			Standard auf Prisma		Trecking auf Prisma	
			Genauigkeit	Messzeit	Genauigkeit	Messzeit
Leica	TCR 1200	1", 2", 3", 5"	1,0 mm + 1,5 ppm	2,4 s	3 mm + 1,5 ppm	< 0,15 s
	TS 09	1", 2", 3"	1,0 mm + 1,5 ppm	2,4 s	3 mm + 2,0 ppm	< 0,15 s
	TS 15	1", 2", 3", 5"	1,0 mm + 1,5 ppm	2,4 s	3 mm + 1,5 ppm	< 0,15 s
	TS 30	0,5"	1,0 mm + 1,0 ppm	2,4 s	3 mm + 1,0 ppm	< 0,15 s
	TS 50	0,5"	0,6 mm + 1,0 ppm	2,4 s	k.A.	k.A.
Trimble	S5	1", 2", 3", 5"	1,0 mm + 2,0 ppm	1,2 s	4 mm + 2,0 ppm	0,4 s
	S7	1", 2", 3", 5"	1,0 mm + 2,0 ppm	1,2 s	4 mm + 2,0 ppm	0,4 s
	S9	0,5", 1"	1,0 mm + 2,0 ppm	1,2 s	4 mm + 2,0 ppm	0,4 s
	S9 HP	0,5", 1"	0,8 mm + 1,0 ppm	2,5 s	5 mm + 2,0 ppm	0,4 s
Topcon	IS-3	1", 3", 5"	2,0 mm + 2,0 ppm	k.A.	k.A.	k.A.
	OS	1", 2", 3", 5"	2,0 mm + 2,0 ppm	1,7 s	k.A.	1,4 s
	DS200i	1", 3", 5"	1,5 mm + 2,0 ppm	0,9 s	k.A.	0,4 s
	PS	1", 3", 5"	1,5 mm + 2,0 ppm	1,5 s	k.A.	1,3 s
	MS AX	0,5", 1"	0,8 mm + 1,0 ppm	2,4 s	k.A.	1,3 s
	MS AX II	0,5", 1"	0,8 mm + 1,0 ppm	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 2: verschiedene Fabrikate von Tachymetern

[Leica 01], [Trimble], [Topcon]

3.4.2 Der Neigungssensor

Bei fast allen terrestrischen Messungen ist es wichtig, einen Bezug zur lokalen Lotrichtung herzustellen. Diese Lotrichtung wird aus physikalischer Sicht als Richtung der Schwerkraft betrachtet. Geodätische Messinstrumente besitzen aus diesem Grund verschiedene Arten von Libellen oder Neigungsmessern. Sie dienen zur Senkrechtstellung der Messinstrumente oder zur Korrektur von Messwerten. In einfachster Form bestehen die Libellen aus tonnenförmig ausgeschliffenen Glasröhren, die mit einer Flüssigkeit befüllt sind. Die Menge dieser Flüssigkeit ist so bemessen, dass eine kleine Luftblase im Glaskörper existiert. Da sich die Flüssigkeit am Schwerfeld der Erde orientiert, kann die Luftblase genutzt werden um die Messinstrumente zu horizontieren. Libellen sind in ihrer Anwendung sehr begrenzt. Sie liefern dem Nutzer lediglich die Information, ob der horizontale Zustand erreicht ist oder nicht. Ein bestimmtes Maß zur Korrektur der 'Schiefstellung' kann nur abgeschätzt werden.

Elektronische Neigungssensoren bieten eine größere Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten. Sie dienen bspw. zur Kalibrierung von ebenen Flächen, zur Messung von Gefällen oder zur Deformationsmessung. Speziell bei der Deformationsmessung treten Neigungssensoren in Kombination mit anderen Messinstrumenten auf. Die Neigungsmesser liefern dann zusätzliche Informationen zur Neigung oder Drehung um eine bestimmte Achse. Dabei werden die Messwerte als absolute Werte, mit Bezug zur Schwerkraft, oder als relative Werte genutzt.

Neigungssensoren lassen sich in Flüssigkeitssysteme, Pendelsysteme und seismische Systeme unterscheiden (ABB 14). Durch den Bezug zur Richtung der Lotlinie arbeiten alle Systeme mit absoluten Messwerten. Bei den flüssigkeitsbasierenden Neigungsmessern verdeutlicht der Normalenvektor der Flüssigkeitsoberfläche die Lotrichtung und bei den Pendelsystemen wird die Richtung des Pendels mit der Richtung der Schwerkraft gleichgesetzt. Die seismischen Systeme verwenden Beschleunigungsmesser, um den Einfluss der Schwerkraft zu erhalten. Aus diesen Werten wird dann eine Neigung errechnet. Bei den anderen beiden Systemen funktioniert die Abtastung optisch, kapazitiv, induktiv oder resistiv.

3. Monitoring

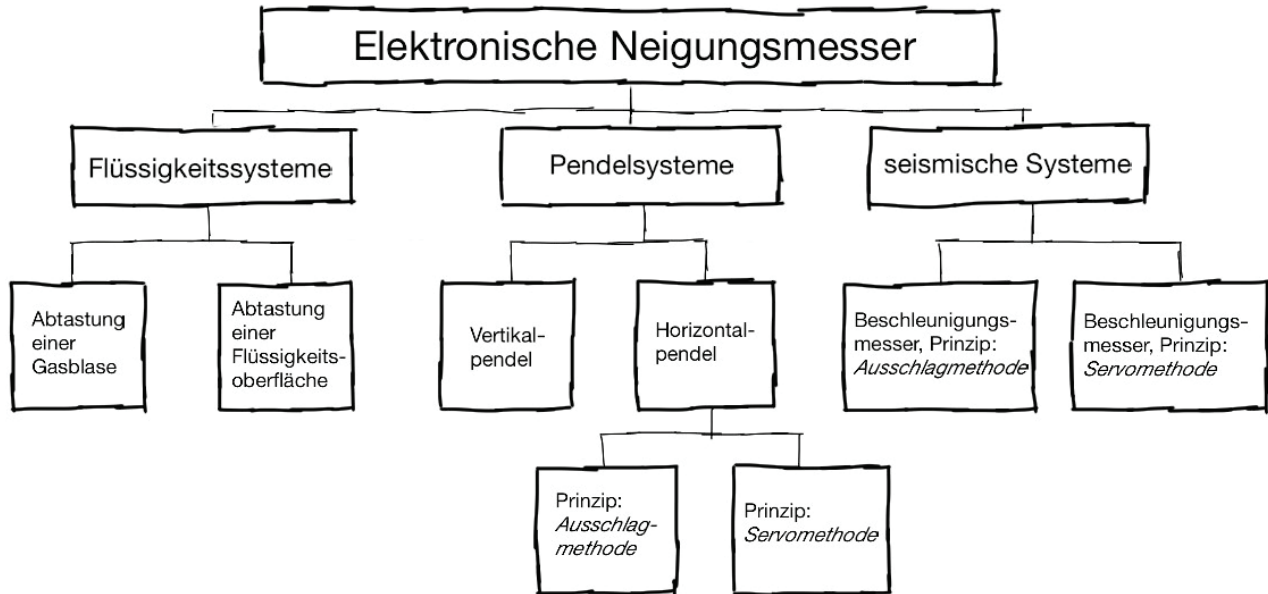


Abbildung 14: Einteilung der elektronischen Neigungssensoren

[Ingensand, 2012]

Bei den Pendelsystemen wird eine kleine Masse an Bändern aufgehängt. Diese Masse folgt der Richtung der Schwerkraft. Im Bezug zum Sensorgehäuse verändert die Masse ihre Lage, je nach Schiefstellung des Gehäuses. Dieser Ausschlag wird erfasst und somit die Neigung ermittelt. Der Aufbau der Pendelsysteme kann in Vertikal- und Horizontalpendel unterschieden werden. Um verschiedene physikalische Eigenschaften auszunutzen oder zu vermeiden, kommen bei Vertikalpendeln diverse Aufhängemethoden zum Einsatz. So sorgt bspw. das Doppelpendel (ABB 15c) für einen geradlinigen Ausschlag, während das Einfachpendel (ABB 15a) für eine biaxiale Messung genutzt werden kann. Um ungewollte Verdrehungen des Pendels zu vermeiden, oder dem Pendel eine bestimmte Bewegungsrichtung vorzugeben, werden Bänder zur Aufhängung verwendet (ABB 15b)). Eine weitere Verbesserung findet sich bei dem TALYVEL-Neigungsmesser. Dieser besitzt ein System aus fünf Fäden zur Aufhängung. Dabei verhindern die dreieckige Aufhängung eine seitliche Bewegung und der fünfte Faden verhindert eine Verdrehung der Pendelmasse (ABB 15d)).

3. Monitoring

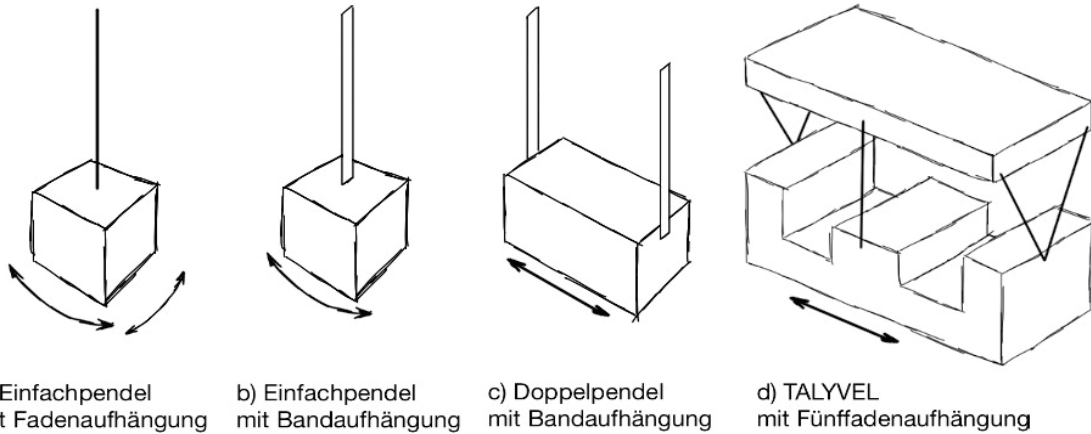


Abbildung 15: Aufhängungen bei Pendelsystemen

[Ingensand, 1985]

Zur Erzeugung der Messwerte und damit einer Neigungsinformation werden elektronische Neigungsmesser mit Weggebern ausgestattet. Je nach Ausschlag der Pendelmasse wird dabei eine elektrische Größe beeinflusst. Bei den Pendelsystemen werden ohmsche, kapazitive oder induktive Widerstände genutzt. Der TALYVEL Neigungssensor arbeitet mit zwei elektronischen Spulen, die von einer Wechselstromquelle versorgt werden. Durch den Ausschlag des Pendels verändert sich die relative Lage der Pendelmasse zu den Spulen. Daraus folgt eine Änderung der Induktivität. Mit diesem Verfahren wird die mechanische Neigung in ein digitales Signal umgewandelt und ist mit der geeigneten Software auswertbar.

[Schlemmer, 1996]

Bei der Neigungsmessung mit Horizontalpendeln ist der Sensoraufbau etwas anders. *Abbildung 16* zeigt den schematischen Aufbau eines SCHAEVITZ Inclinometers. Es besteht aus einem Drehmomentmotor, an dem ein Paddel angebracht ist. Dieses Paddel steht senkrecht zur Lotrichtung. Wird nun eine Neigung auf das Gehäuse ausgeübt, versucht das Paddel dieser Neigung zu folgen. Diese, vom Paddel angestrebte, Lageänderung wird von einem Positionssensor erfasst. Der Sensor wiederum sendet eine Information an den Drehmomentmotor, der die Lage des Paddels korrigiert. Mit der geräteinternen Elektronik wird das Drehmoment ausgewertet und in eine Neigungsinformation umgerechnet.

[Schlemmer, 1996]

3. Monitoring

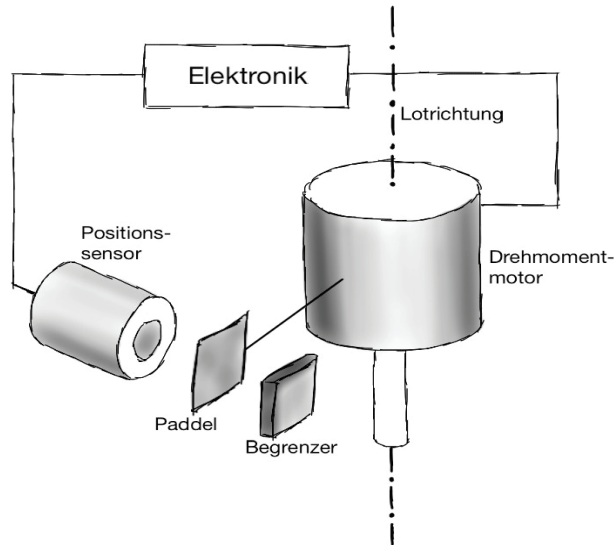


Abbildung 16: schematischer Aufbau eines Schaevitz Inclinometers

[Schlemmer, 1996]

Ein weiteres System bilden die Neigungsmesser mit einer Flüssigkeit. Dabei wird die stets horizontale Flüssigkeitsoberfläche in Bezug zur Gehäuseneigung erfasst. Dies kann zum einen mit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit oder mit Hilfe einer elektrooptischen Methode untersucht werden. Bei der Methode mit der leitenden Flüssigkeit wird Quecksilber oder ein Elektrolyt genutzt. Die Anforderungen dieser Flüssigkeit sind eine geringe Viskosität, eine niedrige Temperaturexpansion und eine chemische Stabilität. Auf Grund der Neigung des Gehäuses ändert sich die Massenverteilung der Flüssigkeit. Diese Neigung kann dann durch eine elektrische Widerstandsänderung erfasst werden.

Bei der Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche mit der elektrooptischen Methode wird die Totalreflexion ausgenutzt. Dabei befinden sich ein Lichtsender (LED) und ein Empfänger (CCD-Sensor) fest mit dem Gehäuse verbunden. Das Licht wird von der LED ausgesendet und über ein optisches System zur Flüssigkeit geleitet. Je nach Neigung des Gehäuses wird der Lichtstrahl an der Flüssigkeitsoberfläche totalreflektiert und zu einem CCD-Sensor gelenkt (ABB 17). Dieser detektiert eine zweiachsige Positionsänderung des Lichtsignals und errechnet daraus die Neigung des Gehäuses. *Abbildung 18* zeigt den Innenaufbau eines LEICA Nivel200 Neigungssensors. Bei dieser Messmethode wird Silikonöl als Flüssigkeit genutzt.

3. Monitoring

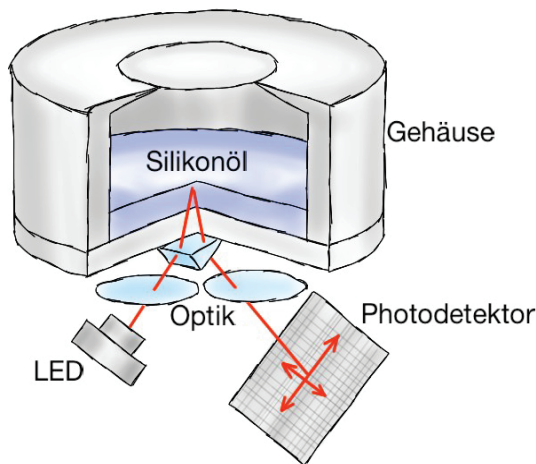


Abbildung 17: Aufbau eines Neigungssensors mit Flüssigkeitsoberfläche

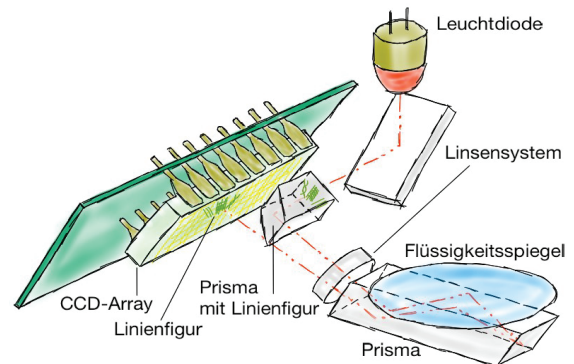


Abbildung 18: Aufbau eines Nivel200-Neigungssensors

[Schlemmer, 1996], [Leica 02]

Die **Tabelle 3** zeigt einige Neigungssensoren verschiedener Hersteller und die entsprechenden Parameter der Produkte. Bei den Angaben der Genauigkeit, der Auflösung und des Messbereichs handelt es sich um die Herstellerangaben. Es ist zu erkennen, dass bei den einachsigen Pendelsystemen eine höhere Genauigkeit zu erzielen ist. Der Nachteil ist allerdings, dass keine zeitgleiche, biaxiale Messung möglich ist. Dazu wird ein zusätzlicher Neigungssensor benötigt. Dieser Nachteil entfällt bei den Nivel200-Sensoren der Firma LEICA. Je nach Anwendung oder erwarteter Neigung beim Gebäudemonitoring kann so auf verschiedene Sensoren zurückgegriffen werden.

Hersteller	Produkt	Prinzip	Abgriff	Achsen	Messbereich			Auflösung		Genauigkeit lt. Hersteller	
					mrad	[°]	[°]	mrad	[°]		[°]
Leica	Nivel200 A	F-Oberfläche	optisch	zweiachsig	± 1,51	± 311,46	± 0,087	0,001	0,206	± 0,0047 mrad	± 0,97
	Nivel200 B	F-Oberfläche	optisch	zweiachsig	± 2,51	± 517,72	± 0,144	0,001	0,206	± 0,0141 mrad	± 2,91
	Nivel200 C	F-Oberfläche	optisch	zweiachsig	± 3,00	± 618,79	± 0,172	0,001	0,206	± 0,0471 mrad	± 9,72
Wyler	NivelSWISS-D R1	V-Pendel	induktiv	einachsig		± 150	± 0,042		1	Max 1% des MW	± 1,5
	NivelSWISS-D R2 (ehem. Niveltronic)	V-Pendel	induktiv	einachsig		± 30	± 0,008		0,2	Max 1% des MW	± 0,3
Taylor Hobson	Talyvel 2	V-Pendel	induktiv	einachsig		± 25	± 0,007		0,1		± 1,0
	Talyvel 6	V-Pendel	induktiv	einachsig		± 10	± 0,003		0,2		± 0,2
Schaevitz		H-Pendel	kapazitiv	einachsig		± 3600	± 1		0,04		± 1,5
	DXL360/S Digital Protractor			einachsig zweiachsig			± 360 ± 40		36	± 0,08° + 1%	

Tabelle 3: verschiedene Fabrikate von Neigungssensoren

MW = Messwert

[Leica 02], [Wyler], [Schlemmer, 1996], [DXL360/S manual]

3.4.3 Der Beschleunigungssensor

Beschleunigungsmesser sind, neben den Drehratensensoren, Teil der sogenannten Inertialsensoren. Inertialsensoren nutzen die Trägheit einer Masse aus, um bestimmte physikalische Einwirkungen auf diese Masse zu ermitteln. Diese Sensoren treten meistens im Verbund auf, sodass auch von einem Inertialmesssystem (IMU – inertial measurement unit) gesprochen werden kann.

Beschleunigungssensoren, auch Accelerometer oder G-Sensor genannt, messen die Kraft, die auf eine Masse wirkt. Diese Krafteinwirkung erfolgt auf Grund der Trägheitsbeschleunigung. Ihre Bauweise veranlasst sie dazu, lineare Beschleunigungen zu erfassen. Das geschieht mit dem 2. Newton'schen Axiom $F = m \cdot a$. Die damit errechnete Beschleunigung a wird mit der Einheit $1 m/s^2$ oder als ein Vielfaches der mittleren Erdbeschleunigung $1 g = 9,80665 m/s^2$ angegeben. [Tränkler, 2014]

Abbildung 19 zeigt ein Schaubild, wie ein Beschleunigungsmesser aussehen kann. Dabei befindet sich ein Massekörper, die sogenannte seismische Masse, mit dem Gehäuse verbunden. Diese Verbindung ist elastisch, sodass die Masse eine Schwingung erfahren und wieder zu ihrem ursprünglichen Zustand zurückkehren kann. Die seitlich abstehenden Platten dienen dazu, zwischen den Kondensatorplatten eine Kapazitätsänderung zu erzeugen. Durch diese Änderung und die bekannten Dimensionen des Bauteils kann die Kraft berechnet werden, mit der die seismische Masse in Bewegung gesetzt wurde. Um die lineare Bewegungsrichtung eines einzelnen Feder-Masse-Systems in eine dreidimensionale, räumliche Bewegungsdetektion zu überführen, werden drei solcher Systeme rechtwinklig zueinander angeordnet. Wird dieses System aus drei seismischen Massen so ausgerichtet, dass eine Achse parallel zur Lotrichtung verläuft, spiegelt es lediglich die konstante Erdbeschleunigung in dieser Lotrichtung wieder. Die beiden übrigen Achsen zeigen keine Krafteinwirkung.

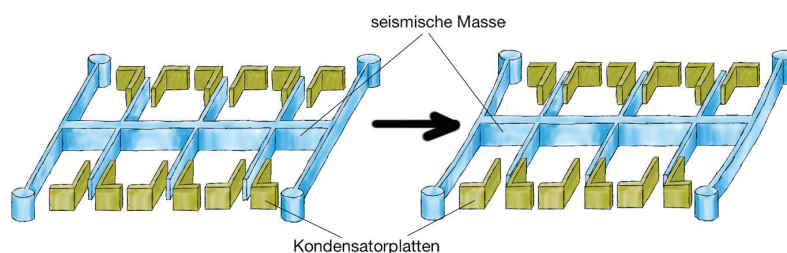


Abbildung 19: Funktionsweise eines Beschleunigungssensors

3. Monitoring

Moderne Mikroelektronik macht es möglich, Beschleunigungssensoren mit einer sehr geringen Größe herzustellen. Diese Sensoren sind somit Bestandteil der MEMS, der Microelectromechanical Systems. Wie oben beschrieben werden Beschleunigungsmesser meist mit Drehratensensoren zu einem Inertialmesssystem (IMU) kombiniert. Dieses zusammengefasste Bauteil misst oft nur wenige Millimeter und kann in nahezu allen elektronischen Geräten eingesetzt werden.

Die Anwendungen sind dabei sehr vielfältig. Seit Beginn des Jahres 2005 nutzt APPLE Beschleunigungssensoren in seinem damals aufgefrischten PowerBook. Die Sensoren sind dabei fest mit der Hauptplatine verbunden und sollen Erschütterungen oder ein schnelles Ankippen des Laptops erkennen und die Festplatte schützen indem die Schreib- und Leseköpfe geparkt werden. Dies beugt einem sogenannten Head-Crash vor, bei dem die Magnetscheibe der Festplatte von der Schreib- und Leseeinrichtung berührt wird. APPLE nennt diese Beschleunigungssensoren „Sudden Motion Sensoren“ (Sensor für plötzliche Bewegungen). Ein ähnliches System wurde seit 2003 von der Firma IBM in den ThinkPads verbaut. Es trug den Namen „Active Protection System“.

[wikipedia.de/Sudden_Motion_Sensor]

In allen modernen Smartphones werden Beschleunigungssensoren verbaut. In Verbindung mit den Drehratensensoren können sie stets die Lage des Smartphones im Raum ermitteln. Mit dieser Information lassen sich diverse Programme und Apps steuern. Die Ergebnisse der Sensorauswertung wird genutzt um bei der Anzeige im Display zwischen Hoch- und Querformat zu unterscheiden. Wird das Smartphone gekippt, ändern sich die gemessenen Werte der Sensoren. Diese Information wird an das Betriebssystem gesendet, welches dann das Bild im Display anpasst und ebenfalls kippt. Viele Entwickler nutzen diese Informationen aus um Spiele mit einer Neigungssteuerung zu versehen. Damit entfällt der Tipp auf das Touchdisplay.

Beschleunigungssensoren werden ebenfalls bei der Navigation mit Smartphones eingesetzt. Wenn bei einer Tunnelfahrt die Verbindung zum GPS nicht mehr gegeben ist, kann die Positionierung und die Navigation nur auf Schätzungen basieren. Die Beschleunigungssensoren messen, ob sich das Fahrzeug mit gleichbleibender Geschwindigkeit geradlinig bewegt, oder ob eine seitliche Beschleunigung durch eine Kurvenfahrt auftritt. Sie geben ihre Information ans Betriebssystem weiter und verbessern damit die Standortbestimmung.

3. Monitoring

Die nachfolgende *Tabelle 4* zeigt verschiedene Sensoren zur Messung von Schwingungen. Die letzten beiden davon sind in Smartphones verbaut, die anderen sind separat erhältlich und zählen als gesonderte Messsensoren. Für die Messung mit Accelerometern ist die Messfrequenz entscheidend. Da oftmals periodische Schwingungen aufgezeichnet werden müssen, muss die Abtastrate der Sensoren dementsprechend hoch sein (siehe NYQUIST- Kriterium im Abschnitt 5.2). Die in der Tabelle befindlichen Auflösungen richten sich meist nach dem LSB, dem Least Significant Bit. Das bedeutet, dass sich bei einer Änderung des letzten Bits einer Binärzahl die gemessene Gravitation um den dementsprechenden Wert verändert.

Hersteller	Produkt	Arbeitsbereich $\pm \dots g$	Auflösung	Genauigkeit Bei 0 g	Messfrequenz
sbg Systems	IG-500E	2, 5, 18	0,1 mg	$\pm 5 \text{ mg}$	Bis 250 Hz
Analog Devices	ADXL345	2, 4, 8, 16	32 mg – 4 mg / LSB	$\pm 40 \text{ mg (X,Y)}$	3,125 Hz – 1,6 kHz
				$\pm 80 \text{ mg (Z)}$	
STMicroelectronics	LIS331DLH	2, 4, 8	4 mg - 1 mg / LBS	$\pm 20 \text{ mg}$	0,5 Hz – 1 kHz
Bosch Sensortec	BMA220	2, 4, 8, 16	0,5 g – 62,5 mg / LSB	$\pm 95 \text{ mg}$	32 Hz – 1 kHz

Tabelle 4: verschiedene Fabrikate von Beschleunigungssensoren

[sbg Systems], [Analog Devices], [STMicroelectronics], [Bosch]

3.5 Kommunikation und Datentransfer

Messinstrumente und Sensoren besitzen verschiedenste Arten von Schnittstellen. Sie dienen dazu, einen Datenaustausch zu realisieren oder die Messinstrumente sogar zu steuern. Dies geschieht mit Hilfe eines Computers und einer Verbindung zu dem Messinstrument. Die Verbindung kann durch Kabel oder schnurlos erzeugt werden. Je nach verwendetem Messinstrument und Art der Messaufgabe muss untersucht werden, mit welcher Variante die Kommunikation durchgeführt wird. Dabei kann es vorkommen, dass eine Verlegung von Datenkabeln, bspw. in einem denkmalgeschützten Gebäude, nicht gestattet ist oder eine kabellose Verbindung an die Grenzen ihrer Reichweite stößt.

3.5.1 RS-232

Eine weit verbreitete Methode in der Datenübertragung ist die serielle Schnittstelle nach RS-232 Standard. Sie wird häufig im industriellen Bereich zur Kommunikation über kurze Entfernungen genutzt. Dieser Standard definiert eine serielle, asynchrone Kommunikation. Dabei wird eine Folge von Spannungen übertragen, die binär codiert wird. Eine Spannung zwischen -3V und -25V wird als logische „1“ und die Spannung zwischen +3V und +25V wird als logische „0“ angesehen. Diese Übertragungsart hat ihre Grenze in der Reichweite. Das Übertragungskabel besitzt je nach Länge einen eigenen Widerstand. Dieser führt dazu, dass die übertragenen Spannungssignale nicht mehr als eindeutige „1“ oder „0“ identifiziert werden können. RS-232 ist für eine Geschwindigkeit bis zu 20000 Bit/s ausgelegt. Bei einer Kabellänge von bis zu 15 m entspricht das etwa einer Baudrate von 19200. Die Baudrate entspricht einer Übertragungsgeschwindigkeit, die sowohl bei Sender als auch bei dem Empfänger eingestellt werden muss. Eine Signalübertragung wird daher nur möglich, wenn an beiden Stellen die gleiche Baudrate eingestellt wird. Wenn bei dem RS-232 Standard diese Baudrate herabgesetzt wird, sind auch längere Kabelverbindungen möglich z.B. 900 m bei 2400 Baud.

[Mandl, et al. 2010]

Die Firma LEICA GEOSYSTEMS benutzt ebenfalls eine serielle Datenübertragung mit dem RS-232 Standard. An den Tachymetern befinden sich 5- bzw. 8-polige LEMO-

3. Monitoring

Steckerbuchsen um eine Tachymetersteuerung oder einen Datenaustausch zu realisieren. Den Neigungssensor Nivel200 gibt es in zwei unterschiedlichen Ausführungen. Zum einen als Nivel210 mit einer RS-232 Schnittstelle und zum anderen als Nivel220 mit RS-485 Standard. Der Unterschied besteht darin, dass der Nivel210 lediglich als Einzelsensor genutzt werden kann, während der Nivel220 mit dem RS-485 Standard einen zusätzlichen Bus besitzt, um mehrere dieser Neigungssensoren zu einem System zusammenschließen zu können. Mit Hilfe verschiedener Adapter können diese seriellen Schnittstellen erweitert werden. Das macht eine moderne, gängige Verbindung zum Computer per USB möglich.

[Engel, 2013]

3.5.2 USB

Der USB - „Universal Serial Bus“ ist heutzutage die am häufigsten verwendete Schnittstelle zwischen Computern und deren Peripheriegeräten. Seit USB im Jahre 1996 eingeführt wurde, setzte es sich durch und verdrängte viele bis dahin verbreitete Schnittstellen. Den Vorteil bietet dabei die gesteigerte Übertragungsgeschwindigkeit von 12 MBit/s bei USB 1.1, 480 MBit/s mit USB 2.0, bis zu 5 GBit/s bei USB 3.0 und bis zu 10 GBit/s mit dem neuen USB 3.1. Mit USB ist es möglich, Endgeräte mit einem Strom von maximal 500 mA zu versorgen. Dies wird durch eine zusätzliche Leitung realisiert. USB-Kabel sind auf eine Länge von maximal 5 m limitiert.

Die Übertragung mit Hilfe des USB verläuft über eine Master- Slave- Verbindung. Dabei übernimmt der Computer die Rolle des Hosts und verwaltet alle angeschlossenen USB-Verbindungen durch eine Baumstruktur. So ist es möglich bis zu 127 Geräte von einem Host-PC steuern zu lassen. Wird ein USB- Gerät oder -Kabel an einen PC angeschlossen, versorgt es den Computer selbstständig mit einem Treiber, der die Konfigurationen dieser Verbindung beinhaltet.

[Tränkler, 2014]

3.5.3 Ethernet

Eine weitere Methode ein Kommunikationssystem zu erstellen, ist die Verwendung von Ethernet- Verbindungen. Es dient dazu, ein Local Area Netzwerk zu erschaffen, in dem bspw. mehrere Computer auf ein bestimmtes Endgerät zugreifen können. Bei

3. Monitoring

Ethernetkabeln werden Kupfer- oder Glasfaserleitungen verwendet. Die Kupferkabel sind bis zu einer Länge von 100 m begrenzt. Darüber hinaus werden Multimode- oder Singlemode- Glasfaserleitungen benutzt. Der aktuelle Standard für Kupferkabel ist der 10 Gigabit- Ethernet Standard IEEE 802.3an mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 10 GBit/s. Glasfaserleitungen mit einer gesteigerten Datenrate von bis zu 100 GBit/s laufen unter dem Standard IEEE 802.3ba. Unter der Verwendung von Singlemode- Fasern sind auch Entfernungen bis zu 40 km möglich.

[elektronik-kompodium.de], [solutions.3mdeutschland.de]

3.5.4 WLAN

Eine weitere Möglichkeit der Datenübertragung ist das WLAN, das Wireless Local Area Network. Die Grundlage bietet ein Ethernet- Netzwerk, allerdings drahtlos. WLAN wird durch den Standard IEEE 802.11 festgesetzt. Es dient zur Verbindung von Endgeräten an lokale Netzwerke innerhalb von Gebäuden. Neben dem privaten Sektor, werden WLAN-Netzwerke auch an öffentlichen Orten, wie bspw. Hotels oder Einkaufszentren, angeboten. In diesem Zusammenhang wird auch von Wi-Fi („Wireless Fidelity“) gesprochen. Die Bereiche, in denen eine WLAN- Verbindung besteht, werden durch WLAN- Access- Points realisiert. Die Reichweite eines solchen Access- Points beträgt etwa 300 m. An öffentlichen Orten dient ein Access- Point dazu, Endverbrauchern den Zugang zum Internet zu gewähren. Dazu wird ein WLAN- Router in ein lokales Netzwerk integriert. Dieser ermöglicht dann eine Drahtlosverbindung zu Endgeräten. Diese Funkverbindung wird durch die Frequenzen 2,4 GHz und 5 GHz hergestellt. Der IEEE 802.11n- Standard ermöglicht aktuell Datenraten von 600 MBit/s. Mit dieser Verbindung sind zukünftig auch Geschwindigkeiten von bis zu mehreren 100 GBit/s möglich.

Einige geodätische Messinstrumente, wie das LEICA Nova TM50 Tachymeter oder der LEICA HDS6000 Laserscanner lassen sich per WLAN- Verbindung von einem Laptop oder sogar einem Smartphone steuern.

[Zarnekow, et al., 2013]

3.5.5 Richt - WLAN

Richt- WLAN beruht auf der selben Technologie wie das normale WLAN. Da die Reichweite von WLAN- Access- Points begrenzt ist, kommen Richtfunkantennen zum Einsatz, die die Reichweite auf bis zu 20 km erhöhen können. Der Unterschied besteht dabei in der Ausbreitungsrichtung. Während normales WLAN eine räumliche Verfügbarkeit von bis zu 300 m verspricht, ist mit dem Richt- WLAN lediglich eine Punkt- zu- Punkt- Verbindung möglich. Diese Verbindung wird durch Richtfunkantennen hergestellt, die damit eine Datenübertragung schaffen.

[Zarnekow, et al., 2013]

3.5.6 Free Space Optics

Free Space Optics (FSO) nutzen, im Gegensatz zum Richtfunk, keine Radiowellen zum Datenaustausch, sondern Lichtwellen. Dennoch werden sie fälschlicherweise als optischer Richtfunk bezeichnet. Ebenso wie das Richt- WLAN nutzen die Free Space Optics gegenseitig ausgerichtete Anlagen und übertragen ihre Daten durch die Luft. Diese Punkt- zu- Punkt- Verbindung kommt mit Lichtsignalen zustande. An beiden Punkten der Übertragungsanlage befindet sich sowohl ein Laser, bzw. eine LED- Anlage als Sender, als auch eine Empfangseinrichtung um die Lichtsignale zu detektieren. Mit dieser Verbindung lässt sich eine kabellose Datenbrücke über mehrere hundert Meter bis zu einigen Kilometern herstellen. Die Übertragungsrate liegt dabei bei bis zu 1,25 GBit/s. Allerdings ist die Übertragung witterungsabhängig.

[freespaceoptics.org]

3.5.7 Mobiles Internet

Die gewöhnliche Datenübertragung per Internet setzt einen stationären Computer- arbeitsplatz oder einen örtlich gebundenen WLAN- Access- Point voraus. Die Anwendungen in der Kommunikation oder dem Datenaustausch machen eine stationäre

3. Monitoring

Internetverbindung nicht immer möglich. Geodätische Monitoringaufgaben befinden sich auch in Gebieten, in denen eine Dateninfrastruktur nicht gegeben ist. Zu diesem Zweck wird das mobile Internet genutzt. Moderne Smartphones, Laptops oder PDAs (Personal Digital Assistant) besitzen hardwareseitig die Möglichkeit von nahezu jedem Ort und zu jeder Zeit eine Verbindung zum Internet herzustellen. Die Übertragungsgeschwindigkeiten sind je nach Verbindung unterschiedlich. Eine gewöhnliche UMTS Verbindung (Universal Mobile Telecommunications System) mit HSPA+ - Erweiterung (High Speed Packet Access) liefert eine Downloadrate von bis zu 28 MBit/s und einen Uplink von bis zu 11 Mbit/s. Diese Verbindung wird auch als 3G (3. Generation) bezeichnet. Die neue 4. Generation nennt sich LTE-Advanced (Long Term Evolution) und soll eine Übertragungsrates bis zu 1Gbit/s erreichen.

[Sauter, 2015]

3.5.8 Bluetooth

Bluetooth ist eine weitere Art über eine kabellose Verbindung Daten auszutauschen. Die aktuell häufigste Verwendung von Bluetooth ist die Verbindung von Endgeräten, wie Tastatur und Maus an einem Computer oder von Lautsprechern und Kopfhörern an ein Mobiltelefon. Die Bluetooth- Verbindung nutzt, wie das WLAN, ein 2,4 GHz Frequenzband. In der ersten Standardisierung wurde die Datenrate auf 780 kBit/s festgelegt. Die Übertragungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Anzahl und der Aktivität der einzelnen Teilnehmer. Bei der Bluetooth 3.0 Version sind Datenraten bis zu 54 MBit/s erreichbar. Die Reichweite ist auf 100 m begrenzt. Da die Übertragung von Daten per Bluetooth sehr energieaufwendig ist, wird in neueren Versionen, bspw. Bluetooth 4.0, keine Steigerung der Reichweite oder der Übertragungsrate erzielt, sondern der Stromverbrauch reduziert. Die Version 4.0 besitzt eine Bluetooth Low Energy Variante, die auf 10 m Reichweite und 1 MBit/s begrenzt ist.

[Sauter, 2015], [chip.de]

4. Untersuchung der Messinstrumente

Da bei dem Gebäudemonitoring in der Marienkirche in Neubrandenburg verschiedene messtechnische Sensoren und Messinstrumente eingesetzt werden sollen, muss zunächst überprüft werden, ob die diversen Geräte den prognostizierten Anforderungen gewachsen sind. Die vorhergesagte Bewegung des Kirchturms soll einer Schwingung unterliegen, die von den pendelnden Kirchenglocken hervorgerufen wird. Die Impulse, die von den Glocken verursacht werden, sollen mit Hilfe von Schwingungssensoren erfasst werden. Die hervorgerufene Schwingung soll sich auf den Kirchturm übertragen und diesen ebenfalls in eine pendelnde Bewegung versetzen. Das Pendeln des Kirchturms soll durch Neigungssensoren erfasst werden. Die Pendelbewegung hat zur Folge, dass der Kirchturm am oberen Ende eine Bewegung ausübt, die durch tachymetrische Messungen untersucht werden sollen.

Dieses Kapitel befasst sich mit den einzelnen Messinstrumenten und beschreibt diverse Versuchsmessungen, um eine Einsatzfähigkeit für die vorliegende Problematik zu gewährleisten. Es soll untersucht werden, ob die Messinstrumente und Sensoren in der Lage sind ingenieurgeodätische Monitoringaufgaben in der Marienkirche in Neubrandenburg zu erfüllen.

4.1 Tachymeter

Für die tachymetrischen Messungen kommen zwei Produkte der Firma LEICA GEOSYSTEMS zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein Viva TS15 I und ein TS30 Tachymeter.

4.1.1 Vorüberlegung

LEICA Viva TS15 I:

Das LEICA TS15 I ist ein Ingenieurtachymeter mit Richtungs- und Distanzmessung. Durch seine Motorisierung ermöglicht es eine automatische Zielerfassung und Zielverfolgung. Es

4. Untersuchung der Messinstrumente

wird mit einer Winkelmessgenauigkeit von $1'' = 0,3 \text{ mgon}$ angegeben. Die Distanzmessung auf ein geodätisches Prisma ist mit einer Genauigkeit von $1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$ möglich. Der Messvorgang soll dabei ca. 2,4 sec dauern. In einem schnelleren Messmodus ($< 0,15 \text{ sec}$) sind lediglich Genauigkeiten von $3 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$ erreichbar. Zur Überwachungsmessung kann der Messmodus „AutoPunkte“ gewählt werden. Damit lassen sich Punkte automatisch messen. Das einstellbare Zeitintervall am Tachymeter reicht von 60 sec je Messung bis zu 0,1 sec. Die schnellste Messung würde damit einer Messfrequenz von 10 Hz entsprechen. Die automatische Messung erfolgt auf ein geodätisches Prisma. Das Tachymeter erfasst dieses Prisma und schaltet in den „Lock Modus“. Dabei wird jede Bewegung des Prismas vom Tachymeter verfolgt. Der Arbeitsbereich erstreckt sich bis zu 800 m, unter der Verwendung eines geodätischen Rundprismas (GPR1). Die maximalen Geschwindigkeiten, die das Tachymeter erfassen kann sind 5 m/s in tangentialer Richtung bei einer Zielentfernung von 20 m und bis zu 25 m/s bei einer Entfernung von 100 m. In radialer Bewegungsrichtung sind Geschwindigkeiten bis zu 4 m/s erreichbar. Die Zielverfolgung erfolgt mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung der 5 Megapixel Kamera. Dabei wird das Prisma im Bild detektiert und bei einer Bewegung eine Information an die Motoren des Tachymeters gesendet. Diese korrigieren dann die Richtung zum Prisma.

[Leica TS15]

LEICA TS30:

Das LEICA TS30 Tachymeter ist, wie auch das TS15, ein Ingenieurtachymeter. Es besitzt die gleichen Funktionen, allerdings mit gesteigerter Messgenauigkeit. Die Winkelmessung wird vom Hersteller mit $0,5'' = 0,15 \text{ mgon}$ angegeben. Die Distanzmessung auf ein geodätisches Rundprisma GRP1 ist bis zu einer Entfernung von 3500 m möglich. Im Standard Messmodus sollen Genauigkeiten bis zu $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ erreichbar sein. Dieser Streckenmessvorgang dauert ca. 2,4 sec. Der Schnellmodus dauert nur 0,8 sec und liefert Genauigkeiten von $3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$. Mit eingelocktem Prisma (Lock Modus) sind Zielverfolgungen bis zu einer Geschwindigkeit von 9 m/s, bei einer Entfernung von 20 m, in tangentialer Richtung möglich. Bei 100 m Entfernung sind sogar 45 m/s möglich. In radialer Bewegungsrichtung schafft das TS30 Tachymeter eine Geschwindigkeit bis zu 5 m/s. Der AutoPunkte Messmodus erlaubt die gleichen Messfrequenzen wie das LEICA TS15, 0,1 bis 60 sec je Messung.

[Leica TS30]

4.1.2 Testmessungen und Auswertung

1. Testmessung auf der Messwiese der Hochschule Neubrandenburg

Die erste Testmessung mit den beiden Tachymetern der Firma LEICA GEOSYSTEMS sollte den Umgang mit der Menüführung und der Handhabung schulen. Dazu wurden die Tachymeter mit Stativen auf die „Messwiese“ der Hochschule Neubrandenburg gestellt. Während das TS15 mit der LEICA Viva Software läuft, befindet sich auf dem TS30 das Betriebssystem der LEICA TPS1200er Reihe. Daher ist die Tastenbelegung etwas anders und die Menüpunkte sind ebenfalls differenziert. Der Messmodus „AutoPunkte“ ist bei beiden Tachymetern verfügbar und bietet die gleichen einstellbaren Parameter. Bei der Testmessung wurden verschiedene Einstellungen auf ihre Wirkungsweise untersucht und verifiziert, ob sie bei einer Gebäudeüberwachung der Marienkirche in Neubrandenburg sinnvoll sind. Die Konfigurationen im AutoPunkte - Menü erlauben folgende Aufzeichnungsmethoden: *Zeit*, *Distanz*, *Höhen Diff*, *Dist oder Höhe*, *Stop & Go* und *Benutzer*.

Bei der Aufzeichnung nach *Zeit* wird ein bestimmtes Messintervall vorgegeben, nach dem eine nächste Messung ausgelöst wird. Die Intervalle reichen von 0,1 – 60 Sekunden.

Der *Distanz*- Modus vergleicht die Strecke zwischen dem zuletzt gemessenen AutoPunkt und der aktuellen Messung. Ist eine vorgegebene Strecke zwischen diesen Punkten überschritten, wird der nächste AutoPunkt gespeichert. Dieser Modus liefert keine konstanten Punktkoordinaten oder Messwerte über einen gewissen Zeitraum, sondern lediglich einen Wert, falls eine Toleranz überschritten ist.

Die Messmethode *Höhen Diff* arbeitet analog zur *Distanz*- Methode. Allerdings spielt hierbei die Höhendifferenz zum vorher gespeicherten Punkt eine Rolle. Ist ein definierter Höhenunterschied erreicht, wird die nächste Messung ausgelöst und abgespeichert.

Der Modus *Dist oder Höhe* vereint die beiden zuletzt beschriebenen Methoden. Dabei wird der nächste Punkt gespeichert, wenn eine gewisse Distanz in der Lage oder in der Höhe überschritten ist.

Bei *Stop & Go* wird zunächst eine Zeit und eine Position festgelegt. Der neue AutoPunkt wird abgespeichert, wenn sich das Prisma in der vorgegebenen Zeit nicht mehr um den vorgegebenen Positionswert verändert. Dies ist vergleichbar mit einer gedämpften Schwingung. Wird ein Distanzwert zum vorherigen Punkt nach einer bestimmten Zeit nicht

4. Untersuchung der Messinstrumente

überschritten, wird der nächste Punkt gemessen und gespeichert. Überschreitet die Distanz den definierten Wert erneut, startet der Messvorgang von vorn.

Der letzte Modus *Benutzer* bietet verschiedene benutzerdefinierte Einstellungen, die für die Messung von AutoPunkten vorgenommen werden können.

Da die Überwachungsmessung an der Marienkirche eine Schwingung aufdecken soll, wird eine konstante Messung über einen bestimmten Zeitraum benötigt. Daher wird der „AutoPunkte“ Modus mit der *Zeit* – Konfiguration näher untersucht. Dazu wird zunächst ein Prisma auf einem Stativ ans andere Ende der Messwiese positioniert. Die Entfernung zwischen Prisma und Tachymeter beträgt ca. 130 m. Bei diesem stationären Ziel sollte sich die Messunsicherheit lediglich im Bereich der Geräteparameter befinden:

$$\begin{aligned} TS15(EDM Tracking = 3\text{ mm} + 1,5\text{ ppm}) &= \underline{3,20\text{ mm}} \quad \text{bei } 130\text{ m} \\ TS30(EDM Tracking = 3\text{ mm} + 1,0\text{ ppm}) &= \underline{3,15\text{ mm}} \quad \text{bei } 130\text{ m}. \end{aligned}$$

Da diese Testmessung keine umfangreiche Nachbearbeitung und Auswertung zur Folge haben sollte, wurde die Überprüfung der Messunsicherheit anhand der, im Display des Tachymeters, angezeigten Schrägstrecke vorgenommen. Bei der Messung von AutoPunkten wird das Display je nach eingestelltem Messintervall regelmäßig aktualisiert. Die Messwerte können direkt abgelesen werden. Eine Messung von ca. 500 Punkten mit einem Messintervall von 0,5 sec zeigte, dass beide Tachymeter im Zentimeterbereich zuverlässig messen. Die angezeigten Schrägstrecken änderten sich lediglich um ca. 5 – 6 mm. Die Horizontalrichtungsmessung zeigte im Display Änderungen von ca. 1 – 2 mgon. Dies ergibt bei einer Entfernung von 130 m eine seitliche Auslenkung von 4 mm auf ein unbewegtes Ziel.

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \rightarrow \quad \frac{b}{130\text{ m}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}\text{ gon}}{200\text{ gon}/\pi} \quad \rightarrow \quad b = 4,1\text{ mm}$$

Zur weiteren Überprüfung der Tachymeter wurde das Prisma auf einen Lotstab befestigt und verschiedene Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten ausprobiert. Das Prisma blieb bei allen Bewegungen eingelockt. Lediglich bei kurzen Distanzen von ca. 5 m zum Tachymeter reicht die Rotationsgeschwindigkeit beider Messinstrumente nicht mehr aus um schnelle, tangentielle Bewegungen zu erfassen und das Prisma zu verfolgen.

4. Untersuchung der Messinstrumente

2. Testmessung auf dem Messdach der Hochschule Neubrandenburg

Die zweite Testmessung mit einem Tachymeter soll Erkenntnis über die tatsächliche Messfrequenz des „AutoPunkte“ - Modus liefern und damit die Fähigkeit einer Schwingungsmessung untersuchen. Bei dieser Messung kam nur das LEICA TS15 Tachymeter zum Einsatz.

Dazu wurde das Messinstrument auf einem der Messpfeiler auf dem Messdach der Hochschule befestigt und horizontalisiert. Als Reflektor wurde ein Geodätisches Rundprisma (GRP1) auf einem Lotstab, ohne Stabstativ, benutzt. Vom Tachymeter aus wurde in östlicher Richtung, mit je 10 m Abstand, sieben Punkte festgelegt, an denen eine Messung stattfinden sollte. Diese Festlegung geschah durch Kreidestriche auf den Bodenplatten des Messdaches. An jedem dieser sieben Punkte wurden die Horizontalrichtungsmessung und die Messung der Schrägstrecken untersucht. Die gesamte Messung wurde an einem Stück bei eingelocktem Prisma mit einer voreingestellten Messzeit von 0,1 sec vollzogen. Zur Überprüfung wurde die Lotstabspitze an den zuvor festgesetzten Punkten abgesetzt und das Prisma wurde bewegt. Zunächst wurde eine seitliche Auslenkung von ca. 5 – 10 cm simuliert, um gemessene Bewegungen hauptsächlich in den Horizontalrichtungen zu messen (ABB 20). Soweit es manuell möglich war, wurde eine Schwingung mit dieser Amplitude und einer ungefähren Frequenz von 1 Hz erzeugt. Nach etwa einer Minute wurde die Messung der Horizontalrichtungen unterbrochen und eine Messung der Schrägstrecke begonnen. Dazu wurde das Prisma erneut mit 5 – 10 cm und einer Frequenz von 1 Hz bewegt. Die Bewegungsrichtung war dabei radial zum Tachymeter (ABB 21).

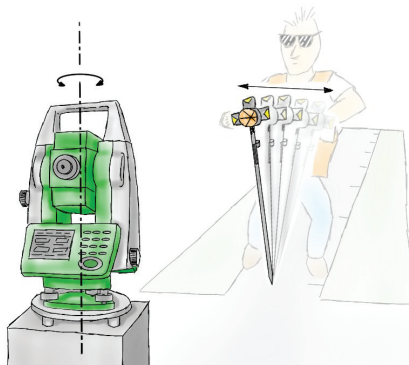


Abbildung 20: Messung der Horizontalrichtung

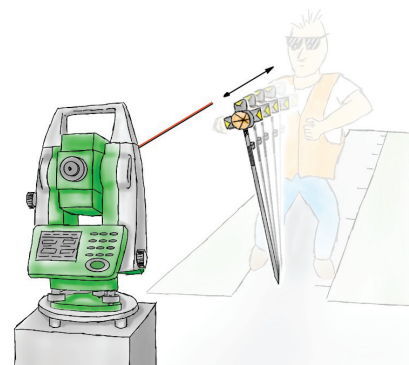


Abbildung 21: Messung der Schrägstrecke

4. Untersuchung der Messinstrumente

Die erzeugten Messwerte werden zunächst Tachymeterintern abgespeichert. Im Anschluss an die Messung müssen die Daten exportiert werden. Im LEICA TS15 Tachymeter befindet sich eine SD – Karte, die als Speichermedium dient. Beim Exportieren der Daten wird eine GSI – Datei erzeugt. Diese enthält die benutzten Punktnummern, sowie die Messwerte und die Koordinaten der gemessenen Punkte. Beim Exportieren der Daten können verschiedene Masken gewählt werden. Je nach Exportmaske werden unterschiedliche Daten ausgegeben. So können die benötigten Informationen der Messdatei individuell angepasst werden. Die ersten beiden Zeilen der exportierten Messdatei der 2. Testmessung sehen wie folgt aus:

```
*110001+0000000000002000 84..16+0000000010084108 85..16+0000000019427002 86..16+0000000000976228  
*110002+0000000AP00000001 21.322+0000000014403384 22.322+0000000011127425 31.326+0000000000089850  
58..6+00000000000.0000 59...+00000000000000003 71...+0000000000000000 81..46+0000000010152226  
82..46+0000000019370589 83..46+0000000000960399 87..16+0000000000000000 88..16+0000000000000000
```

Die erste Zeile liefert dabei die Punktnummer des Standpunktes und die dazugehörigen Koordinaten. In der zweiten Zeile ist der erste gemessene AutoPunkt abgebildet. Er setzt sich zusammen aus: Punktnummer (AP00000001), Horizontalrichtung (144,03384 gon), Vertikalwinkel (111,27425 gon), Schrägstrecke (8,9850 m), Additionskonstante (0,0000 mm), PPM-Wert (00003), Bemerkung (00000), Ostwert (1015,2226 m), Nordwert (1937,0589 m), Höhe (96,0399 m), Reflektorhöhe (00000 mm) und Instrumentenhöhe (00000 m).

Die GSI-16 Formatbeschreibung am Beispiel: 21.322+0000000014403384

- Stelle 1-2: Wortidentifikation
- Stelle 3: Erweiterung der Wortidentifikation
- Stelle 4: Kompensatorinformation
(0 = automatische Überwachung der Horizontierung 'aus'
3 = automatische Überwachung der Horizontierung 'ein')
- Stelle 5: 0 = Wert automatisch gemessen
1 = Wert wurde eingegeben
2 = Winkel: Hz-Korrektur wegen Stehachsschiefe 'ein'
Strecke: Korrektur bei Messung auf senkrecht stehendes Prisma
3 = Winkel: Hz-Korrektur wegen Stehachsschiefe 'aus'
4 = Berechnetes Resultat aus Funktion
- Stelle 6: Maßeinheiten
0 = Meter (letzte Stelle = 1 mm)
1 = Feet (letzte Stelle = 1/1000 ft)
2 = 400 gon
3 = 360 grad dezimal
4 = 360 grad sexagesimal
5 = 6400 mil

4. Untersuchung der Messinstrumente

6 = Meter (letzte Stelle = 1/10 mm)

7 = Feet (letzte Stelle = 1/10000 ft)

8 = Meter (letzte Stelle 1/100 mm)

Stelle 7: + = positiver Wert

Stelle 8: Messwert: 0000000014403384 = 144,03384 gon

Wortidentifikationen:

- 11 - Punktnummer
- 21 - Horizontalrichtung
- 22 - Vertikalwinkel
- 31 - Schrägstrecke
- 58 - Additionskonstante (1/10 mm)
- 59 - PPM - Wert
- 71 - sonstige Bemerkungen
- 81 - Ostwert E
- 82 - Nordwert N
- 83 - Höhe H
- 84 - Ostwert E_0 - als Referenz (nur bei Standpunkt)
- 85 - Nordwert N_0 - als Referenz (nur bei Standpunkt)
- 86 - Höhe H_0 - als Referenz (nur bei Standpunkt)
- 87 - Zielpunkt – oder Reflektorhöhe
- 88 - Instrumentenhöhe

[hochschule-bochum.de]

Die benutzte Exportmaske sieht keine Ausgabe eines Zeitstempels vor. Dies ist jedoch nötig, um jedem Messwert eine Zeit zuzuordnen, wann er erzeugt wurde. Neben dem Export einer GSI – Datei bietet das LEICA Tachymeter die Möglichkeit ein Datenbankfile zu erzeugen. Dieses File beinhaltet neben den Koordinaten der einzelnen Punkte auch einen Zeitstempel zu jedem Punkt. Dazu wird die Software LEICA GEOOFFICE benötigt. Mit dieser Software können die Messwerte in einem CSV – Format abgespeichert werden. Eine anschließende Zusammenführung der Zeitmarke und der Messwerte aus der GSI – Datei macht eine weitere Verarbeitung möglich.

Die Auswertung der Daten erfolgte im Anschluss mit der Software MATLAB der Firma THE MATHWORKS. Mit dieser Software lassen sich Messwerte und Zahlen mit Hilfe von Matrizen darstellen und grafisch ausgeben.

Zunächst wird die Messfrequenz überprüft. Dazu wird die Gesamtanzahl der Messwerte durch die gesamte Messzeit geteilt. Trotz eingestellten 10 Hz Messfrequenz, leistet das Tachymeter im Tracking – Modus nur 6,40 Hz mittlere Abtastfrequenz. Grund dafür ist die

4. Untersuchung der Messinstrumente

Auslösung der Streckenmessung. Wie unter 3.4.1 beschrieben, setzt sich die Streckenmessung aus Grob - und Feinmessung zusammen. Im Tracking – Modus wird zunächst eine Grobmessung ausgelöst. Dieser Wert wird mit der Feinmessung präzisiert. In diesem Messmodus wird der Wert der Grobmessung für einige weitere Folge-messungen beibehalten und die Werte der neu erzeugten AutoPunkte werden nur durch die Feinmessung bestimmt. Nach einer gewissen Zeit im Millisekundenbereich erfolgt eine erneute Grobmessung. Diese Grobmessung wird dann erneut auf die nächsten Messungen angebracht. Dieser Wechsel zwischen den Messmodi erfordert Zeit, sodass eine voreingestellte Messfrequenz von 10 Hz mit dem LEICA TS15 nicht erreicht werden kann.

Im Anschluss an diese Untersuchung werden die Messwerte mit MATLAB geplottet. Auf Grund der wackelnden Bewegung des Prismas wird eine periodische Schwingung deutlich. Während bei den Messwerten der Schrägstrecke direkt die Schwankungen im Zentimeterbereich sichtbar sind, müssen die Horizontalrichtungen erst in eine metrische Größe umgewandelt werden. Dies geschieht mit der Bogenformel:

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \rightarrow \quad \frac{\text{seitliche Auslenkung}}{\text{Schrägstrecke}} = \frac{\text{Horizontalwinkel}}{200 \text{ gon} / \pi}$$
$$\text{seitliche Auslenkung} = \frac{\text{Schrägstrecke} \cdot \text{Horizontalwinkel}}{200 \text{ gon} / \pi}$$

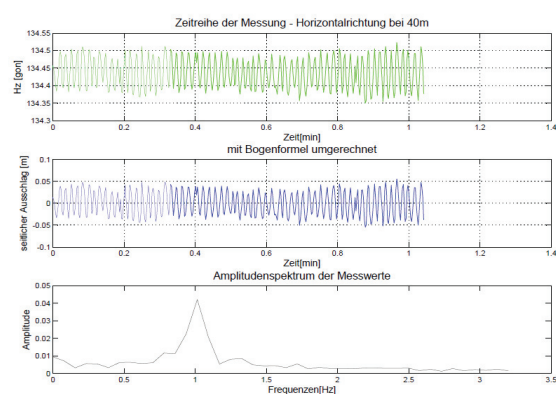
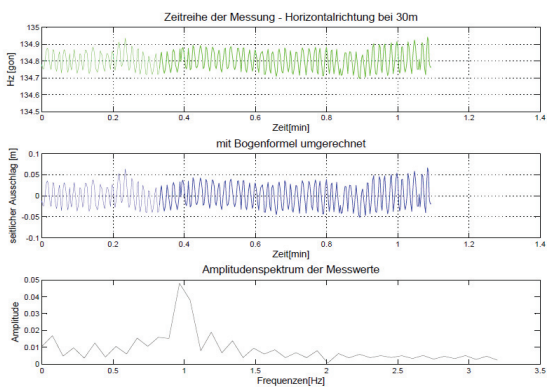
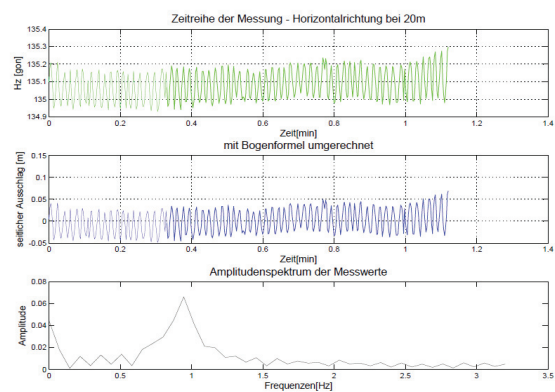
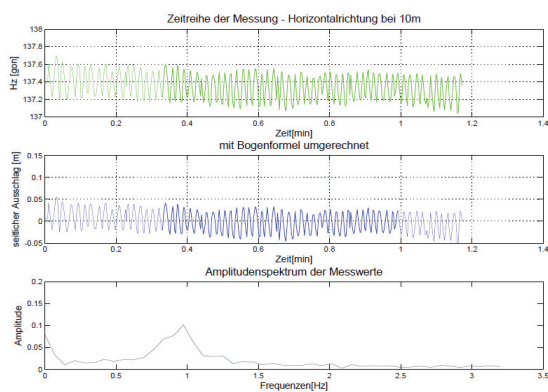
Durch die wackelnde Bewegung des Prismas werden sowohl die Schrägstrecke, als auch die Horizontalwinkel gleichzeitig verändert. Bei der Betrachtung der Horizontalrichtungsmessung soll der Einfluss der Streckenmessung eliminiert werden und bei der Berechnung mit der Bogenformel einfließen. Dazu wird die Schrägstrecke der einzelnen Messabschnitte (10 m, 20 m , ...) gemittelt. Ebenso müssen die Horizontalrichtungen (Messwerte aus der GSI-Datei) in Horizontalwinkel überführt werden. Die Richtungen sind lediglich die Teilkreisabtastungen des Tachymeters, ohne Bezug zu einer vorgegebenen Nullrichtung. Um diesen Bezug herzustellen, wird auch hierbei der Mittelwert der einzelnen Messabschnitte gebildet und vom originalen Messwert abgezogen. Das Ergebnis ist ein Winkel, der sowohl positiv als auch negativ um den Wert 0 („Null“) streut. Mit der gemittelten Strecke und den Horizontalwinkeln kann nun mit der Bogenformel eine seitliche Auslenkung berechnet werden. Die nachfolgenden Grafiken zeigen sowohl die originalen Messwerte der Richtungsmessung als auch die umgerechneten Auslenkungen mit der Maßeinheit Meter. Es ist zu erkennen, dass unabhängig von der Entfernung zum

4. Untersuchung der Messinstrumente

Tachymeter stets die 5 – 10 cm seitliche Schwankungen eingehalten, und sehr deutlich vom Tachymeter aufgezeichnet werden konnten.

Bei der Untersuchung der Schrägstreckenmessungen sind ähnliche Ergebnisse zu verzeichnen. Zur besseren Verdeutlichung wurden die Messwerte der einzelnen Messabschnitte um ihren Mittelwert befreit. Dies zeigt die einzelnen Auslenkungen in radialer Richtung. Auch hierbei sind die Messwerte im 5 – 10 cm Bereich.

Zur Überprüfung der simulierten Frequenz werden die Messwerte der einzelnen Abschnitte mit einer Frequenzanalyse untersucht. Dies liefert ein sogenanntes Powerspektrum (genauer im Abschnitt 5.1). Durch das manuelle Wackeln des Lotstabes und des Prismas wird eine periodische Schwingung erzeugt. Diese Schwingung ist relativ unkonstant und setzt sich aus mehreren überlagerten Frequenzen zusammen. Das Powerspektrum liefert, abhängig von der Abtastrate, die enthaltenen Frequenzen der Gesamtschwingung. Die Powerspektren der einzelnen Messabschnitte von Horizontalrichtungsmessung und Schrägstreckenmessung zeigt einen deutlichen Ausschlag im Bereich von 1 Hz. Das heißt, dass die simulierte Schwingung des Prismas mit nahezu 1 Hz erfolgreich war und, dass das TS15 Tachymeter in der Lage ist diese niederfrequente Schwingung zu erfassen.



4. Untersuchung der Messinstrumente

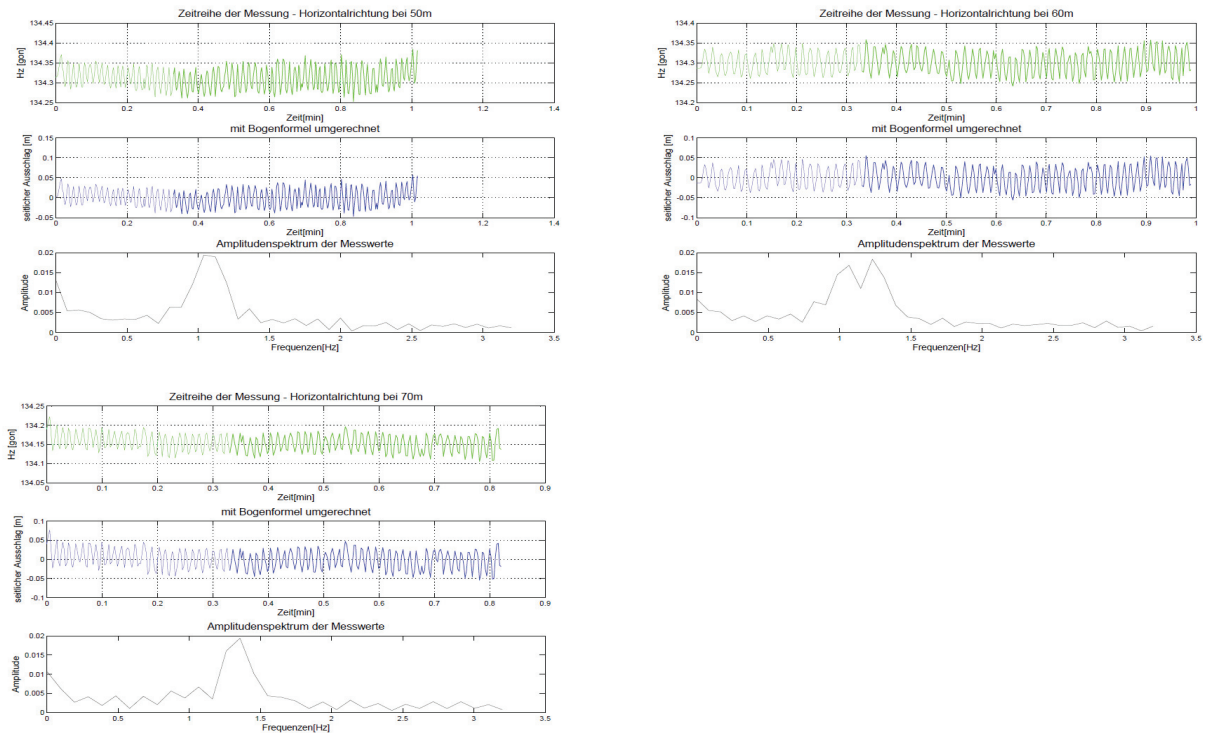
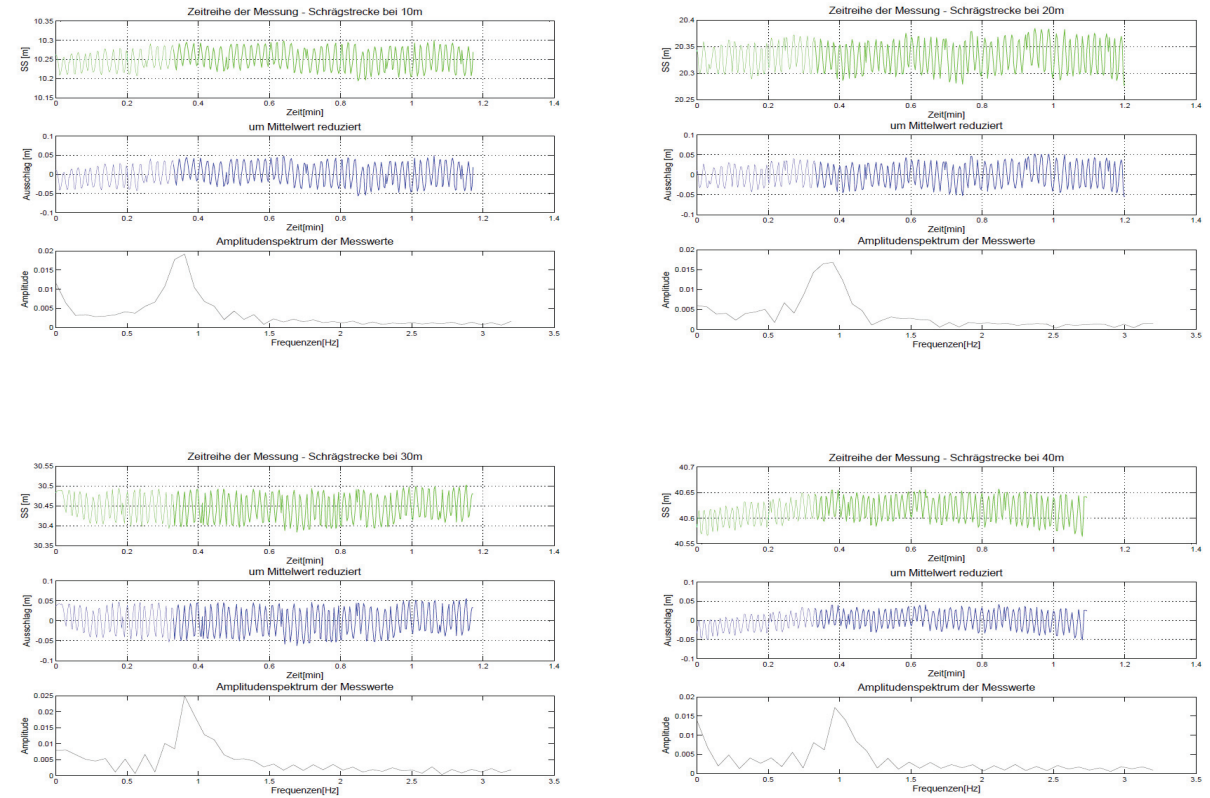


Abbildung 22: Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS15I und Spektralanalyse



4. Untersuchung der Messinstrumente

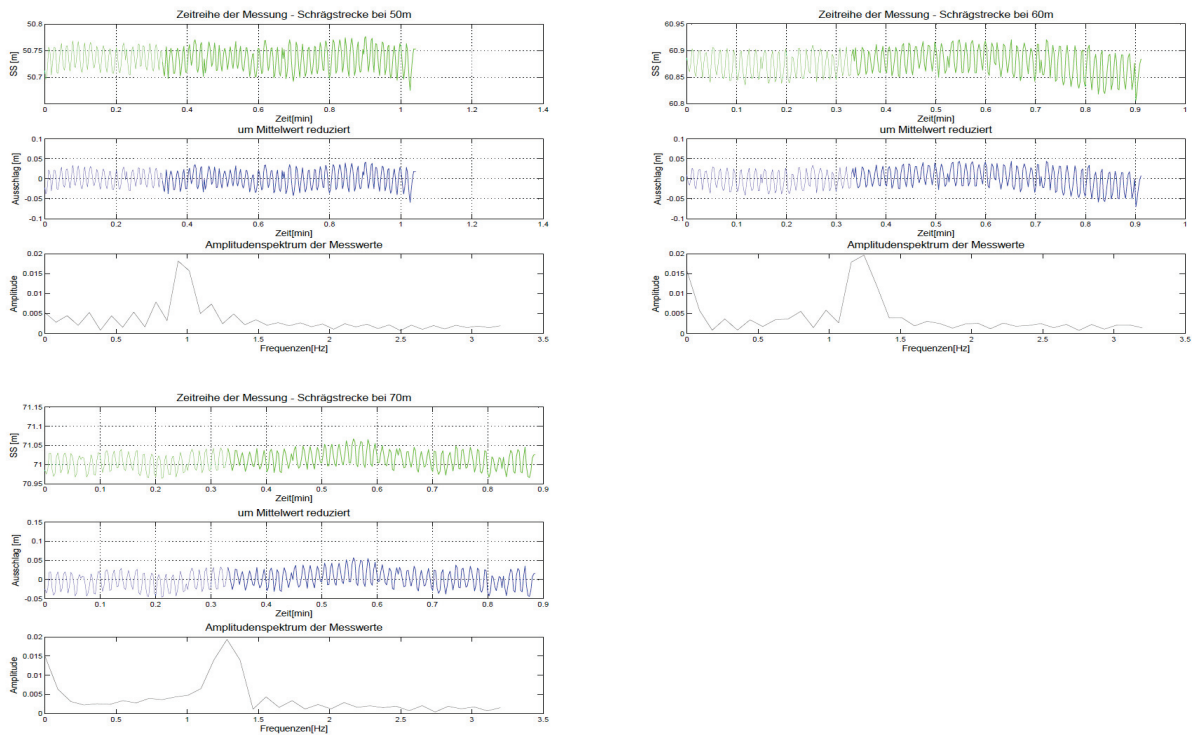


Abbildung 23: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS151 Tachymeter

3. Testmessung auf dem Messdach der Hochschule Neubrandenburg

Da die 2. Testmessung mit einem Prisma auf einem Lotstab stattfand, konnte nicht genau überprüft werden, ob die simulierten Ausschläge der Schwankungen auch von den Messwerten wiedergespiegelt wurden. Dabei sollte nicht nur das LEICA TS15, sondern auch das TS30 untersucht werden. Zur Steigerung der Präzision der simulierten Auslenkungen wurde auf den Lotstab verzichtet. Auch die Auslenkungen sollten bei der Folgemessung geringer ausfallen, um den Arbeitsbereich der Tachymeter zu überprüfen und festzustellen, ob auch kleinere Amplituden messbar sind.

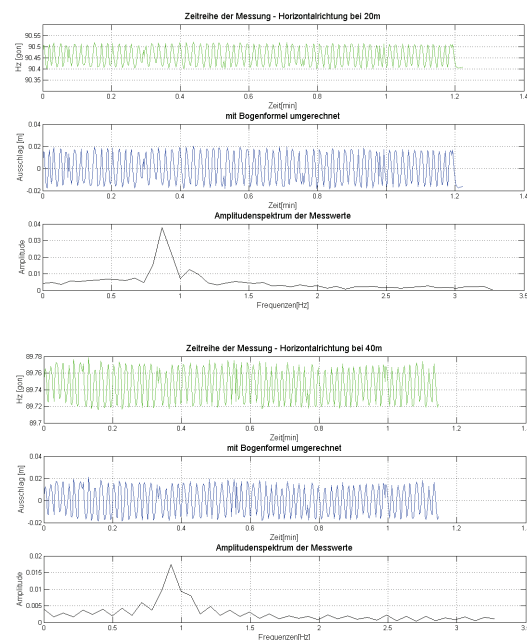
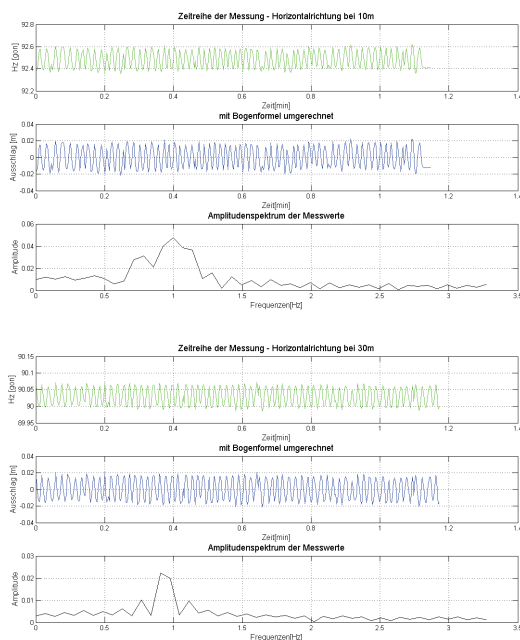


Abbildung 24: 3. Testmessung ohne Lotstab

4. Untersuchung der Messinstrumente

Die Messung wurde erneut auf ein geodätisches Rundprisma (GRP1) ausgeführt. Diesmal befand sich das Prisma am Boden auf einer karierten Unterlage mit markierten 'Anschlägen' für die Umkehrpunkte der erzeugten Schwingung (ABB 24). Die Anschläge hatten einen Abstand von 3 cm. Die Messung erfolgte ebenfalls in den einzelnen 10 m Abschnitten (10 m, 20 m, ..., 70 m). Es wurden zunächst eine Schwingung in radialer und im Anschluss in tangentialer Richtung erzeugt, um wie bei der 2. Testmessung einen Unterschied zwischen Streckenmessung und Richtungsmessung zu erhalten.

Als erstes wurde das LEICA TS15 Tachymeter überprüft. Die Messkonfigurationen waren die Gleichen wie bei der 2. Testmessung. Es wurde mit einer Abtastrate von 10 Hz, im Tracking- Modus mit eingelocktem Prisma gemessen. Nach Beendigung der Messung der einzelnen Messabschnitte wurden die Messdaten exportiert und erneut mit MATLAB ausgewertet. Die wahre Abtastrate von 10 Hz konnte erneut nicht eingehalten werden. Bei dieser Messung betrug sie 6,54 Hz. Die weitere Auswertung und die Plots der Horizontalrichtungen zeigen, dass die Schwingungen im Bereich von 3 – 4 cm liegen. Auch die simulierte Frequenz von 1 Hz wurde erneut detektiert. Die Ausschläge bei der Schrägstreckenmessung verdeutlichen auch die 3 – 4 cm Auslenkung. Bei den beiden längsten Streckenabschnitten 60 m und 70 m ist zu erkennen, dass auch Ausschläge von weniger als 3 cm erfassbar sind.



4. Untersuchung der Messinstrumente

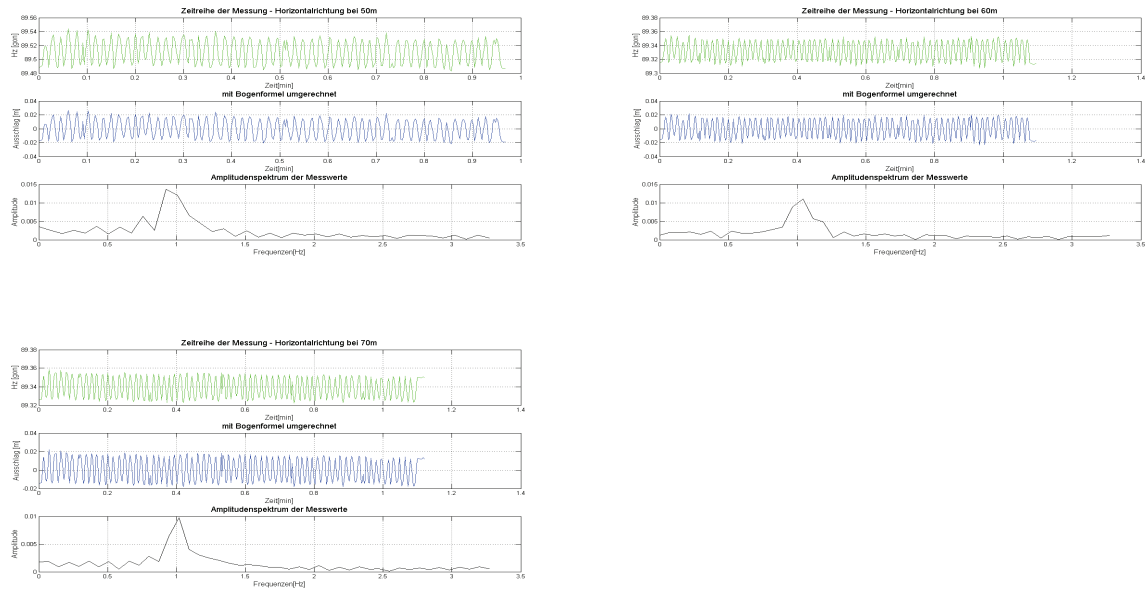
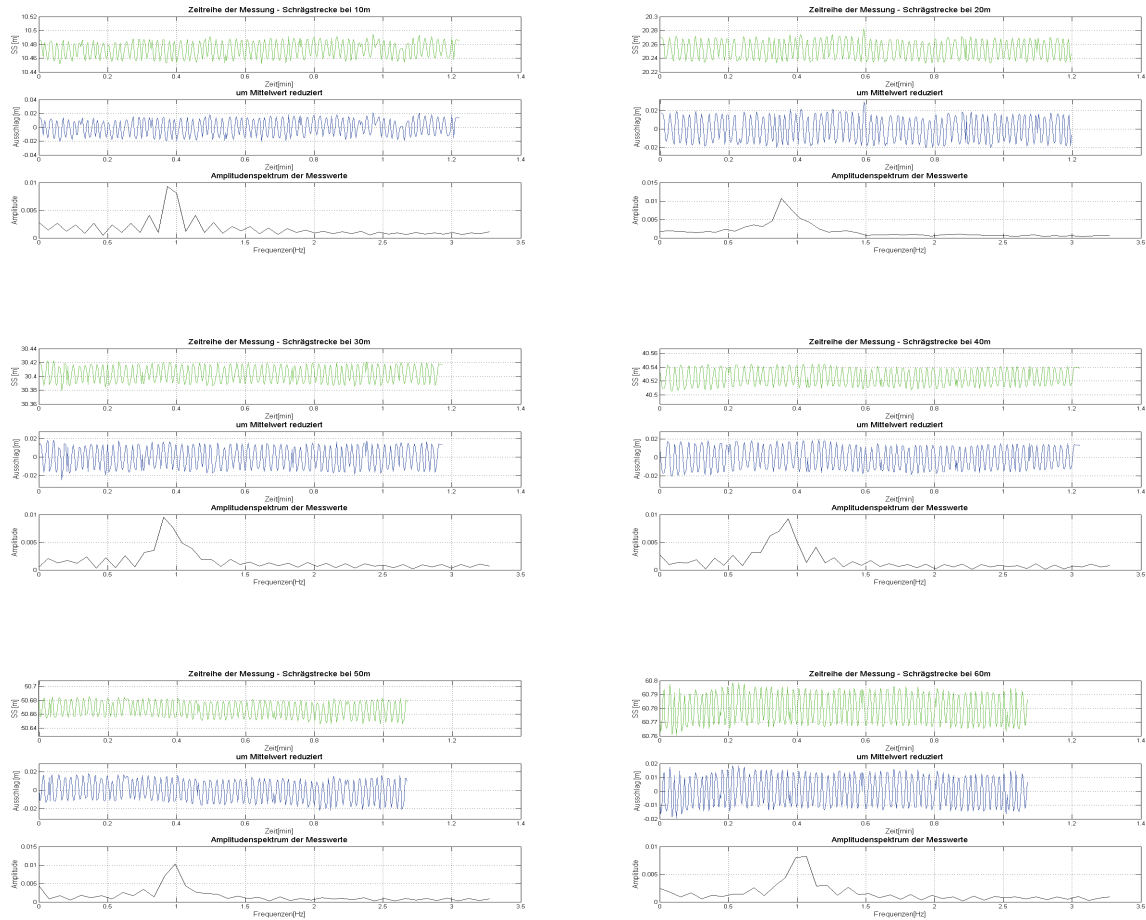


Abbildung 25: 2. Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS15I und Spektralanalyse



4. Untersuchung der Messinstrumente

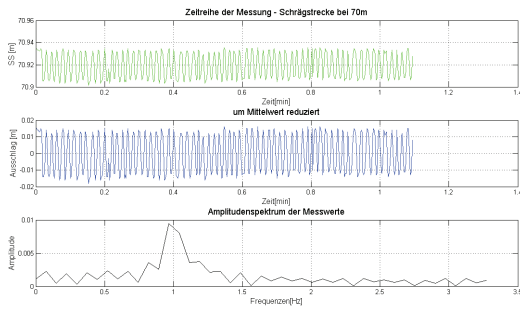


Abbildung 26: 2. Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS15I Tachymeter

Im Anschluss an die LEICA TS15 Messung wurden die Messinstrumente getauscht und die Überprüfung des LEICA TS30 durchgeführt. Auch hierbei wurde das Prisma mit dem Lock – Modus eingefangen und während der gesamten Messung verfolgt. Die Messung der AutoPunkte erfolgte mit dem Tracking – EDM – Modus unter einer Messfrequenz von 10 Hz. Die Messung erfolgte nach dem gleichen Prinzip. Dabei wurde das Prisma auf der karierten Unterlage von Hand zur Schwingung gebracht und vom Tachymeter erfasst. Die simulierten Ausschlägen waren erneut 3 cm, zunächst in radialer dann in tangentialer Richtung, bei einer Frequenz von ca. 1 Hz.

Die Auswertemethodik lief nach dem gleichen Schema ab. Im Anschluss an die Messung wurden die Messdateien als GSI – File und als Datenbankdatei exportiert. Zur Aufzeichnung und Übertragung der Daten wird bei dem TS30 eine CompactFlash Speicherkarte verwendet. Die exportierten Dateien wurden unter der Hilfe von LEICA GEOOFFICE zusammengeführt und anschließend mit MATLAB ausgewertet.

Zu Beginn erfolgte die Überprüfung der eingestellten Messfrequenz von 10 Hz. Die Berechnung mit Hilfe der Anzahl der Messwerte und dem gesamten Messzeitraum ergab im Tracking - Modus eine mittlere Frequenz von 4,41 Hz. Diese große Abweichung zum definierten Werte kann durch eine Datenlücke hervorgerufen werden. Dabei würde die Messzeit weiter verstreichen, aber keine Daten erhoben werden. Eine Untersuchung der Messdatei kann diese These widerlegen. Es ist dabei zu erkennen, dass stets 3 – 5 Messwerte die gleiche, sekundengenaue Zeitmarke haben. Eine Datenlücke liegt daher nicht vor. Ein weiterer möglicher Grund könnte auch hierbei das Umschalten von Grob - auf Feinmessung der Streckenmessung sein.

Die Auswertung der Strecken- und Horizontalrichtungsmessung ergab auch bei dem TS30, dass die simulierten Bewegungen erkannt wurden. Die Ausschläge von 2 – 4 cm sind in allen Messungen zu finden. Durch die geringere Aufzeichnungsrate sind die

4. Untersuchung der Messinstrumente

Powerspektren weniger eindeutig als beim TS15, dennoch sind die Peaks bei 1 Hz erkennbar. In der ersten Grafik sind die gemessenen Werte als blaue Kreuze geplottet. Dies zeigt, dass sich die Messwerte hauptsächlich an den Umkehrpunkten der Schwingung befinden. Bei höherer Abtastrate kann die Schwingung besser nachgebildet werden und das zugehörige Powerspektrum weist einen deutlicheren Peak auf.

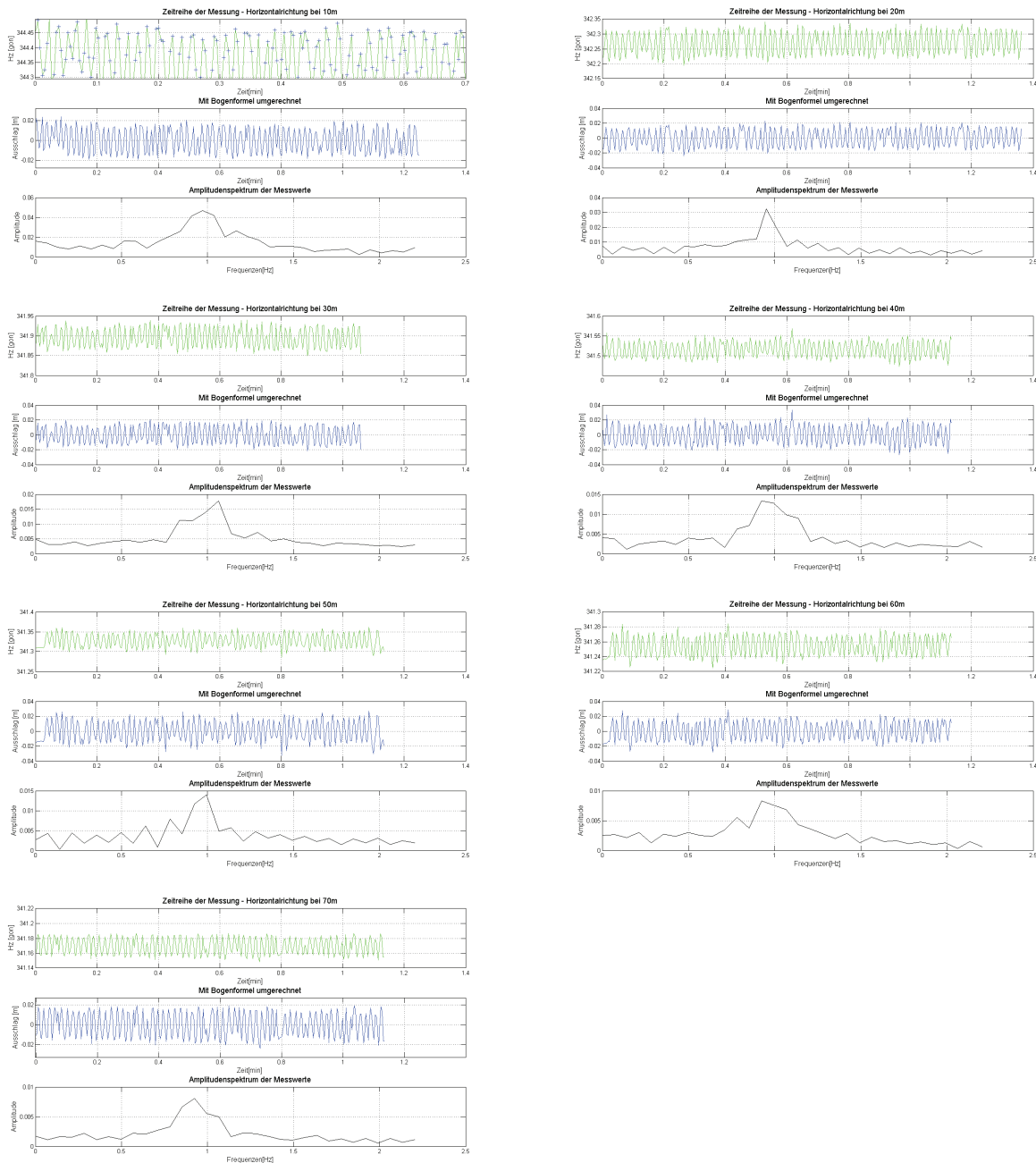


Abbildung 27: Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter

4. Untersuchung der Messinstrumente

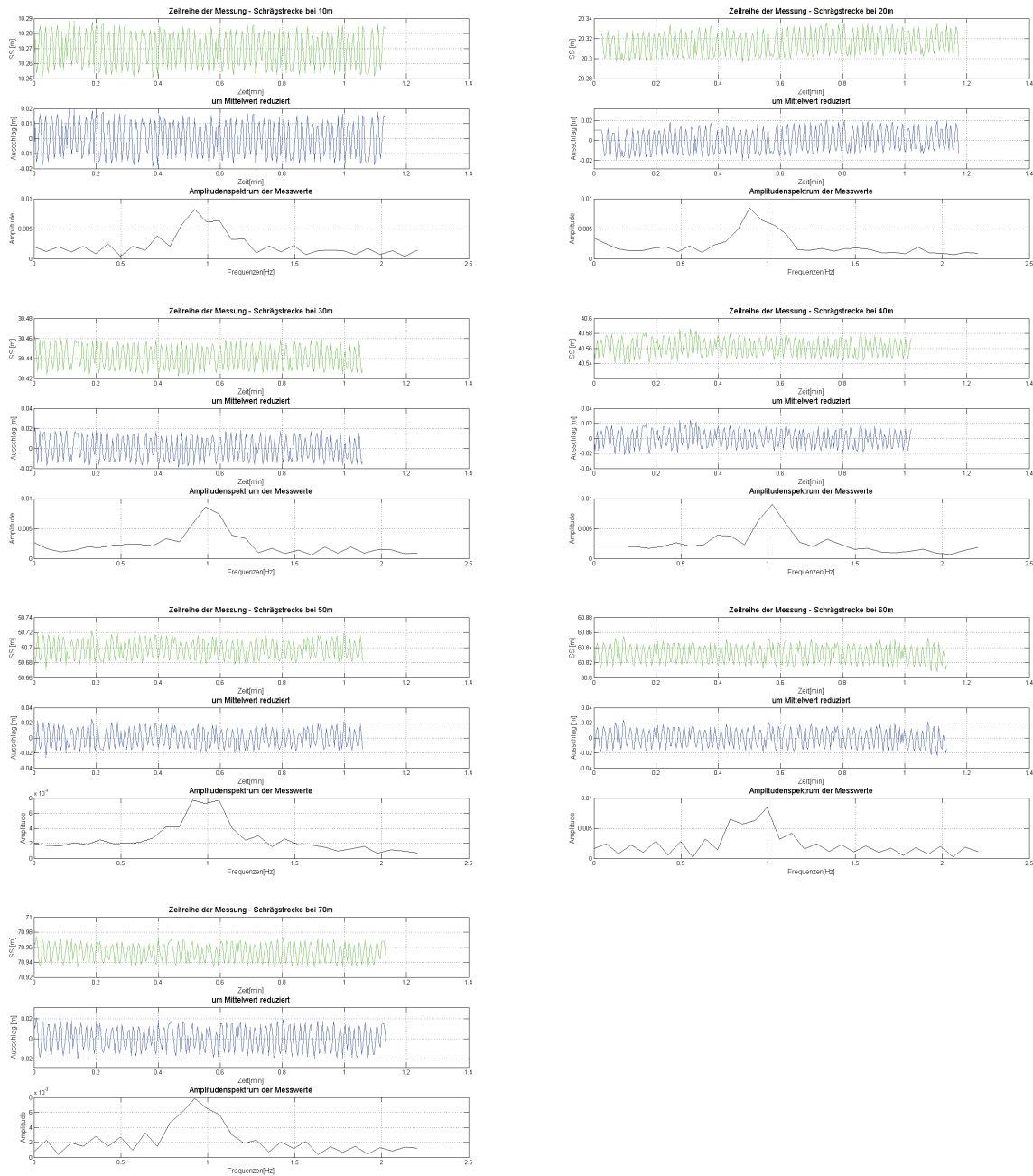


Abbildung 28: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter

Neben dem Tracking – Modus besitzt das LEICA TS30 noch den sogenannten Synchro – Track. Dies ist eine weitere Methode im AutoPunkte Messmenü. Durch die unterschiedlich schnellen Messungen von Richtungen und Strecken kann es im normalen Tracking – Modus zu Synchronisationsproblemen kommen. Dabei ist die EDM – Messung maßgebend für die Speicherung der Winkelmesswerte. In diesem Modus werden die Winkelmessungen nur bestimmten Distanzmessungen zugeordnet. Ein Bezug zur

4. Untersuchung der Messinstrumente

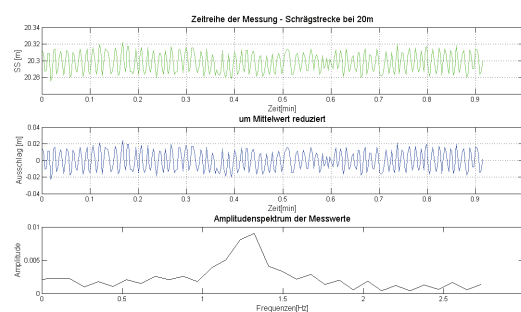
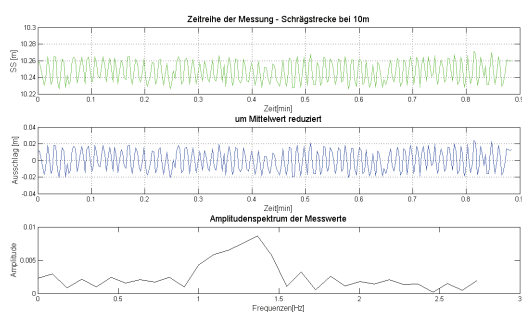
Zeitmarke besteht dabei nicht. Im Gegensatz dazu liefert der Synch - Track Messmodus ein synchronisiertes Messergebnis zwischen Winkelmessung und Distanzmessung. Dies geschieht durch eine lineare Interpolation der Winkelwerte. Maßgebend dafür ist die Zeitmarke der Streckenmessung.

[Leica TS30]

Die 3. Testmessung auf dem Messdach der Hochschule Neubrandenburg wurde mit dem LEICA TS30 mit Synchro – Track Modus wiederholt. Da bei dieser Untersuchung die Richtungsmessung und die Streckenmessung separat betrachtet werden, sollte der veränderte Messmodus keinen Einfluss auf die Messung haben.

Unterschiede zwischen Synchro – Track und normalem Tracking Modus könnten festgestellt werden, wenn sich das Prisma in einem 45° Winkel zur radialen Richtung verändert, sodass Messwertänderungen in der Richtungs- und in der Streckenmessung auftreten. Im späteren Einsatz bei der Überwachungsmessung der Marienkirche befinden sich die Standpunkte der Tachymeter radial zur Bewegungsrichtung des Gebäudes, sodass ebenfalls eine separate Betrachtung der Richtungen und Strecken erfolgen wird. Die Nutzung des Synchro – Track Messmodus ist daher irrelevant.

Bei der Messung auf dem Messdach wurde zunächst die eingestellte Aufzeichnungsrate von 10 Hz überprüft. Auch im Synchro- Track Modus konnte diese Frequenz nicht erreicht werden. Die Berechnungen ergaben eine wahre Messfrequenz von 5,46 Hz. Die simulierte Prismenschwingung von 3 – 4 cm wurde erneut erfolgreich aufgezeichnet. Zur weiteren Ausreizung des Messbereichs wurden die Auslenkungen bei den letzten Messungen (Messabschnitt: 60 m und 70 m) verkleinert. Anhand der karierten Unterlage war zu sehen, dass die Auslenkungen 1 – 2 cm betragen. Diese Werte sind auch nach der Auswertung mit MATLAB in den Plots zu erkennen. Nach der Frequenzanalyse sind ähnliche Ergebnisse wie im normalen Tracking- Modus zu sehen. Die simulierte Messung mit ca. 1 – 1,5 Hz wurde aufgezeichnet und ist als Peak im Powerspektrum zu erkennen.



4. Untersuchung der Messinstrumente

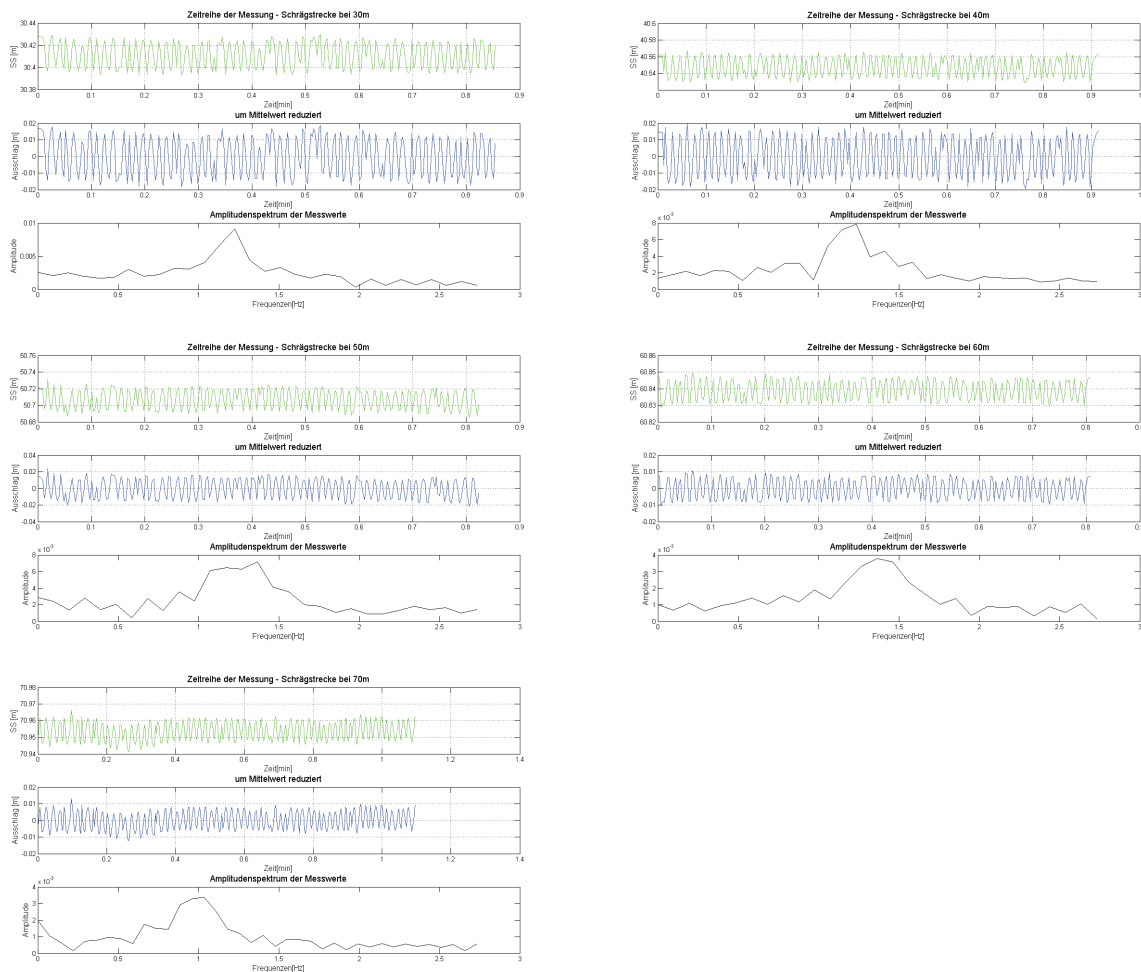


Abbildung 29: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter im Synchro-Track Modus

4.1.3 Fazit zu den Tachymetern

Die beiden LEICA Tachymeter TS15 I und TS30 können nach den Untersuchungen als geeignet festgelegt werden, um Bewegungen im Bereich von 1 - 2 Zentimetern aufzuzeichnen. Die erwartete Schwingung, des Kirchturms der Marienkirche in Neubrandenburg, von mehreren Zentimeter ist damit theoretisch feststellbar.

Auf Grund der wahren Messfrequenz von ca. 6,5 Hz (TS15) und ca. 5 Hz (TS30) können, nach NYQUIST – Kriterium, Schwingungen im niederfrequenten Bereich bis zu 2,5 Hz erfasst werden. Eine periodische Schwingung des Kirchturms, ausgelöst durch das

4. Untersuchung der Messinstrumente

Glockenspiel, mit einer höheren Frequenz ist jedoch unwahrscheinlich.

4.2 Neigungssensoren

In diesem Abschnitt werden verschiedene Neigungssensoren untersucht. Dazu gehören drei identische LEICA Nivel 210-C und ein DXL360S Sensor. Zur Überprüfung auf die Einsatzfähigkeit der unterschiedlichen Sensoren werden verschiedene Messungen durchgeführt. Dazu zählen unter anderem eine Langzeitmessung und eine Messung unter Schwingungsbedingungen.

4.2.1 Vorüberlegung

Der DXL360/S-Digital-Protractor ist ein digitaler Neigungsmesser. Er bietet die Möglichkeit Neigungen in zwei Achsen zu messen. Er besitzt eine digitale Anzeige um die Neigungen zu visualisieren. Das Display wechselt, je nach Verwendung, zwischen einem einachsigen oder einem zweiachsigen Anzeigemodus. In der einachsigen Verwendung können Neigungen um volle 360° , im zweiachsigen Modus im Bereich von $\pm 40^\circ$ gemessen werden. Die Auflösung der Anzeige leistet $0,01^\circ$ bei einer Genauigkeit von $\pm 0,08^\circ + 1\%$. Mit Hilfe eines Bluetooth-Moduls können die erzeugten Daten ins Kommunikationsprogramm HYPERTERMINAL übertragen werden. Dies geschieht mit einer maximalen Frequenz von ca. 2 Hz.

Mit den Herstellerangaben des DXL360/S lässt sich eine Vorabschätzung berechnen. Angenommen wird eine Einsatzhöhe von $r=45\text{ m}$ (im Oktogon der Marienkirche). Der Winkel $\alpha=0,01^\circ$ wird durch die Auflösung vorgegeben.

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \rightarrow \quad b = \frac{45\text{m} \cdot 0,01^\circ}{\frac{180^\circ}{\pi}} \quad \rightarrow \quad b = 0,08\text{ m}$$

Nach der Berechnung kann festgestellt werden, dass sich der Kirchturm der Marienkirche in der Höhe von 45 m, um einen Betrag von ca. 8 cm bewegen müsste, um in den Neigungswerten des DXL360/S einen Unterschied zu messen. Dieser Neigungssensor gilt daher als ungeeignet und wird für die weiteren Versuche und Probemessungen nicht weiter berücksichtigt.

4. Untersuchung der Messinstrumente

Die LEICA Nivel 200-Sensoren sind Neigungsmesser, die mit einem Flüssigkeitshorizont arbeiten. Dabei wird geräteintern ein Lichtstrahl ausgesendet und an einer Flüssigkeitsoberfläche totalreflektiert. Der reflektierte Strahl wird dann auf eine lichtempfindliche CCD-Oberfläche gelenkt. Dieser erfasst die Position des auftreffenden Lichtstrahls und ermittelt damit die Neigungsänderung. Da der Lichtempfänger fest mit dem Gehäuse verbunden ist, wirken sich die Neigungen in gleichem Maße auf ihn aus. Die Flüssigkeit hingegen richtet sich nach der lokalen Lotlinie am Messort. Nach einer gewissen Einschwingzeit ist sie exakt horizontal. Je nach Neigung des Nivel – Gehäuses wird der Lichtstrahl an einer anderen Position erfasst. Diese Methode erlaubt eine biaxiale Messung.

Die LEICA Nivel 200-Sensoren existieren in verschiedenen Ausführungen. Dazu zählen Nivel210 und Nivel220. Der Unterschied besteht darin, dass zur Datenübertragung und zur Kommunikation unterschiedliche Schnittstellen genutzt werden. Der Nivel 210 arbeitet mit einer RS232 – Schnittstelle. Dies ermöglicht lediglich die Anwendung von nur einem Neigungssensor. Im Gegensatz zum Nivel220, bei dem die RS485 – Schnittstelle genutzt wird. Bei dieser Übertragung können bis zu 32 Neigungssensoren aneinander geschaltet werden um ein Netzwerk aufzubauen. Das Buchstabenkürzel C spiegelt den Messbereich dieser Neigungssensoren wieder. Sie reichen von A = ± 1,51 mrad (± 0,087°) bis zu C = ± 3,00 mrad (± 0,172°). Die Genauigkeit ist hierbei an den Messbereich gekoppelt und reicht von A = ± 0,0047 mrad (± 0,97") bis zu C = ± 0,0471 mrad (± 9,72").

Die Vorabschätzung für das Messen in einer Höhe von 45 m und einer Auflösung von 0,206" (= 0,000057°) ergibt, dass mit den LEICA Nivel- Neigungssensoren eine Bewegung größer als 0,045 mm aufzuzeichnen wäre.

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \rightarrow \quad b = \frac{45\text{m} \cdot 0,000057^\circ}{\frac{180^\circ}{\pi}} \quad \rightarrow \quad b = 0,000045\text{m} \quad (b = 0,045\text{mm})$$

4.2.2 Testmessungen und Auswertung

Software zur Datenaufzeichnung

Für die Messungen mit den LEICA Nivel200-Sensoren stehen drei verschiedene Programme zur Verfügung, mit denen Daten aufgezeichnet werden können. Dazu gehören eine LEICA – Software, ein hochschuleigenes Tool und ein Programm, das aus einem hochschulinternen Forschungsvorhaben (DABAMoS) entstanden ist. Jedes dieser Programme bietet eigene Vorteile in ihrer Anwendung

Mit der mitgelieferten LEICA – Software *NivelTool.exe* (ABB 30) können die Nivel – Sensoren konfiguriert werden. Es können Einstellungen wie Name und Adresse des Sensors vorgenommen werden und eine Mittelwertberechnung kann definiert werden. Diese Software zeigt lediglich die momentanen Messwerte des Nivel – Sensors an. Eine Speicherfunktion der Werte ist nicht vorgesehen. Außerdem kann aus einer zuvor definierten Anzahl von Messwerten der Mittelwert ausgegeben werden. Eine weitere Funktion der Software ist die Kalibrierung des Neigungssensors. Es wird ein Messverfahren angewendet, bei dem der Neigungssensor in verschiedenen Positionen Daten erfasst. Diese Neigungsdaten werden Softwareintern abgespeichert und eine Fehlerkorrektur wird errechnet. Dieses Offset wird dann bei nächsten Messungen an die Messwerte angebracht. Die LEICA – Software *NivelTool.exe* eignet sich für Neigungsmessungen im statischen Bereich und zur Kalibrierung von LEICA Nivel – Sensoren. Für eine Dauermessung bei Monitoringaufgaben ist sie nicht geeignet.

Die hochschuleigene Software *Nivel210.exe* (ABB 31) ist eine Entwicklung, speziell für die Bedürfnisse dieser Masterarbeit. Sie bietet die Möglichkeit Daten anzeigen zu lassen und bei Bedarf in einem Textfile abzuspeichern. Die Datenaufzeichnung läuft mit einer Frequenz von 4 Hz.

Die DABAMoS – Software *OpenADMS* ist eine Entwicklung speziell für Monitoringanwendungen. Sie bietet eine Datenaufzeichnung, Speicherung, Auswertung und Alarmierungsfunktion für verschiedene geodätische und geotechnische Sensoren und Messinstrumente u.a. auch für LEICA Nivel - Sensoren. Die Software arbeitet webbasiert, sodass die Messdaten von jedem internetfähigen Computer, Tablet oder Smartphone abgerufen werden können.

4. Untersuchung der Messinstrumente

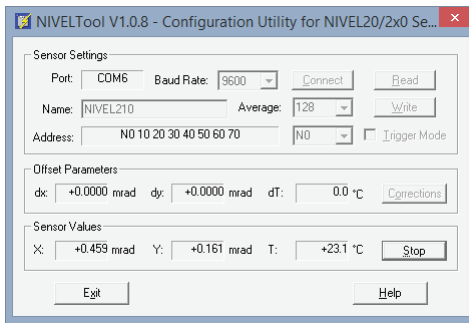


Abbildung 30: NivelTool.exe

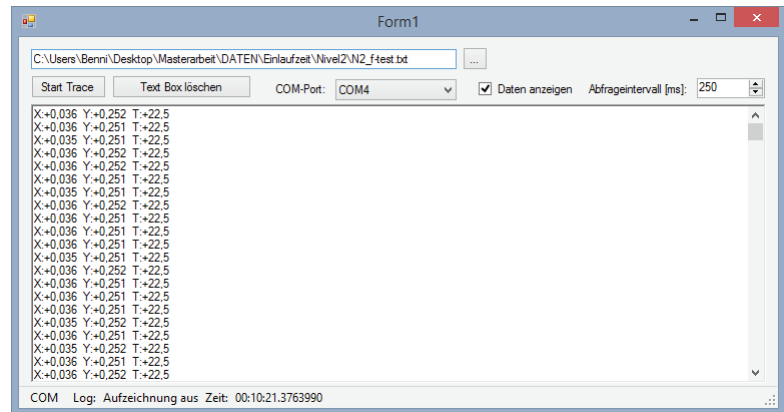


Abbildung 31: Nivel210.exe

Testmessung zur Bestimmung eines Driftverhaltens

Die LEICA Nivel Neigungssensoren sollen für einen Einsatz im Monitoring untersucht werden. Da solche Sensoren oft am Messobjekt fest installiert werden und dauerhaft messen, ist es wichtig zu wissen, ob sich die Messwerte bei einer Dauermessung verändern. Verschiedene Messsensoren besitzen mechanische Bauteile, die im Messprozess eine Bewegung ausüben. Bei dieser Bewegung wird häufig Wärme freigesetzt, die dazu führt, dass sich die Bauteile bei einer längeren Messzeit anders verhalten, als bei einem kurzen Einsatz. Tritt solch ein zeitlich bedingter Fehler in der Messung auf, wird von einem Driftverhalten gesprochen. Da bei den LEICA Nivel-Sensoren keine beweglichen Bauteile existieren, wird kein Driftverhalten erwartet. Der Hersteller gibt jedoch eine Nullpunktstabilität von $<0,00471\text{mrad}/^{\circ}\text{C}$ an. Um dies zu untersuchen, erfolgt eine Testmessung unter Laborbedingungen in der Hochschule Neubrandenburg. Im Mess – und Kalibrierlabor befinden sich Messpfeiler, die separat vom restlichen Gebäude gegründet sind. Erschütterungen und Bewegungen des Gebäudes wirken sich daher nicht auf die Messpfeiler aus. Das Labor wird mittels Klimaanlage auf eine konstante Temperatur von 20°C gehalten.

Auf einem der Messpfeiler wird ein LEICA Dreifuß mit einer Halterung für einen Nivel Neigungssensor befestigt. Mit der Software *Nivel210.exe* werden die Daten für einen Zeitraum von ca. 24 h mit einer konstanten Frequenz aufgezeichnet. Im Anschluss werden sie mit der Software MATLAB ausgewertet und visualisiert.

Abbildung 32 zeigt das Driftverhalten des Nivel „1“. Die Messzeit beträgt ca. 25 h mit einer Frequenz von 4 Hz. Die Messung startete um ca. 15.30Uhr. In den ersten 5 Stunden ist im X – Wert ein erhöhtes Rauschen der Messwerte zu erkennen. Die Y – Werte hingegen

4. Untersuchung der Messinstrumente

führen in dieser Zeit einen Anstieg aus. Nach 15 Stunden, gegen 06.00Uhr, sind erneut größere Streuungen vertreten. Die Neigungsstreuungen treten vermehrt in den X – Werten auf. Diese spiegeln eine Bewegung in Nord-Süd-Richtung wieder. Vermutlich hat das erhöhte Verkehrsaufkommen auf der Rostocker Straße im Norden der Hochschule einen Einfluss auf die Messwerte. Die Werte für die X – Neigung befinden sich in einem Bereich von ca. 0,005 mrad (= 1,03") mit einer Standardabweichung über die gesamte Zeit von 0,0009 mrad (= 0,186"). Die Y – Werte befinden sich in einem Bereich von ca. 0,01 mrad (= 2,06") mit einer Standardabweichung von 0,0021 mrad (= 0,427"). LEICA gibt die Genauigkeit des Nivel210-C mit einer Standardabweichung von 0,0471 mrad (= 9,72") an. Diese wurde jedoch bei fest installiertem Sensor und unter Laborbedingungen deutlich unterschritten. Die mit dem Nivel gemessene Temperatur beträgt recht konstante 22,5°C. Auf Grund dieser Abweichung zu 20,0°C ergibt sich eine theoretische Nullpunktstabilität von 0,0118 mrad. Der Anstieg der Y – Messwerte beträgt ca. 0,01 mrad. Um herauszufinden, ob diese Änderung der Messwerte einer wahren Neigungsänderung entspricht, müsste eine zusätzliche Referenzmessung mit einer Präzisionslibelle stattfinden. Diese Messung würde Aufschluss darüber geben, ob sich nur die Messwerte des Sensors auf Grund der Nullpunktstabilität ändern, oder ob sich tatsächlich eine Neigung des Messpfeilers oder des Dreifußes ergibt.

In *Abbildung 33* ist das Driftverhalten des Nivel „2“ zu sehen. Die Messung beginnt um 14.00 Uhr und verläuft 24 h. Auch hierbei sind in den ersten Stunden Abweichungen von einem geradlinigen Kurvenverlauf zu erkennen. In den Nachtstunden sind nahezu keine Bewegungserscheinungen festzustellen. Erst nach ca. 17 h, gegen 07.00 Uhr streuen die Neigungswerte etwas mehr. Dabei sind die gesamten X – Neigungen stets in einem Bereich von 0,003 mrad (= 0,62") mit einer Standardabweichung von 0,0008 mrad (= 0,17"). Die Y – Neigungen schwanken in einem Bereich von ca. 0,004 mrad (= 0,83") mit einer Standardabweichung von ebenfalls 0,0008 mrad (= 0,17"). Auch bei dem Neigungssensor Nivel „2“ wurde die erwartete Herstellerangabe der Standardabweichung deutlich unterschritten. Die Temperaturmessung ergibt einen konstanten Verlauf von 22,5°C, was zu einer Nullpunktstabilität von ebenfalls 0,0118 mrad führen würde. Das aufgezeichnete Driftverhalten befindet sich innerhalb dieses theoretischen Wertes. Es ist auch hierbei nicht ohne eine Referenzmessung festzustellen, ob dieses Driftverhalten aus der Stabilität des Nullpunktes des Neigungssensors entsteht, oder ob eine tatsächliche Neigungsänderung auftritt.

4. Untersuchung der Messinstrumente

Das Driftverhalten des Nivel „3“ befindet sich in *Abbildung 34*. Die Spanne der X – Werte beträgt ca. 0,006 mrad (= 1,24"), mit einer Standardabweichung von 0,0012 mrad (= 0,25"). Die Y – Werte befinden sich in einem Bereich von 0,005 mrad (= 1,03") mit einer Standardabweichung von 0,0009 mrad (= 0,18"). Die Langzeitmessung startet um 18.00 Uhr. Nach ca. 3h, gegen 21.00 Uhr, streuten beide Werte weniger und ein konstanter Verlauf der Neigung wird deutlich. Nach 11h, gegen 05.00 Uhr tritt ein erneutes Rauschen der Messwerte auf. Die Neigung in X erfährt dabei einen leichten Anstieg. D.h. der Messpfeiler mit dem montierten Nivel – Sensor scheint sich leicht nach Norden zu neigen. Nach einer Messzeit von ca. 17h, gegen 11.00 Uhr, tritt eine Änderung in der Temperatur auf. Zum gleichen Moment ist ein Sprung in den Y – Werten zu erkennen. Dies macht deutlich, welchen Einfluss die Temperatur auf die gemessenen Neigungswerte hat.

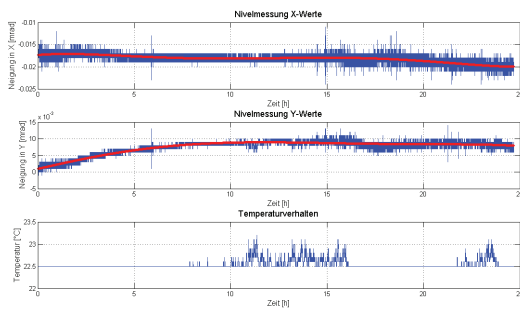


Abbildung 32: Driftverhalten Nivel-1

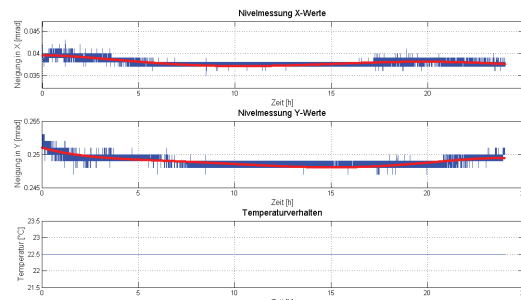


Abbildung 33: Driftverhalten Nivel-2

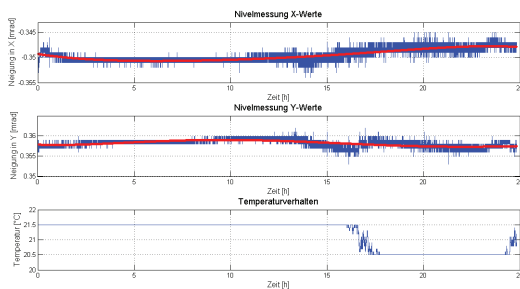


Abbildung 34: Driftverhalten Nivel-3

Testmessung zum Einschaltverhalten

Elektronische Sensoren haben ein spezielles Verhalten, kurz nach dem Einschalten. Es kann einen kleinen Moment dauern, bis die benötigte Betriebsspannung im Sensor aufgebaut ist. Während diesem Moment können die erzeugten Messwerte nicht dem regulären Ergebnis entsprechen. Daher empfiehlt es sich, nicht die ersten Messwerte für eine Auswertung zu berücksichtigen, sondern ein gewisses Einlaufverhalten abzuwarten.

4. Untersuchung der Messinstrumente

Um dieses Einlaufverhalten zu untersuchen, werden die LEICA Nivel200-Sensoren auf einem Messpfeiler des Kalibrierlabors der Hochschule Neubrandenburg montiert und mit den nötigen Kabeln an einen Auswerte - PC angeschlossen. Die Stromverbindung des Nivel – Sensors wird zunächst noch nicht verwendet. Nach dem Starten der entsprechenden Software, *Nivel210.exe* zum aufzeichnen der Daten, wird die Stromverbindung hergestellt und die Datenaufzeichnung mit einer Frequenz von 4 Hz begonnen. Die Messdauer beträgt etwa 15 Sekunden, um eventuelle Datenschwankungen zu erkennen. Der Prozess des Aus- und wieder Anschaltens wird 20 mal wiederholt um ein Einlaufverhalten festzustellen. Um Erschütterungen am Sensor zu vermeiden und dadurch die Messwerte zu verfälschen, sollte die Stromverbindung nicht direkt am Sensor getrennt werden, sondern am anderen Ende des Kabels. Die folgenden Grafiken zeigen das Einlaufverhalten direkt nach dem Einschalten der Nivel – Sensoren. Es ist zu erkennen, dass kein bestimmtes Verhalten festzustellen ist. Die Sensoren liefern vom ersten Messwert an, nutzbare Ergebnisse. *Abbildung 35* zeigt das Verhalten des Nivel „1“, in *Abbildung 36* ist das Verhalten des Nivel „2“ und in *Abbildung 37* das des Nivel „3“ zu sehen. Die Neigungssensoren liefern keine erhöhten Peaks in den ersten Messwerten.

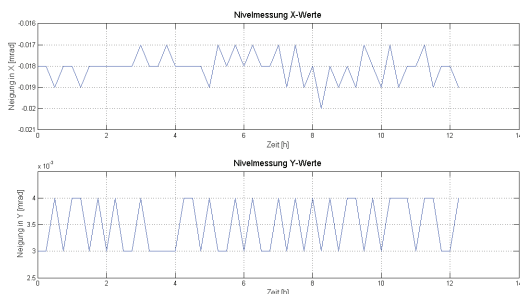


Abbildung 35: Einschaltverhalten Nivel-1

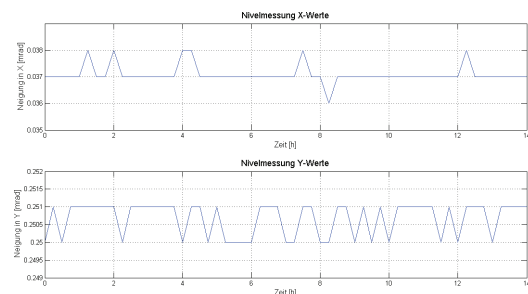


Abbildung 36: Einschaltverhalten Nivel-2

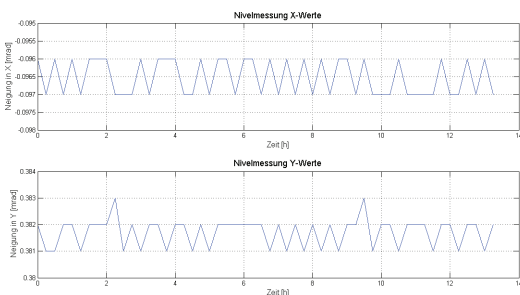


Abbildung 37: Einschaltverhalten Nivel-3

4. Untersuchung der Messinstrumente

Testmessungen zur Offsetbestimmung

Ein Offset bei einem Neigungsmesser bedeutet, dass die beiden Achsen für die Neigungsmessung nicht exakt horizontal verlaufen. Bei einer idealisierten, horizontalen Unterlage sollte der Neigungssensor eine Neigung von 0,000 mrad anzeigen. Ist dies nicht der Fall, kann von einer Ungenauigkeit in den Achsen ausgegangen werden. Um dies zu überprüfen, wird eine Messung in zwei Lagen durchgeführt. Dazu werden in der ersten Lage Neigungswerte erfasst. Im Anschluss wird der Neigungssensor um 180° um die vertikale Achse gedreht und erneut gemessen (ABB 38 und 39). Bei einem idealen Untergrund und idealen Achsen, ändern sich die Neigungswerte nicht. Anderenfalls wird in der zweiten Lage der doppelte Fehler gemessen. Mit der Formel:

$$\text{Offset}_{\text{Neigung}} = \frac{\text{Messung}_{\text{Lage I}} + \text{Messung}_{\text{Lage II}}}{2}$$

wird der Fehler der Achsen bestimmt. Dieser Wert wird an alle folgenden Messungen als Korrektur angebracht, um den Fehlereinfluss zu beseitigen.

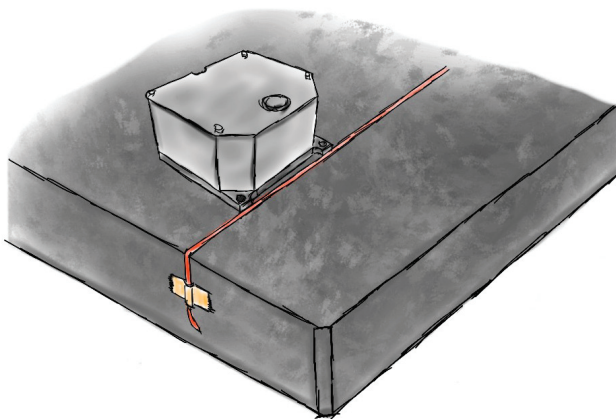


Abbildung 38: Lage I der Offsetbestimmung

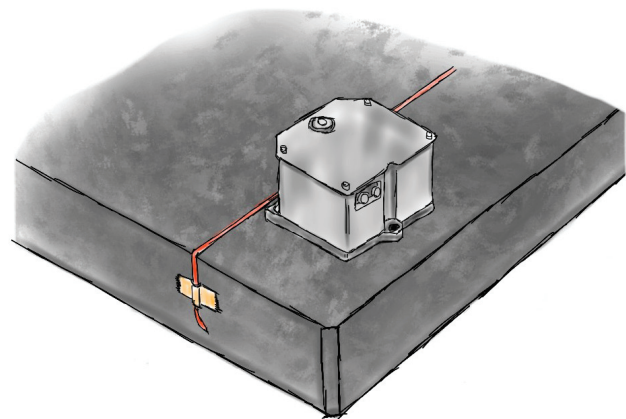


Abbildung 39: Lage II der Offsetbestimmung

Zur Überprüfung des Offsets wird eine Unterlage, von der Dimension 200 mm im Durchmesser, mit einer Ebenheit von 0,001 mm benötigt. Das bedeutet, dass jede Unebenheit des Untergrundes zwischen zwei Ebenen mit einem lotrechten Abstand von 0,001 mm sein soll. Für die Offsetbestimmung wird zunächst die Granitplatte der Hochschule Neubrandenburg genutzt. Sie besitzt in ihrer Gesamtheit (2000 x 1000 mm) eine Ebenheit von 0,008 mm.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der ersten Offsetbestimmungen. Zur Steigerung der Genauigkeit wurden jeweils fünf Messungen je Lage durchgeführt und die Messwerte im

4. Untersuchung der Messinstrumente

Anschluss gemittelt. Die Neigungen im unteren Bereich der Tabelle sind die verbesserten Messwerte. Sie spiegeln die Neigung der Unterlage wieder. Es ist zu erkennen, dass die Offsets sehr unterschiedlich ausfallen, dennoch kann mit bekanntem Offset eine genaue Neigung bestimmt werden.

Instrument	X [mrad]		Y [mrad]		Offset	
	Lage I	Lage II	Lage I	Lage II	X [mrad]	Y [mrad]
Nivel 1	0,0578	-0,0158	-0,1572	0,1264	0,0210	-0,0154
Nivel 2	0,0923	0,0138	-0,1776	0,1038	0,0531	-0,0369
Nivel 3	0,1241	0,0553	-0,1351	0,1478	0,0897	0,0064

Kontrolle:	Neigung in X, verbessert		Neigung in Y, verbessert	
Nivel 1	0,0368	-0,0368	-0,1418	0,1418
Nivel 2	0,0393	-0,0393	-0,1407	0,1407
Nivel 3	0,0344	-0,0344	-0,1415	0,1415

Tabelle 5: Offsets der Nivel- Neigungsmesser, bestimmt am Granittisch

Diese Methode der 2-Lagenmessung ist jedoch anfällig für Fehler. Es ist notwendig, dass die benutzte Unterlage frei von Verunreinigungen ist, denn durch das wiederholte Aufnehmen und Absetzen des Sensors können Ungenauigkeiten entstehen. Ein weiteres Problem stellt die Ebenheit der Unterlage dar. Durch die Dreipunktaufgabe des Sensors und dem Messen in zwei Lagen können Unebenheiten des Untergrundes eine Neigungsänderung zur Folge haben (ABB 40). Eine solche Unebenheit von 8µm ergibt bei einer Gehäuselänge von 95mm eine Neigungsänderung von 0,084 mrad (= 17,37").

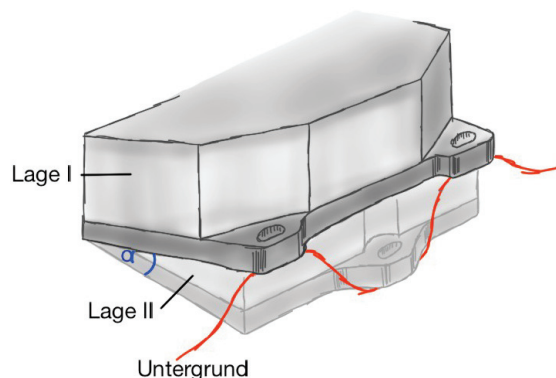


Abbildung 40: Fehler bei der 2-Lagenmessung

Zur Bestimmung der Offsets wird der Test wiederholt. Dazu wird nicht die Granitplatte als Unterlage genutzt, sondern ein sogenannter Gyro Tester (ABB 41). Mit diesem Gyro Tester kann die Messung in zwei Lagen erfolgen, ohne den Neigungssensor anzuheben

4. Untersuchung der Messinstrumente

und wieder abzusetzen. Dieses Verfahren soll eine Steigerung der Genauigkeit begünstigen. Der Gyro Tester besitzt eine mechanisch verstellbare Stehachse mit einer um jeweils 90° versetzten Arretierung. Eine exakte Rotation um 180° für die Messung in zwei Lagen ist damit möglich. Zur Horizontierung der beiden anderen Achsen des Gyro Testers sind an jeder Achse vier Röhrenlibellen mit einer Libellenangabe von $25''$ angebracht. Diese Angabe besagt, dass bei einer Winkeländerung von $25''$, die Libellenblase einen Weg von 2 mm zurücklegt. Bei einer Einspielgenauigkeit von $2/10$ ist damit eine Genauigkeit von $5''$ erreichbar. Zur besseren Horizontierung und zur Beseitigung eines eventuellen Taumelns um die Stehachse wurde auf die Arbeitsplatte eine Maschinenlibelle mit einer Libellenangabe von $10''$ positioniert. Mit der entsprechenden Einspielgenauigkeit kann die Stehachse (Rotationsachse) mit einem Winkel von $2''$ lotrecht eingestellt werden.

Die beiden anderen Rotationsachsen des Gyro Testers sind mit Schrittmotoren einstellbar. Die Schrittmotoren können im Dauerbetrieb laufen und eine Rotation von 360° durchführen oder sie können in kleinen Intervallen verwendet werden um die Libellen einzuspielen. Für die 2-Lagen Messung mit dem LEICA Nivel 210 werden zunächst die beiden motorisierten Achsen des Gyro Testers horizontiert. Anschließend wird der Neigungssensor positioniert und die LEICA *NivelTool.exe* gestartet. Die Software durchsucht selbstständig die COM-Schnittstellen des Computers und stellt eine Verbindung zum Nivel210 her. Danach wird die erste Messung in der ersten Lage gemacht. Im Anschluss wird der Gyro Tester um 180° um seine Stehachse gedreht und die Messung in der zweiten Lage kann durchgeführt werden. Nach zehn Messungen in beiden Lagen wird das Offset für alle drei getesteten Nivels berechnet (*Tabelle 6*).

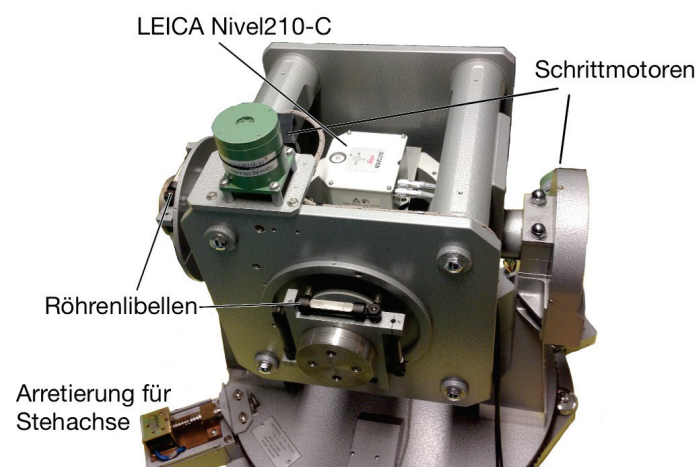


Abbildung 41: Gyro Tester

4. Untersuchung der Messinstrumente

Instrument	X [mrad]		Y [mrad]		Offset	
	Lage I	Lage II	Lage I	Lage II	X [mrad]	Y [mrad]
Nivel 1	0,2870	0,3522	0,0585	0,0874	0,3196	0,0730
Nivel 2	0,3864	0,4556	0,0083	0,0390	0,4210	0,0237
Nivel 3	0,9506	1,0137	0,1720	0,1950	0,9822	0,1835
Kontrolle:	Neigung in X, verbessert		Neigung in Y, verbessert			
Nivel 1	-0,0326	0,0326	-0,0145	0,0145		
Nivel 2	-0,0346	0,0346	-0,0154	0,0154		
Nivel 3	-0,0316	0,0316	-0,0115	0,0115		

Tabelle 6: Offsets der Nivel- Neigungsmesser, bestimmt am Gyro Tester

Zur Bestimmung des Offsets wird die Formel:

$$\text{Offset}_{\text{Neigung}} = \frac{\text{Messung}_{\text{Lage I}} + \text{Messung}_{\text{Lage II}}}{2}$$

benutzt. Um die offsetbefreiten Messwerte zu erhalten, wird das Offset vom jeweiligen Messwert abgezogen. Bei einer fehlerfreien Messung entspricht die erste Lage dem Negativen der zweiten Lage.

$$\begin{aligned} \text{Messung}_{\text{Lage I}} &= -\text{Messung}_{\text{Lage II}} \\ \text{Messung}_{\text{Lage I}} - \text{Offset}_{\text{Neigung}} &= -(\text{Messung}_{\text{Lage II}} - \text{Offset}_{\text{Neigung}}) \end{aligned}$$

Testmessung zur Schwingungsdetektion

LEICA Nivel Neigungssensoren sind vorwiegend zur Bestimmung statischer Neigungen und Schiefstellungen von Messobjekten geeignet. Da bei Monitoringaufgaben auch Bewegungen erfasst werden müssen, soll hier untersucht werden, ob sich ein LEICA Nivel210 zur Erfassung von Schwingungen eignet. Dies geschieht mit Hilfe eines Schwingungserzeugers der Hochschule Neubrandenburg (ABB 42).



Abbildung 42: Schwingungserzeuger

4. Untersuchung der Messinstrumente

Der Schwingungserzeuger lässt sich für Frequenzen von 3 Hz bis 75 kHz benutzen. Mit Hilfen von Drehreglern kann die gewünschte Frequenz eingestellt werden. Diese wird dann von dem gelben Bauteil (*ABB 42*) mit einer Hubbewegung umgesetzt. Die Intensität des Hubs („Master Gain“) kann ebenfalls mit einem Regler eingestellt werden. Im niederfrequenten Bereich sind diese Bewegungen wenige Millimeter, je höher die Frequenz eingestellt wird, desto mehr gehen diese Bewegungen in eine konstante Vibration über. Zur festen Positionierung des Neigungssensors befindet sich eine Aluminiumplatte am oberen Ende des Hubkolbens. In der Platte befinden sich Löcher, um einen Nivel – Sensor fest zu verschrauben. Zur Überprüfung der Schwingungserfassung wurden lediglich niedere Frequenzen von 3 Hz und 4 Hz untersucht. Da der LEICA Nivel mit keiner höheren Frequenz als 4 Hz aufzeichnen kann, sind auch diese Schwingungsmessungen nicht zielführend. Nach NYQUIST – Kriterium können mit einer Abtastrate von 4 Hz höchstens 2 Hz Samplefrequenz erfasst werden. Die erzeugten Frequenzen mit dem Schwingungserzeuger sollten daher nicht mit dem Nivel messbar sein.

Zunächst soll der Einfluss des Master Gain Reglers verdeutlicht werden. Dazu wird ein Beschleunigungssensor der Firma SBG SYSTEMS eingesetzt. Aufgezeichnet wurde eine Frequenz von 3 Hz mit unterschiedlichen Master Gain (MG) Einstellungen. Die Abtastrate des Beschleunigungssensors beträgt dabei 100 Hz. In der *Abbildung 43* ist zu erkennen, dass die erzeugte Frequenz von 3 Hz mit höherem Master Gain deutlicher zu detektieren ist. Bei den ersten Darstellungen mit niedrigem MG – Wert ist ein stärkeres Rauschen im Frequenzband vertreten. Daher werden folgende Untersuchungen stets mit einem Master Gain von „10“ durchgeführt.

4. Untersuchung der Messinstrumente

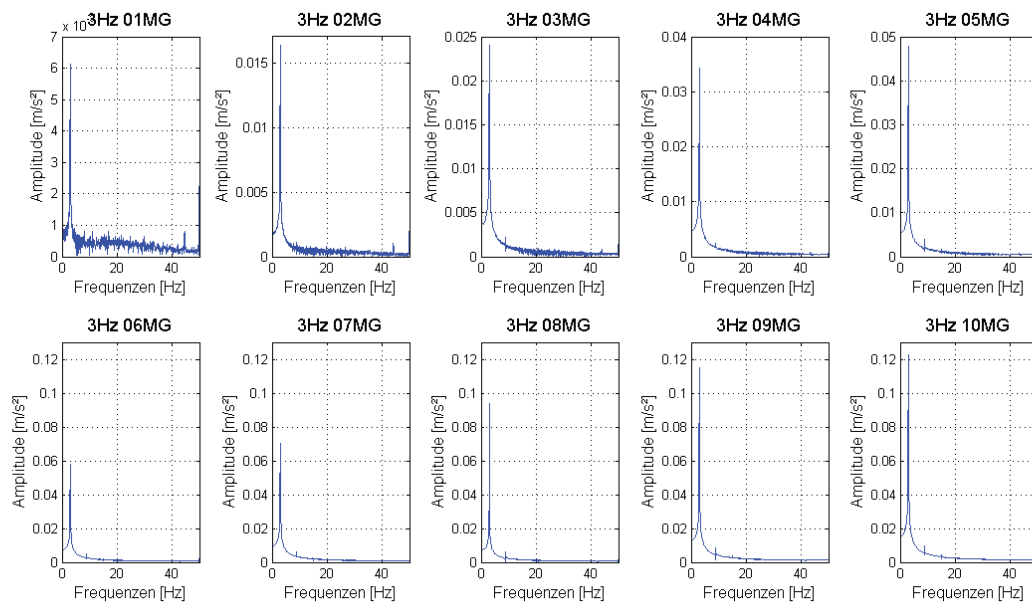


Abbildung 43: Frequenzspektren unter Einfluss des Master Gain

Für die Frequenzmessung auf dem Schwingungserzeuger wurden ein LEICA Nivel – Sensor und der SBG – Beschleunigungssensor gleichzeitig verwendet. Die *Abbildung 44* zeigt den Vergleich der beiden Messsensoren bei einer Samplefrequenz von 3 Hz und einem Master Gain von 10. Der Nivel – Sensor zeichnet die Werte mit einer Frequenz von 4 Hz und der Beschleunigungssensor mit 10 Hz auf. Die erzeugte Schwingung ist mit dem Beschleunigungssensor direkt in der Z – Achse zu erkennen. Nach der Frequenzanalyse zeigt das Powerspektrum des SBG – Beschleunigungssensors, welche Frequenzen hauptsächlich vertreten sind. Neben der gewünschten Frequenz des Hubkolbens von 3 Hz befinden sich noch weitere Frequenzen bei 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz und nahe 5 Hz. Vermutlich erscheinen diese Frequenzen auf Grund von mechanischen Bewegungen im Inneren des Hubkolbens.

Mit dem Nivel – Sensor lässt sich die Hubbewegung nicht direkt messen. Die Bewegungen des Kolbens sind dennoch in den Neigungswerten der X – und der Y – Richtung zu erkennen. Wegen der geringen Aufzeichnungsrate des Nivels von 4 Hz kann die gewünschte 3 Hz – Frequenz nicht erfasst werden. Im Powerspektrum der X – und der Y – Neigung ist jedoch ein Peak bei 1 Hz und eine Andeutung bei 2 Hz vertreten.

4. Untersuchung der Messinstrumente

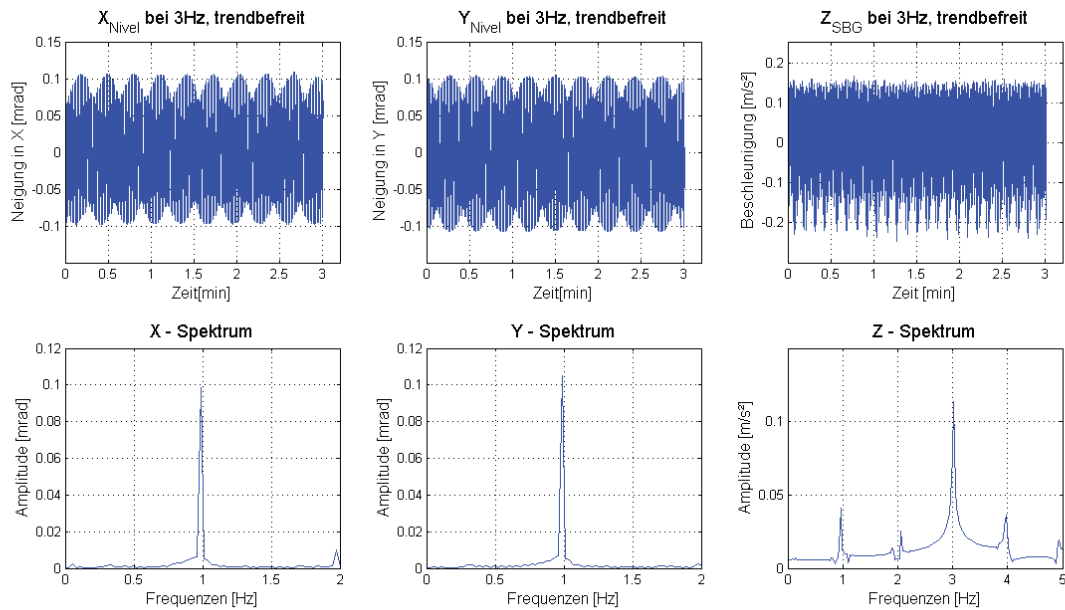


Abbildung 44: Frequenzmessung mit 3Hz

In der *Abbildung 45* befindet sich die gleiche Messung bei einer erzeugten Schwingung von 4 Hz. Diese Schwingung ist im Powerspektrum des SBG – Sensors zu erkennen. Der Nivel – Neigungssensor stößt hierbei deutlich an seine Grenzen. Erneut ist die gewünschte Frequenz nicht aufzuzeichnen und die Werte der Neigung in X – und Y – Richtung zeigen einen Alias Effekt (Abschnitt 5.2).

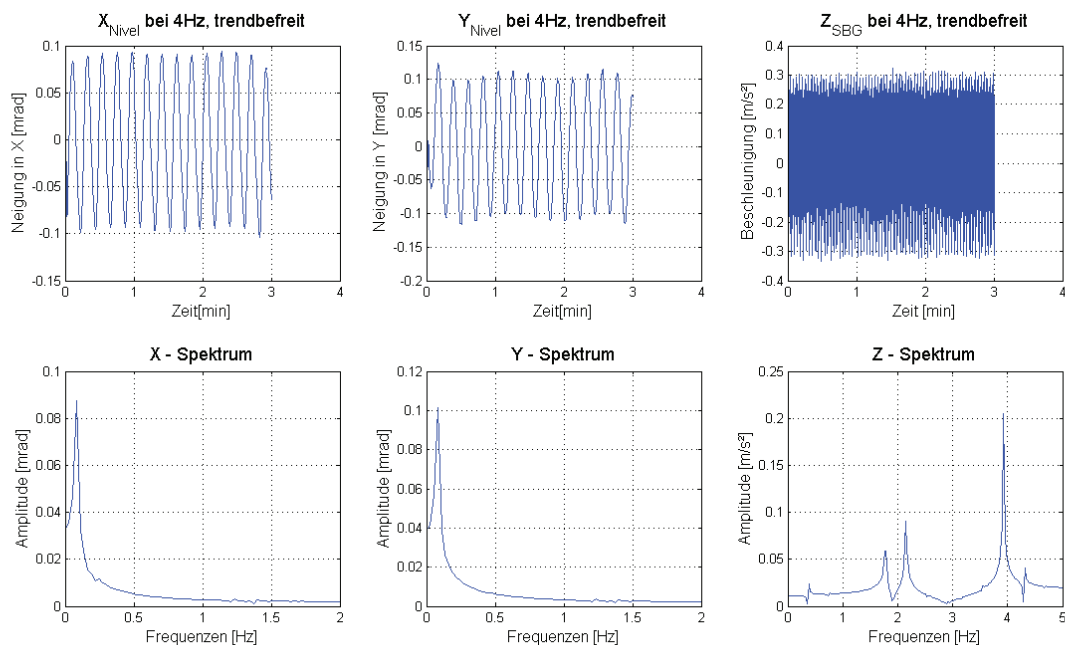


Abbildung 45: Frequenzmessung mit 4Hz

4.2.3 Fazit zu den Neigungssensoren

Die Neigungssensoren der Marke LEICA Nivel210-C sind in der Lage Neigungen von $\pm 0,172^\circ$ mit einer Genauigkeit von $\pm 9,72''$ (lt. Hersteller) zu erfassen. Diese Genauigkeitsangaben beziehen sich vermutlich auf Wiederholungsmessungen bei dem der Neigungssensor seine Position verlässt und anschließend wieder an die vorgesehene Stelle aufgesetzt wird. Die ermittelten Standardabweichungen bei einem fest montierten Nivel – Sensor sind mit $< 0,5''$ deutlich geringer als erwartet.

Durch die ermittelten Offsets der drei Nivels können für jede nachfolgende Messung eine Korrektur berechnet und eine nahezu fehlerfreie Neigung bestimmt werden.

Das Driftverhalten ist selbst unter Laborbedingungen nicht einflussfrei bestimmbar. Die Langzeitmessungen lassen selbst den Verkehr der anliegenden Rostocker Straße an die Hochschule Neubrandenburg erahnen. Eine geeignete Verbesserungsfunktion für einen Langzeitdrift erübrigt sich daher.

Bei einer Messung von Schwingungen sind die Nivels eingeschränkt nutzbar. Sie können auf Grund ihrer Abtastrate von 4 Hz lediglich niederfrequente Bewegungen von unter 2 Hz erfassen. Allerdings unter Berücksichtigung der sich bewegenden Flüssigkeitsoberfläche.

4.3 Beschleunigungssensoren

Neben den Tachymetern und den Neigungssensoren sollen auch Beschleunigungssensoren überprüft werden, in wie weit ihre Einsatzfähigkeit bei einem Gebäudemonitoring gegeben ist. Zu den Instrumenten gehören ein Sensor der Firma SBG SYSTEMS, ein Accelerometer von ANALOG DEVICES und ein APPLE iPhone 5 mit einem intern verbauten Beschleunigungssensor der Firma STMICROELECTRONICS.

4.3.1 Vorüberlegung

Der IG-500E Sensor der französischen Firma SBG SYSTEMS ist ein sogenanntes AHRS-Messsystem. AHRS bedeutet Attitude Heading Reference System und beschreibt in der MEMS-Technologie eine Sensorkombination aus Beschleunigungssensoren, Gyroskope und Magnetometer. Mit dieser Kombination, und vereinzelt auch in Verbindung mit einer GPS-fähigen Schnittstelle, werden diese Sensoren in der Flugzeugindustrie oder in Modellflugzeugen zur 3D-Navigation eingesetzt. Der IG-500E Sensor verfügt über zwei Schnittstellen. Eine davon ist für die Stromversorgung und den Datenaustausch zur mitgelieferten Software SBGCENTER, die andere bietet die Möglichkeit einen GPS Empfänger anzuschließen (ABB 48). Der Sensor ist für verschiedene Beschleunigungen ausgelegt. Dazu gehören $\pm 2g$, $\pm 5g$, und $\pm 18g$. Die genaue Bezeichnung des Sensors lautet IG-500E-G2A2P1-S. Mit dieser Bezeichnung sind die Parameter festgelegt: G2 = Gyroscope $75^\circ/s$; A2 = Accelerometer $\pm 5g$; P1 = RS-232 Protokoll. Die Auflösung des Sensors beträgt $0,1mg$ ($= 0,000981m/s^2$). Die Genauigkeit bei $0g$ liegt laut Herstellerangaben bei $\pm 5mg$. Mit Hilfe der Software SBGCENTER kann die Messfrequenz des Sensors eingestellt werden. Dies ist bis zu 250Hz möglich.

Der ADXL345 der Firma ANALOG DEVICES ist ein dreiachsiger Beschleunigungssensor. Er ist in diesem Fall auf eine Platine gelötet. Diese Platine wird von der Firma SPARKFUN als EVALUATION BOARD vertrieben (ABB 46). Es bietet die Möglichkeit Beschleunigungen in drei Achsen zu messen. Durch die Verwendung von zwei AA-Batterien kann der Sensor ohne eine Kabelverbindung betrieben werden. Ein Steckplatz für eine MiniSD-Karte bietet dabei die Möglichkeit der Datenspeicherung. Der ADXL345 hat einen Arbeitsbereich von $\pm 2g$ bis

4. Untersuchung der Messinstrumente

zu $\pm 16g$. Dabei liefert er eine Auflösung von $4mg (= 0,039m/s^2)$ bis $32mg (= 0,314m/s^2)$ pro LSB, je nach Arbeitsbereich. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit $\pm 40mg$ bei $0g$ angegeben. Die Messfrequenz liegt dabei in einem Bereich von $3,125\text{ Hz} - 1,6\text{ kHz}$.

Der LIS331DLH Beschleunigungssensor der Firma STMicroelectronics im iPhone 5 ist in Verbindung mit verschiedensten Apps einsetzbar. Die Daten des Sensors werden genutzt um bspw. das Display zwischen Hoch- und Querformat zu ändern, in Fitness-Apps Bewegungen zu erkennen oder um Neigungen in einer Wasserwaagen-App anzuzeigen. Die Dimensionen des Sensors sind gerade einmal $3 \times 3 \times 1\text{ mm}$ und damit perfekt geeignet um in einem schmal geschnittenen Smartphone Gehäuse Platz zu finden (ABB 47). Der Sensor ist für einen Arbeitsbereich von $\pm 2g$, $\pm 4g$ und $\pm 8g$ ausgelegt. Die Auflösung beträgt dabei $1mg (= 0,010m/s^2)$ bis $4mg (= 0,039m/s^2)$ pro LSB. Die Nullpunktstabilität wird dabei mit $\pm 20mg$ angegeben. Die Messfrequenz ist zwischen den Frequenzen $0,5\text{ Hz}$ und 1 kHz variabel.

Diese drei Sensoren sollen genutzt werden, um beim Gebäudemonitoring in der Marienkirche in Neubrandenburg Schwingungen zu messen. Dabei ist herauszufinden, welche Schwingungen und mit welchen Frequenzen die fünf Glocken der Marienkirche schwingen und welchen Einfluss diese Schwingung auf den Kirchturm hat.



Abbildung 48: sbg IG-500E

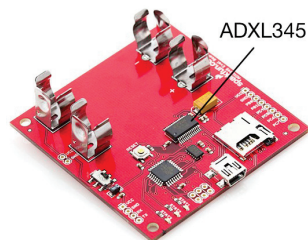


Abbildung 46: ADXL345

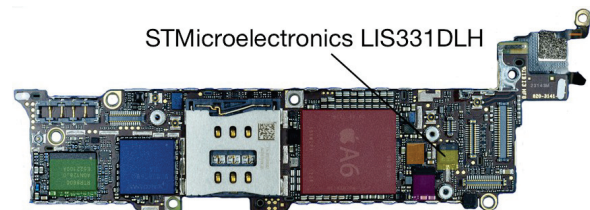


Abbildung 47: Platine eines iPhone 5

[robotsinsearch.com], [sparkfun.com], [techinsights.com]

4. Untersuchung der Messinstrumente

4.3.2 Testmessungen und Auswertung

Software zur Datenaufzeichnung

Wie schon eingangs geschildert, werden die Daten des SBG IG-500E mit der Firmeneigenen Software SBGCENTER aufgezeichnet und visualisiert. Dabei gibt es verschiedene Fenster, die je nach Bedarf ein- und ausgeblendet werden können (ABB 49). Zu denen gehören unter anderem der Verlauf der Beschleunigungswerte, die Visualisierung der Gyroskope und auch eine Flugzeugsimulation. Im linken Teil des Softwarefensters können die Konfigurationen, wie COM-Schnittstelle oder Messfrequenz, des Sensors beobachtet werden. Die aktuellen Messwerte werden in einem grafischen Verlauf angezeigt und können softwareintern gespeichert werden. Nach einem Messszenario können die erzeugten Messdaten als txt- File exportiert werden, um sie mit einer anderen Software weiter zu verarbeiten. Dabei kann im Vorfeld bestimmt werden, welche Messdaten exportiert werden sollen. Da der IG-500E in dieser Arbeit lediglich als Beschleunigungssensor dienen soll, reichen beim Datenexport die drei Beschleunigungen der einzelnen Achsen aus. Die restlichen Daten wie Gyroskope und Magnetometer werden aus Speicherplatzgründen ignoriert. Die exportierten Messwerte werden im Anschluss mit der der Software MATLAB ausgewertet und visualisiert.

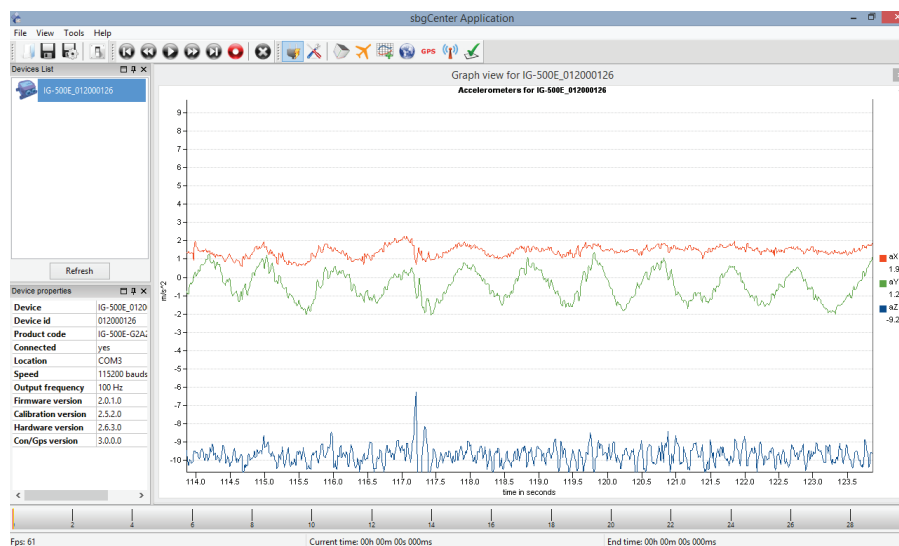


Abbildung 49: sbgCenter

Der ADXL345 Beschleunigungssensor bietet keine eigene Software zur Datenaufzeichnung oder Auswertung. Die erzeugten Messwerte werden im vierstelligen

4. Untersuchung der Messinstrumente

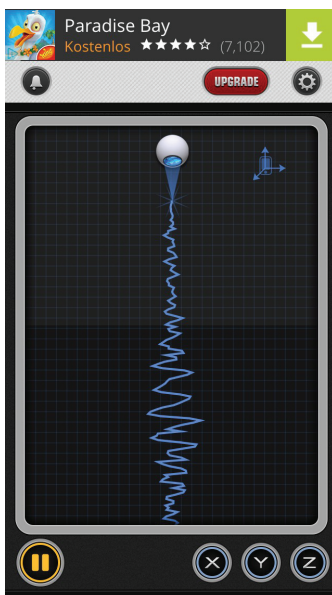
Hexadezimalformat als csv-Datei auf der miniSD Karte abgespeichert. Um aus diesen Werten aussagekräftige Messwerte zu machen, werden sie mit MATLAB umgerechnet. Dabei werden die Messwerte zunächst mit dem Befehl:

```
AccelX_dez = hex2dec(AccelX_hex);
```

umgerechnet. So ergeben sich Messwerte im Bereich von 0 bis 65535. Dieser Wertebereich ist sowohl für den negativen, als auch für den positiven Messbereich bestimmt. Das bedeutet, dass die Werte 0 – 32766 für den negativen Bereich und die Werte 32768 – 65535 für den positiven Bereich gelten. Der Wert 32767 würde 0g entsprechen. Der Arbeitsbereich des ADXL345 ist auf $\pm 2g$ festgelegt. Daher ergibt 1LSB den Wert 0,0039g. Mit diesem Faktor können die Dezimalwerte multipliziert werden, um Beschleunigungen mit der Einheit 1g zu erhalten. Im Anschluss können die Messwerte mit MATLAB geplottet werden.

Für die Messung der Beschleunigungen mit dem iPhone 5 sind besondere Apps notwendig. Diese können im APPLE eigenen AppStore heruntergeladen werden. Sie bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile für die Messung.

SEISMOMETER 6TH:



SEISMOMETER 6TH ist eine App der SkyPaw Co. Ltd. Mit dieser kostenlosen App lassen sich Beschleunigungen in allen drei Achsen erfassen. Dabei können die Achsen kombiniert, oder auch einzeln ausgewertet werden. Die Daten können im Anschluss an eine Messung per E-Mail übertragen werden. Sie werden dann als zip- verpackte csv- Datei versendet. Abgespeichert werden nur die Messwerte der Achsen, die währen des Messprogramms angewählt waren. Die Auflösung der Messwerte beträgt 0,001g. In der App kann auch die Messfrequenz verändert werden, allerdings steht dazu nur ein Schieberegler zur Verfügung, der nicht mit einer speziellen Frequenz beschriftet ist. Die kostenlose Version dieser App

lässt regelmäßig einen Werbe- Popup im oberen Displaybereich erscheinen. Unklar ist, ob die Messfrequenz davon beeinträchtigt wird.

4. Untersuchung der Messinstrumente

DATA COLLECTION:

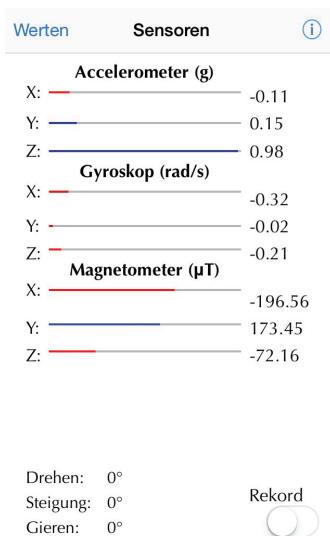


Abbildung 51: DataCollection

DATA COLLECTION ist eine App des Entwicklers Chris Wozny. Mit dieser App lassen sich die Beschleunigungssensoren, die Gyroskope und die Magnetometer auslesen. Mit Hilfe der „Rekord“ Funktion lassen sich die Daten aufzeichnen. Wird dieser Schalter deaktiviert, können die gespeicherten Daten per E-Mail versendet werden. Der Nachteil der Daten ist, dass sie zeilenweise in eine txt-Datei geschrieben werden. Das macht die nachträgliche Verarbeitung kompliziert. Die Auflösung der Accelerometerdaten ist $0,000001g$ ($= 1\mu g$), wobei dies lediglich eine softwareseitige Auflösung darstellt. Denn der Beschleunigungssensor des iPhone 5 schafft maximal $1mg$. Die Messfrequenz der kostenlosen Version DATA COLLECTION FREE ist auf 10Hz limitiert und die Messzeit wird auf 10sek begrenzt. In

der käuflichen Version für 0,99€ lassen sich Frequenzen von 1 – 500Hz einstellen und die Messzeit wird nicht unterbrochen.

iSEISMOMETER:

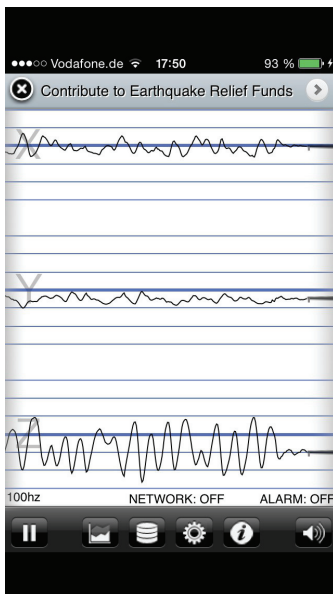


Abbildung 52: iSeismometer

iSEISMOMETER ist eine kostenlose App der Firma ObjectGraph. Die App zeichnet die Werte der drei Beschleunigungsachsen auf und visualisiert sie. Softwareintern wird eine FAST-FOURIER-Transformation berechnet, die in einer separaten Anzeige dargestellt werden kann. Sie zeigt ein Spektrum der in den Messwerten vorhandenen Frequenzen, berechnet aus den letzten 1024 Messwerten. Die Messfrequenz ist auf 100Hz festgelegt. Der Datenexport kann auch hier per E-Mail erfolgen. Die Daten haben eine Auflösung von $0,000001g$. Etwa jede Sekunde wird ein Zeitstempel abgespeichert. Die Anzahl der Messwerte zwischen den Zeitmarken ist stets unterschiedlich, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Messfrequenz nicht stabil ist. Ein weiteres Manko ist, dass auf Grund

der FAST-FOURIER-Transformation (Berechnung mit 2^n Messwerten) der Datenexport auf 2048 Messwerte begrenzt ist.

4. Untersuchung der Messinstrumente

SENSORLOG:

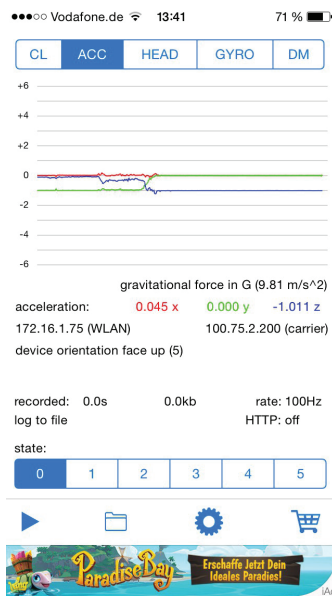


Abbildung 53: SensorLog

Die kostenlose App SENSORLOG von Bernd Thomas bietet die Möglichkeit die Sensoren des Smartphone auszulesen. Mit der App können die geografischen Standortkoordinaten mit Höhe bestimmt werden, die Daten der Beschleunigungssensoren können ausgelesen werden, es kann ein Kurs bezüglich der Magnetischen Nordrichtung bestimmt werden und die Werte der Gyroskope können entnommen werden. Die Werte der Beschleunigungssensoren haben eine Auflösung von $10^{-15}g$ und können mit einer Frequenz von 1 – 100Hz abgetastet werden. Die Messwerte werden softwareintern abgespeichert und können per E-Mail versendet werden. Dabei kann zuvor bestimmt werden, welche Messwerte in der csv- Datei abgespeichert werden sollen. Die App ist stets mit einem

Werbe- Popup versehen. Eine werbefreie Version der App kostet 5,99€. Wird das iPhone im Flugzeugmodus betrieben, tritt keine Werbung auf.

Testmessung zum Einschaltverhalten

Wie schon unter 4.2.2 beschrieben haben elektronische Sensoren ein gewisses Verhalten kurz nach dem Einschalten des Sensors. Durch den Aufbau der Betriebsspannung kann es zu Schwankungen und Peaks in den Messwerten kommen.

Der IG-500E Beschleunigungssensor von SBG SYSTEMS funktioniert nur mit der mitgelieferten Software SBGCENTER. Um eine Messung zu starten, muss der Sensor zunächst an einen Rechner angeschlossen und die Software gestartet werden. Im SBGCENTER werden zunächst alle verfügbaren Sensoren angezeigt und können dann ausgewählt werden. Nachdem diese Auswahl erfolgt ist, beginnt der Datentransfer. Während dieses gesamten Vorganges ist der Sensor schon mit Strom versorgt und wird softwareseitig vor dem Einsatz initialisiert. Die im Anschluss ermittelten Messwerte zeigen daher kein Einschaltverhalten.

Der ADXL345 Sensor wird mit Hilfe eines On-Off- Schalters gestartet. Wenn zudem eine miniSD-Karte eingesteckt ist, beginnt der Sensor eigenständig Messwerte auf diese Speicherkarte zu schreiben. Ein Testszenario von mehreren Messungen zu jeweils 10sec

4. Untersuchung der Messinstrumente

soll das Einschaltverhalten des Sensors feststellen. Dabei musste zunächst die Messfrequenz ermittelt werden. Da der ADXL345 Sensor keine Zeitmarke abspeichert, muss die Messfrequenz empirisch getestet werden. Dazu wird der Sensor auf eine Unterlage gestellt und die Messung gestartet. Ein kleiner Impuls (Schlag) gegen die Unterlage stellt eine einwirkende Beschleunigung dar und veranlasst den Sensor dazu einen Peak in den Messwerten aufzuzeichnen. Ein zweiter Impuls nach einer gewissen Zeit beendet den Untersuchungsrahmen. Zwischen diesen beiden Impulsen wird mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen. In der anschließenden Auswertung der Daten sind die Peaks deutlich zu erkennen und die Messreihe lässt sich bis zu den Peaks kürzen. Durch die Anzahl der Messwerte in dem Bereich und der verstrichenen Zeit lässt sich die Messfrequenz errechnen. Die gemittelte Frequenz beträgt nach fünfmaliger 10sekündiger Messung 91,02Hz und schwankt zwischen 90,3Hz und 91,5Hz. Für weitere Berechnungen wird der Wert 91Hz als konstant angenommen.

Peaks in den ersten Werten nach dem Einschalten des Sensors sind nicht vorhanden. Die 10 sekündigen Messungen ergaben lediglich Messwerte für einen 5 sekündigen Messbereich. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der ADXL345 ca. 5 Sekunden benötigt um die ersten Messwerte auf die Speicherkarte zu schreiben. Ein weiteres Einschaltverhalten ist in den Messwerten nicht erkennbar.

Der Beschleunigungssensor LIS331DLH im iPhone 5 läuft kontinuierlich um jede Bewegung des Smartphones zu erfassen. Daher kann hierbei das Einschaltverhalten nicht untersucht werden. Die Messwerte der einzelnen Apps liefern von Beginn an konstante Messwerte ohne Peaks oder anfängliches Driftverhalten.

Driftverhalten bei Langzeitmessung

Da die Beschleunigungssensoren mit einer hohen Frequenz Daten aufzeichnen, kommt ein hohes Datenvolumen zusammen. Die Langzeitmessung wird daher auf eine Zeitspanne von 60min begrenzt.

Der SBG IG-500E kann mit Hilfe des SBGCENTERS konfiguriert werden. Dazu gehört auch die Veränderung der Messfrequenz. Allerdings ist dies nur möglich, wenn der verwendete PC Schreibrechte für den Sensor besitzt. Die Konfigurationen werden dann auf dem Sensor gespeichert und werden beim nächsten Messvorgang genutzt. Das verwendete Notebook für die Messung mit dem IG-500E besitzt solche Schreibrechte nicht, sodass der Sensor

4. Untersuchung der Messinstrumente

eine fest eingestellte Messfrequenz von 100Hz besitzt. Trotz Ausschalten der irrelevanten Daten beim Export besitzt die 60minütige Langzeitmessung ein Speichervolumen von 17MB. Die Verarbeitung der Messwerte erfordert viel Rechenzeit. Eine längere Messzeit wird daher nicht untersucht. *Abbildung 54* zeigt das 60minütige Driftverhalten der IG-500E Beschleunigungssensors. Der Hersteller SBGSYSTEMS verspricht auf seiner Homepage, dass der IG-500E eine Drift-freie 3D-Orientierung bietet. Es ist nicht zu erkennen, dass die Messwerte ein driftendes Verhalten aufweisen. Die Standardabweichungen betragen dabei $s_X = 0,0092\text{m/s}^2$; $s_Y = 0,0067\text{m/s}^2$ und $s_Z = 0,0095\text{m/s}^2$.

Ebenso wie der IG-500E ist auch der ADXL345 Beschleunigungssensor mit einer fest definierten Frequenz bestückt. Die 60minütige Messung bringt eine Messdatei mit der Größe 5MB hervor. Dies reicht jedoch aus, um ein Driftverhalten festzustellen. In *Abbildung 55* ist zu sehen, dass die Beschleunigungen in Y- und Z- Richtung einen leichten Drift in den ersten Messwerten erfahren. Die Beschleunigung in X- Richtung weist einige Peaks auf, die enorm von der Ruhelage abweichen. Obwohl keine Impulse auf den Sensor oder dessen Unterlage erfolgt sind, haben die Peaks einen Betrag von $\pm 10\text{m/s}^2$. Die Standardabweichung der Beschleunigungswerte sind $s_X = 0,0627\text{m/s}^2$; $s_Y = 0,0325\text{m/s}^2$ und $s_Z = 0,0415\text{m/s}^2$.

Die Messwerte des Beschleunigungssensors des iPhones 5 werden stets per E-Mail übertragen. Die maximale Dateigröße ist daher begrenzt. Die App SENSORLOG bietet die Möglichkeit die Frequenz auf 5Hz herabzusetzen. Damit kann ein Driftverhalten bei einer 60minütigen Messung immer noch bestimmt werden. Während der Messung ist das Smartphone im Flugzeugmodus, sodass keine eingehenden Nachrichten oder Anrufe die Messung behindern können. Selbst das Werbe- Popup taucht im Flugzeugmodus nicht mehr auf. In *Abbildung 56* ist ein leichtes Driftverhalten zu erkennen. Die Standardabweichungen betragen dabei $s_X = 0,0168\text{m/s}^2$; $s_Y = 0,0177\text{m/s}^2$ und $s_Z = 0,0197\text{m/s}^2$. Damit liefert das iPhone 5 sogar stabilere Messwerte als der ADXL345 Beschleunigungssensor.

4. Untersuchung der Messinstrumente

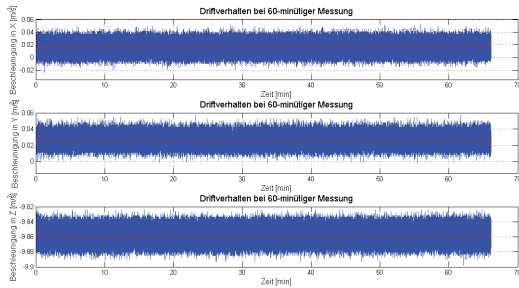


Abbildung 54: Driftverhalten des sbg IG-500E

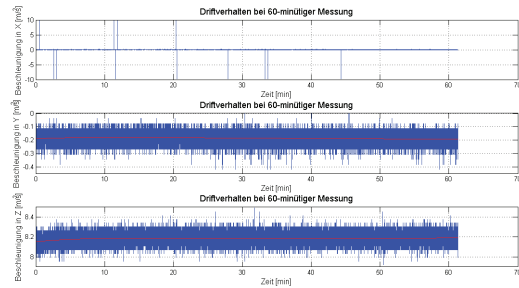


Abbildung 55: Driftverhalten des ADXL345

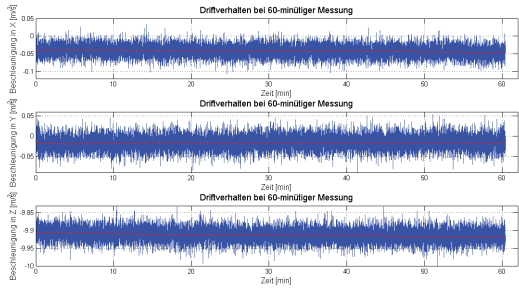


Abbildung 56: Driftverhalten des iPhone 5

Testmessung zur Offsetbestimmung

Wie auch bei den Neigungssensoren befinden sich im Inneren der Beschleunigungssensoren verschiedene Achsen, die keine exakte Rechtwinkligkeit zum Gehäuse aufweisen können. Dadurch ist jede Messung mit einem Offset belegt. Um dieses Offset zu bestimmen, wird eine Messung in zwei Lagen durchgeführt. Mit der Formel:

$$\text{Offset}_{\text{Neigung}} = \frac{\text{Messung}_{\text{Lage I}} + \text{Messung}_{\text{Lage II}}}{2}$$

wird das Offset berechnet. Bei den Beschleunigungssensoren wird zwischen zwei Offsets unterschieden. Das Offset kann für 0g und für 1g berechnet werden. Dabei befindet sich die zu untersuchende Achse senkrecht oder parallel zur Lotlinie und damit zur Erdbeschleunigung.

Zur Bestimmung der Offsets wird erneut der GyroTester im Kalibrierlabor der Hochschule Neubrandenburg genutzt. Der GyroTester besitzt passgenaue Bohrlöcher für den sbg IG-500E Sensor. Er kann angeschraubt und damit um alle Achsen gedreht werden, um sowohl das Offset der Achsen für die Nulllage zu bestimmen als auch für die vollen Auslenkungen +1g und -1g. Eine solche Fixierung ist für den ADXL345 und für das iPhone 5 nicht vorhanden, sodass bei aufgelegtem Sensor lediglich die X- und die Y- Achse in ihrer Nulllage überprüft werden können. Gemessen wurde mit allen drei Sensoren jeweils fünf mal die Lage I und fünf mal die Lage II. Im Anschluss wurden die Offsets der

4. Untersuchung der Messinstrumente

einzelnen Achsen berechnet und gemittelt (*Tabelle 7*).

	0g (Nulllage)			1g (maximale Auslenkung)		
	X [m/s ²]	Y [m/s ²]	Z [m/s ²]	X [m/s ²]	Y [m/s ²]	Z [m/s ²]
IG-500E	0,015904	0,026041	-0,042671	0,002743	0,033142	-0,044450
ADXL345	0,001958	0,343598	-	-	-	-
LIS331DLH	0,075893	0,000658	-	-	-	-

Tabelle 7: Offsets der Beschleunigungssensoren

Testmessung zur Schwingungsdetektion

Im Gebäudemonitoring an der Marienkirche in Neubrandenburg sollen Schwingungen des Kirchturms erfasst werden. Diese Schwingungen werden durch das Pendeln der Glocken beim Glockenspiel hervorgerufen. Mit Hilfe der Beschleunigungssensoren sollen die Schwingungen des Kirchturms erfasst werden. Zur Überprüfung der Beschleunigungssensoren wird der Schwingungserzeuger der Hochschule Neubrandenburg genutzt. Mit ihm werden bestimmte Frequenzen als Hubbewegung erzeugt, die dann mit den Beschleunigungssensoren erfasst werden sollen. In *Abbildung 42* ist zu sehen, dass an der Oberseite des Hubkolbens eine Metallplatte befestigt ist. Diese Platte dient zur Aufnahme der einzelnen Beschleunigungssensoren bei der Testmessung. Werden die Sensoren auf der Platte positioniert, werden die Hubbewegungen des Kolbens hauptsächlich in der senkrecht verlaufenden Z- Achse sichtbar. Die periodischen Hubbewegungen werden in den Messwerten als Schwingungen auftauchen. Nachzuprüfen ist dabei, ob die eingestellte Schwingfrequenz in den Messwerten der Beschleunigungssensoren detektierbar ist. Die erzeugten Frequenzen sind 3Hz, 4Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz und 50Hz. Die folgenden *Abbildungen 57 – 63* zeigen die Messwerte der einzelnen Sensoren und das zugehörige Powerspektrum.

4. Untersuchung der Messinstrumente

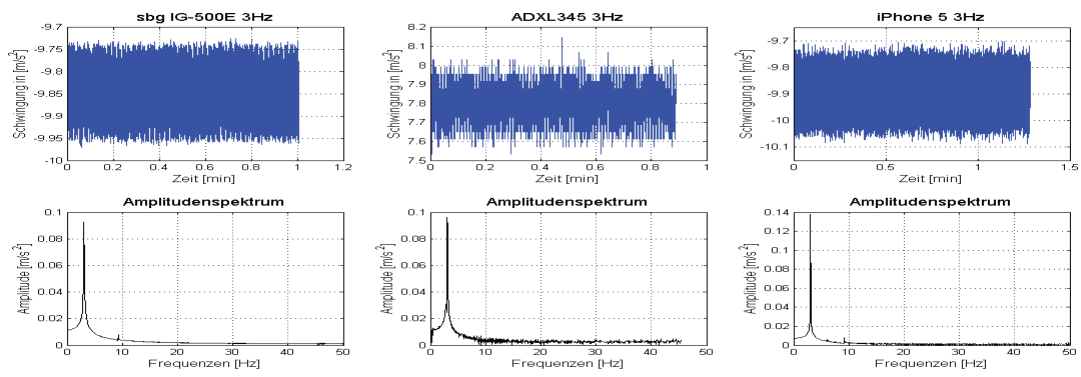


Abbildung 57: Schwingungsmessung mit 3Hz

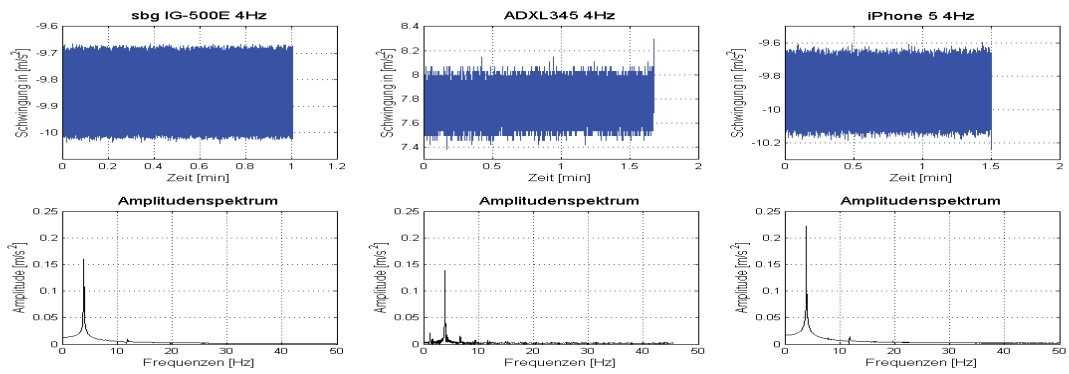


Abbildung 58: Schwingungsmessung mit 4Hz

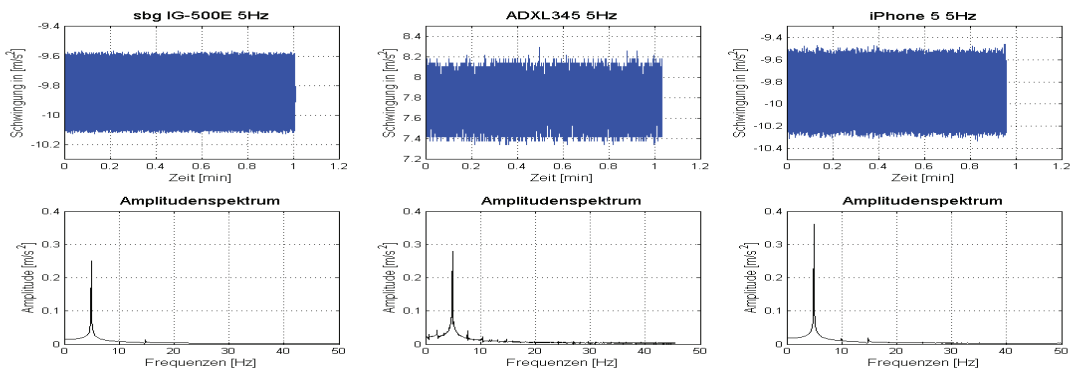


Abbildung 59: Schwingungsmessung mit 5Hz

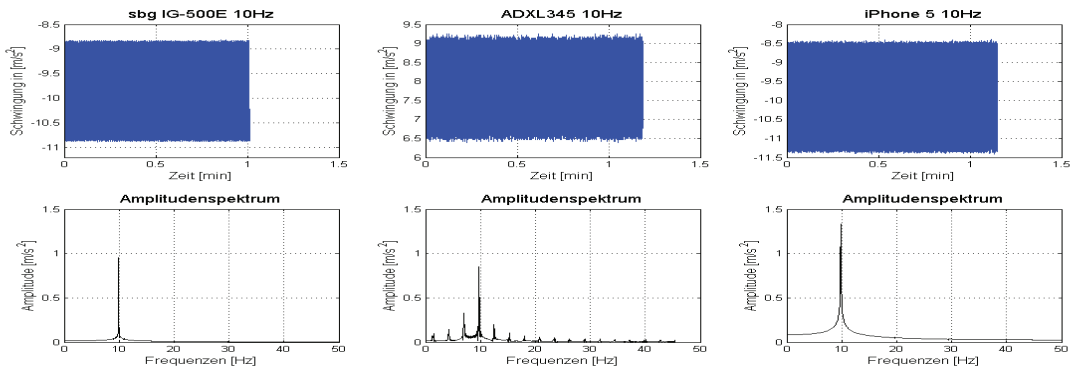


Abbildung 60: Schwingungsmessung mit 10Hz

4. Untersuchung der Messinstrumente

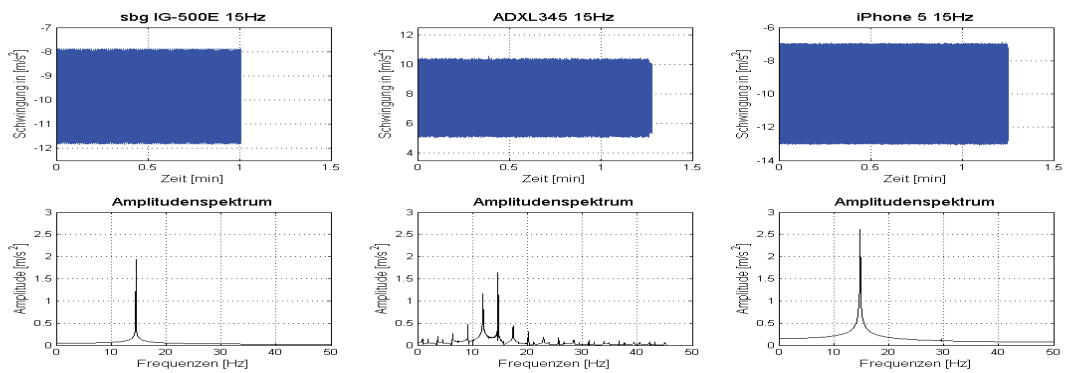


Abbildung 61: Schwingungsmessung mit 15Hz

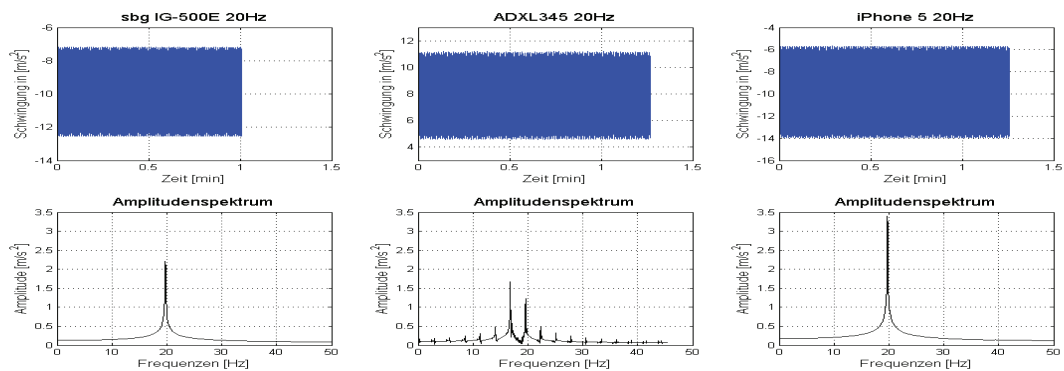


Abbildung 62: Schwingungsmessung mit 20Hz

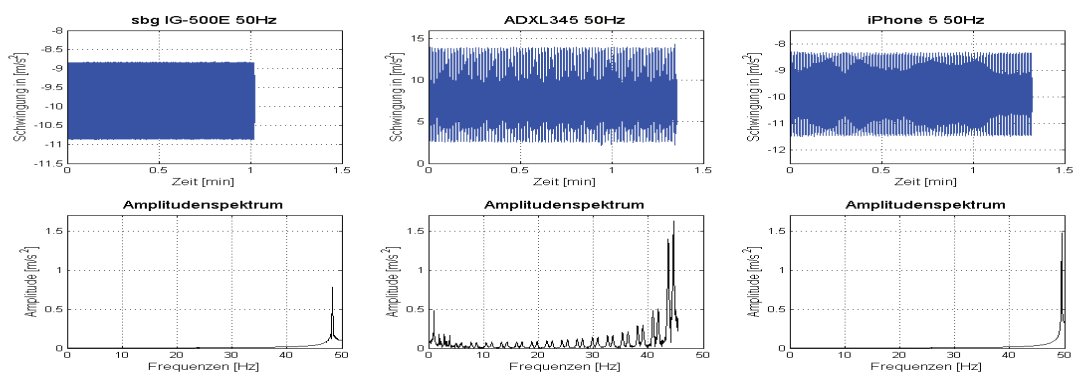


Abbildung 63: Schwingungsmessung mit 50Hz

In den niedrigeren Frequenzen ist zu erkennen, dass der ADXL345 ein stärkeres Rauschen in den Messwerten hat. Dies spiegelt sich auch in den gefundenen Frequenzen des Amplitudenspektrums wieder. Der IG-500E Sensor und das iPhone 5 können die erzeugten Frequenzen deutlich detektieren, während der ADXL345 mehrere Peaks

4. Untersuchung der Messinstrumente

aufweist. Ebenso auffällig ist, dass die Amplitude der iPhone Messung stets höher ist, als die des SBG Sensors. Die Amplitude spiegelt den Einfluss der betreffenden Frequenz in den Messwerten wieder. Je höher die Amplitude, desto größer ist ihr Anteil in den Messwerten.

Der ADXL345 Beschleunigungssensor zeigt in den Messungen bei 15 und 20Hz zwei bedeutende Peaks. Bei einer Analyse der Daten fällt es schwer damit die gewünschte Frequenz zu erfassen. Wenn die gewünschte Frequenz nicht bekannt ist, führt diese Messung zu einer Fehlinterpretation.

Die Schwingungserzeugung von 50Hz löst bei den Sensoren ein Grenzverhalten aus. Durch die Abtastfrequenz von 100Hz bei IG-500E und iPhone5 in Verbindung mit dem NYQUIST-Kriterium kann die Samplefrequenz von 50Hz nicht exakt abgebildet werden. Die beiden Sensoren zeigen dennoch einen Peak in der Nähe von 50Hz. Dabei ist zu erkennen, dass das iPhone5 noch näher an der beabsichtigten Frequenz ist. Der ADXL345 Sensor hat nur eine Abtastrate von 91Hz. Die erzeugten Schwingungen können daher nicht erfasst werden. Im Powerspektrum sind daher viele Peaks vertreten.

Berechnung der Neigung aus Beschleunigungswerten

In jeder Messung der Beschleunigungssensoren ist die Erdbeschleunigung von 9,80665 m/s² enthalten. Mit einem idealisierten, ruhenden Sensor auf einer exakt ebenen Unterlage ist diese Erdbeschleunigung in einer Messachse des Sensors komplett enthalten. Die anderen beiden Achsen würden keine Beschleunigung anzeigen. Bei einer Neigung des Sensors wird die gesamte Erdbeschleunigung auf die drei Messachsen verteilt. Jede von ihnen misst einen Anteil der gesamten Beschleunigung. Die gesamte Erdbeschleunigung lässt sich mit:

$$g_{gesamt} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$$

berechnen. Durch die anteiligen Beschleunigungen und dem Wissen der senkrecht verlaufenden, gesamten Erdbeschleunigung, lässt sich aus den Messwerten eine Neigung des Sensors berechnen. Dies geschieht mit:

4. Untersuchung der Messinstrumente

$$Winkel_x = \arcsin\left(\frac{g_x}{g_{gesamt}}\right)$$

$$Winkel_y = \arcsin\left(\frac{g_y}{g_{gesamt}}\right)$$

Der Winkel_x zeigt damit eine Rotation um die Y-Achsen und der Winkel_y zeigt eine Drehung um die X-Achse an. Wird der Beschleunigungssensor nun so ausgerichtet, dass seine Z-Achse parallel zur Erdbeschleunigung verläuft, können mit den anderen beiden Achsen seine Neigung berechnet werden.

Da die drei verwendeten Beschleunigungssensoren eine unterschiedliche Auflösung ihrer Beschleunigung besitzen, können damit auch unterschiedliche Auflösungen in den Neigungen erzielt werden (*Tabelle 8*). An die Leistung des LEICA Nivel210-C Neigungssensors kommen die berechneten Werte jedoch nicht heran.

Sensoren	Auflösung	Auflösung	Auflösung
	[g]	[°]	["]
IG-500E	0,0001	0,006	20,6
ADXL345	0,0040	0,229	825,1
LIS331DLH	0,0010	0,057	206,3
Nivel210-C	-	0,00006	0,206

Tabelle 8: Neigungsauflösung der Sensoren

4.3.3 Fazit zu den Beschleunigungssensoren

Die drei Beschleunigungssensoren SBG IG-500E, ADXL345 und STMicroelectronics LIS331DLH zeichnen sich durch ihre Kompaktheit und der hohen Messfrequenz aus. Durch die hohe Auflösung und die Empfindlichkeit kleinster Beschleunigungen sind sie für einen Monitoring Einsatz in der Marienkirche in Neubrandenburg geeignet. Sie können eingesetzt werden um Schwingungen zu erfassen und zu ermitteln, mit welcher Frequenz sich die Glocken in einer Pendelbewegung befinden. In den Tests hat der LIS331DLH Sensor im iPhone 5 überrascht. Er beweist, dass selbst kleinste Bauteile in Smartphones mit einer solchen Präzision angefertigt und eingebaut werden, dass sie im direkten Vergleich mit einem ADXL345 Beschleunigungssensor bessere Ergebnisse liefern. Sie leisten eine bessere Auflösung, höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit, keine Drift und sind durch die Ansteuerung der verschiedenen Apps individuell einsetzbar.

Durch die hohen Messfrequenzen entstehen Dateien von großem Datenvolumen. Daher sind die Sensoren für einen Dauereinsatz nicht zu empfehlen. Sie können lediglich bei einem anstehenden Glockenspiel verwendet werden, um für den Zeitraum Daten zu erfassen.

Die Berechnung der Neigung aus Beschleunigungswerten ist begrenzt zu berücksichtigen. Eine Abschätzung wie in 4.2.1 zeigt, dass der SBG IG-500E Sensor mit der höchsten Auflösung von 0,1mg in der Lage wäre eine Turmschwingung von 4,7 mm zu erfassen. Diese Berechnung bezieht sich lediglich auf die bestmögliche Auflösung der Beschleunigungen und der damit zu berechnenden Neigungen. Bei der Berechnung wird erneut die Höhe von 45m im Oktogon herangezogen.

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \rightarrow \quad b = \frac{45\text{m} \cdot 0,006^\circ}{\frac{180^\circ}{\pi}} \quad \rightarrow \quad b = 0,0047\text{m} \quad (b = 4,7\text{mm})$$

5. Analyse von Zeitreihen

Beim Monitoring ist es der Fall, dass ein bestimmtes Messobjekt mit diversen Sensoren ausgestattet ist, die kontinuierlich messen. Durch diese dauerhaften Messungen entstehen zeitlich geordnete Messwerte, die je nach Messfrequenz einen konstanten zeitlichen Abstand zueinander haben. So kann jedem Messwert ein diskreter Zeitpunkt zugeordnet werden. Es wird dabei von einer Zeitreihe gesprochen. Beispielsweise kann der Temperaturverlauf an einem Tag eine geordnete Reihe von Messwerten hervorrufen, die zu jeder Tageszeit einen bestimmten Wert einnimmt. In ungeordneter Folge sind diese Messdaten meist wertlos, aber durch die vorgesehene Reihenfolge können verschiedenste Aussagen diesbezüglich getroffen werden.

5.1 Theoretische Prozessanalyse

In der Analyse von zeitlich abhängigen Daten wird auch von stochastischen Prozessen gesprochen. Dies bezeichnet eine mathematische Umsetzung von empirisch ermittelten Daten eines physikalischen Vorgangs. Die zeitliche Entwicklung dieses Vorgangs ist dabei hauptsächlich durch den Zufall bestimmt.

Abbildung 64 zeigt eine Datenreihe von Neigungswerten eines Nivel - Neigungssensors. Die Messzeit beträgt etwa 25 h mit einer Frequenz von 2Hz. Durch die konstante Frequenz wurden über den gesamten Messzeitraum Daten erzeugt und der Reihenfolge nach abgespeichert. Der Prozess $X(t)$ setzt sich damit aus zeitabhängigen Messwerten $x_i(t)$ zusammen.

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$$

5. Analyse von Zeitreihen

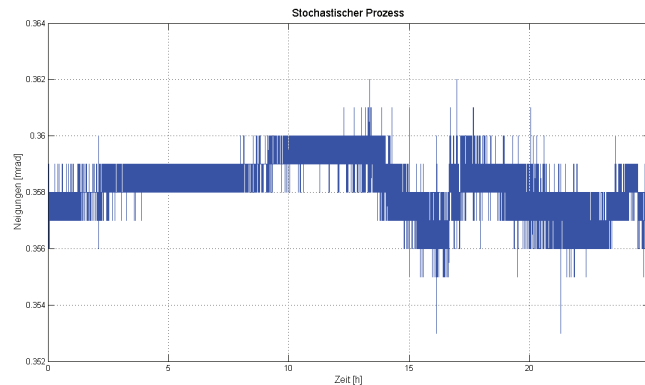


Abbildung 64: Zeitreihe von Neigungswerten

Um eine Analyse der Datenreihe zu machen, muss zunächst eine Stationarität der Messwerte erzeugt werden. Stationarität bedeutet, dass sich während des gesamten Prozesses der Mittelwert und die Varianz der Messwerte nicht ändert. Der Mittelwert repräsentiert in etwa den Erwartungswert $\mu_X(t)$ eines Prozesses. Beim Monitoring oder bei stochastischen Prozessen kommt es häufig vor, dass Messwerte um einen bestimmten Erwartungswert schwanken. Gründe dafür sind äußere Einflüsse wie Witterung und damit verbundene Temperaturschwankungen oder die interne Genauigkeit des verwendeten Messinstrumentes. Der Erwartungswert eines Prozesses berechnet sich mit:

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

Der Erwartungswert spiegelt eine theoretische Größe wider, die erreicht wird wenn eine Messung unendlich mal durchgeführt wird. Da dies nicht zu erfüllen ist, wird der empirische Mittelwert $\bar{X}(t)$ dem Erwartungswert gleichgesetzt. *Abbildung 65* zeigt den stochastischen Prozess mit dem enthaltenen Mittelwert und die Messreihe, nach Beseitigung des Mittelwertes.

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

5. Analyse von Zeitreihen

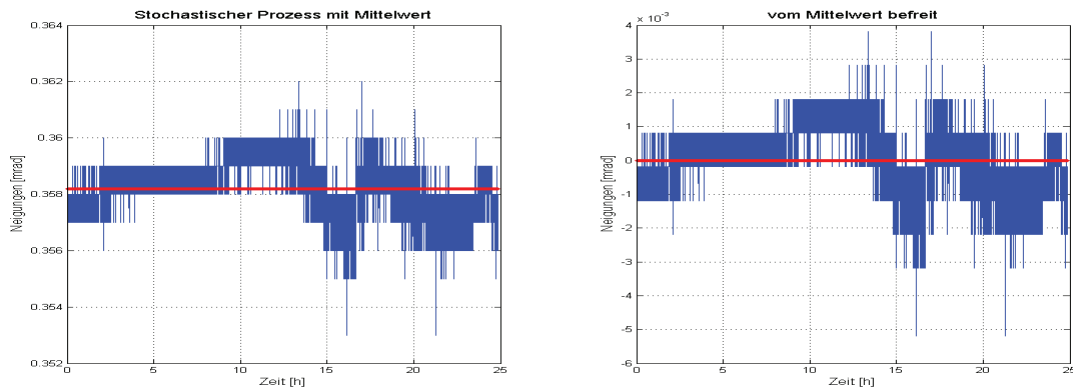


Abbildung 65: Beseitigung des Mittelwertes

Die Varianz zeigt die Abweichung des Messwertes vom Mittelwert. Die Varianz kann somit auch als Streuung der Messwerte angesehen werden. Sie berechnet sich mit:

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

Um bei einem stochastischen Prozess eine konstante Varianz zu erzeugen, muss die Messreihe vom Trend befreit werden. Der Trend zeigt sich als linearer Anstieg der gesamten Messreihe. In *Abbildung 66* ist der Prozess mit einem linearen Trend dargestellt. Nachdem dieser Trend beseitigt ist, ist der Mittelwert und die Varianz des Prozesses konstant und kann somit als stationär betrachtet werden.

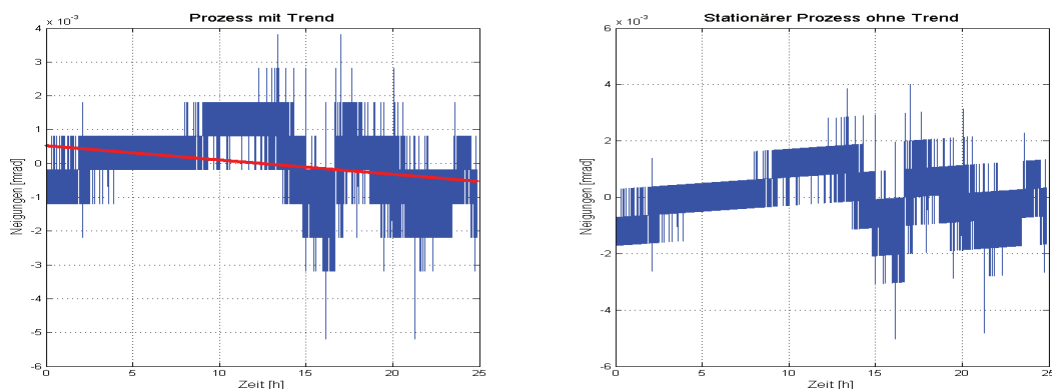


Abbildung 66: Zeitreihe mit linearem Trend

Im nächsten Schritt der Prozessanalyse folgt die Untersuchung auf vorhandene Frequenzen in den Messwerten. Dazu wird zunächst die sogenannte Autokovarianzfunktion $C(\tau)$ benötigt. Diese Funktion beschreibt den Zusammenhang zwischen einem Messwert $x(t)$ und den um eine Zeitspanne τ verschobenen Messwert $x(t+\tau)$. Dazu kann gesagt werden, dass benachbarte Messwerte, mit einem kleinen Wert für τ , eine höhere Ähnlichkeit besitzen wie Messwerte mit einem großen zeitlichen Abstand.

5. Analyse von Zeitreihen

Stochastische Prozesse beziehen sich auf physikalische Prozesse. Daher wirken sich physikalische Einflüsse, wie bspw. ein Temperaturanstieg, auf einen zeitlichen Raum der Messwerte aus und klingen dann wieder ab. Die theoretische Autokovarianzfunktion berechnet sich wie folgt:

$$C_X(t, \tau) = E\{[X(t) - \mu_X(t)][X(t+\tau) - \mu_X(t+\tau)]\}$$

$$C_X(t, \tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{[x_i(t) - \mu_X(t)][x_i(t+\tau) - \mu_X(t+\tau)]\}$$

Um nun von einer Zeitreihe zu einem Powerspektrum $P(\nu)$ (oder Energiespektrum) zu gelangen wird eine FOURIER-Transformation benötigt. Mit Hilfe dieser Transformation wird der Prozess vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt.

Dazu wird der Prozess $\xi(t)$ durch Überlagerung von harmonischen Schwingungen dargestellt. Da es sich bei stochastischen Prozessen um Zufallsprozesse handelt, erfolgt die Darstellung Approximation:

$$y(t) = \sum_k [a_k \cos 2\pi \nu_k t + b_k \sin 2\pi \nu_k t]$$

Die Koeffizienten a_k und b_k sind dabei die FOURIER-Koeffizienten und ν_k bezeichnet die enthaltenen Frequenzen. Dadurch, dass $\xi(t)$ ein stationärer Prozess ist, sind die Erwartungswerte der FOURIER-Koeffizienten:

$$E\{a_k\} = E\{b_k\} = 0,$$

$$E\{a_k^2\} = E\{b_k^2\} = E\left\{\frac{A_k^2}{2}\right\} \quad \text{mit } A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

$$E\{a_k b_k\} = 0$$

Nun wird in der Autokovarianzfunktion die Zeitreihe $X(t)$ durch den Prozess $\xi(t)$ ersetzt und die Approximation $y(t)$ eingefügt.

$$C(\tau) = \sum_k \left[E\{a_k^2\} \cos 2\pi \nu_k t \cos 2\pi \nu_k (t+\tau) + E\{b_k^2\} \sin 2\pi \nu_k t \sin 2\pi \nu_k (t+\tau) \right. \\ \left. + E\{a_k b_k\} (\cos 2\pi \nu_k t \sin 2\pi \nu_k (t+\tau) + \sin 2\pi \nu_k t \cos 2\pi \nu_k (t+\tau)) \right]$$

Nach der Anwendung von Additionstheoremen und dem Einsetzen der Erwartungswerte für a_k und b_k bleibt folgende Funktion übrig:

$$C(\tau) = \sum_k \left[E\left\{\frac{A_k^2}{2}\right\} \cos 2\pi \nu_k \tau \right]$$

5. Analyse von Zeitreihen

Nun erfolgt der Übergang vom diskreten in ein kontinuierliches Spektrum. Dabei erfolgt die Umformung von Summen- auf Integraldarstellung.

$$C(\tau) = \int_0^{\infty} P(\nu) \cos 2\pi\nu\tau \, d\nu$$

Um nun von der Zeitfunktion $C(\tau)$ in die Frequenzfunktion $P(\nu)$ zu transformieren wir die Formel:

$$P(\nu) = 4 \int_0^{\infty} C(\tau) \cos 2\pi\nu\tau \, d\tau$$

benötigt. Diese beiden Funktionen bilden ein Paar von FOURIER-Transformierten. Sie bilden das Wiener-Chintchin-Theorem, nachdem für jeden stationären Gaus'schen Zufallsprozess die FOURIER-Transformierte $P(\nu)$ der Autokovarianzfunktion $C(\tau)$ existiert.

[Heunecke; et al., 2013]

Abbildung 67 zeigt eine zeitliche Messreihe eines Beschleunigungssensors auf dem Schwingungserzeuger der Hochschule Neubrandenburg. Die obere Darstellung bilden die stationären Messwerte und im unteren Schaubild ist das in den Messwerten enthaltene Powerspektrum zu sehen.

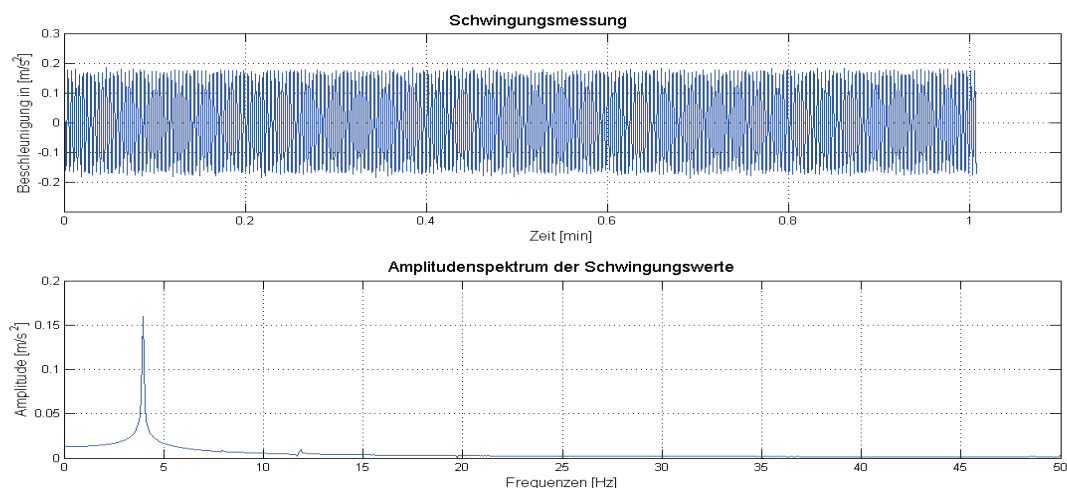


Abbildung 67: Zeitreihe und Powerspektrum

5.2 NYQUIST-Kriterium

Das NYQUIST- Kriterium ist ein Begriff aus der Signalanalyse. Das zu analysierende Signal ist ein kontinuierlicher, physikalischer Prozess. Dieses Signal wird mit einem entsprechenden Sensor erfasst. Der Sensor besitzt dabei nur eine bestimmte Abtastfrequenz, mit der das kontinuierliche Signal diskretisiert wird. So entstehen lediglich Messwerte mit einem zeitlich, kontinuierlichen Abstand Δt . Je größer dieser Abstand Δt ist, je ungenauer wird das Signal erfasst. Dies führt dazu, dass kurz- oder langwellige Schwingungen nicht unterschieden werden können. Bei diskreter Abtastung können verschiedene Schwingungen dennoch die gleichen Messwerte erzeugen (ABB 68). Dabei wird auch von einem Aliaseffekt gesprochen.

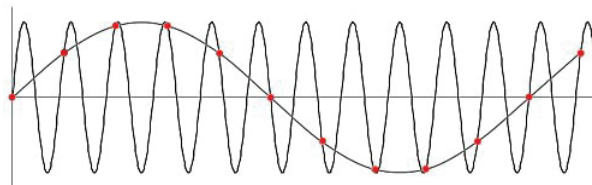


Abbildung 68: Aliaseffekt

[pce-instruments.com]

Um diesen Effekt zu unterdrücken ist es von Vorteil die zu erwartenden Frequenzen zu kennen. Dementsprechend muss die Abtastrate des verwendeten Sensors angepasst werden. Um eine Sinusschwingung detektieren zu können, werden neben dem Anfangspunkt noch zwei weitere Messpunkte in einer vollen Periode benötigt. Die höchstmögliche zu erfassende Frequenz ist daher die NYQUIST-Frequenz. Sie berechnet sich mit:

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

Daher gilt als Faustformel, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so groß sein muss, wie die zu erfassende Signalfrequenz.

[Heunecke; et al., 2013]

5.3 Umsetzung der Signalanalyse mit Matlab

Zur Verarbeitung der erzeugten Daten wird die Software MATLAB (MATrix LABoratory) der Firma THE MATHWORKS benutzt. Dieses Programm ermöglicht mathematische Berechnungen mit Hilfe von Matrizen und die anschließende grafische Darstellung. Im folgenden Abschnitt werden die unter 5.1 beschriebenen Analysen durch einen MATLAB- Quellcode dargestellt.

5.3.1 Einlesen der erzeugten Messdaten

Zu Beginn eines jeden MATLAB- Quellcodes empfiehlt es sich folgende Begriffe zu verwenden:

```
clear all; clc; close all;  
  
tic
```

Bei den Berechnungsprozessen greift MATLAB auf verschiedene Variablen zurück, die in den Programmen vorhanden sind, um keine Variablen aus alten, zuletzt geöffneten Programmen zu verwenden und damit evtl. die Berechnung zu verfälschen wird der Befehl `clear all` benutzt. Beim Starten eines Programms werden Ergebnisse und Rechenschritte im sogenannten CommandWindow angezeigt. Da mehrmaliges Ausführen der Programme das CommandWindow zusätzlich füllen und die Übersicht verloren gehen würde, kann dieses Fenster mit `clc` gereinigt werden. Zuletzt geöffnete Fenster mit geplotteten Inhalten lassen sich mit `close all` schließen. Der Befehl `tic` startet einen Timer. Dieser Timer läuft im Hintergrund des Programms und misst die Zeit, die der Computer für die Verarbeitung der Befehle benötigt. Mit `toc` kann die momentane Zeit ausgegeben werden. Es ist möglich an mehreren Stellen des Quellcodes einen `toc` Befehl zu verwenden, um verschiedene Rechenabschnitte zeitlich zu messen.

Beim Einlesen der Daten muss zunächst eine Vorbereitung der Daten erfolgen. Da nicht jeder Sensor die Messwerte im gleichen Format und in der gleichen Fülle bereitstellt, muss an manchen Stellen editiert werden. Die Messdaten müssen spaltenweise abgespeichert sein und sollten dabei eine einheitliche Trennung der Spalten aufweisen. Die Datensätze können wie folgt aussehen:

5. Analyse von Zeitreihen

LEICA Nivel210-C, Neigungen aufgezeichnet mit dem Programm *Nivel210.exe*:

```
27.07.2015 17:54:54.510;-0.353 ;+0.357 ;+21.5
27.07.2015 17:54:56.495;-0.353 ;+0.357 ;+21.5
27.07.2015 17:54:58.495;-0.353 ;+0.357 ;+21.5
```

SBG IG-500E, Beschleunigungen aufgezeichnet mit dem Programm SBGCENTER:

```
time accel X accel Y accel Z temp 0 temp 1
0 0.01467 0.02802 -9.85256 0.00000 0.00000
0 0.00237 0.04267 -9.85252 0.00000 0.00000
0 0.00730 0.04027 -9.86472 0.00000 0.00000
```

iPhone 5, Beschleunigungen aufgezeichnet mit der SENSORLOG App:

```
2015-08-15 10:26:16.856,1,93E95724-4B28-4AFA-8063-C24E72C8379F,101932.7319886667,
-0.006378173828125,-0.004241943359375,-1.007675170898438
2015-08-15 10:26:17.055,2,93E95724-4B28-4AFA-8063-C24E72C8379F,101932.9307647917,
-0.0035858154296875,-0.0062103271484375,-1.010086059570312
2015-08-15 10:26:17.253,3,93E95724-4B28-4AFA-8063-C24E72C8379F,101933.1294019583,
-0.0052032470703125,0.0002899169921875,-1.013168334960938
```

Die Messdatei des SBG Sensors besitzt einen Header, der die Datenspalten beschriftet. Zum Einlesen der Datei muss dieser Header entfernt werden. Das Einlesen der Messdaten erfolgt dann mit den Befehlen:

```
fid = fopen('Langzeit_Nivel-3.txt');
Daten = textscan(fid,'%s %f %f %f','delimiter',';'); %NIVEL
Daten = textscan(fid,'%*f %f%f%f %*f%f','delimiter',' '); %sbg IG-500E
Daten = textscan(fid,'%*s%f*s%f %f%f%f','delimiter',''); %iPhone
fclose(fid);
```

Damit wird die Messdatei geöffnet und unter der Variablen `fid` abgespeichert. Im nächsten Schritt erfolgt eine zeilenweise Abarbeitung der Datei. Durch die angegebene Folge `'%s %f %f %f'` wird festgelegt, welches Datenformat der gelesene Wert besitzt. Bei `%s` wird der gelesene Wert als String (Zeichenkette) abgespeichert. Mit `%f` erfolgt die Konvertierung in einen `double`-Wert. Durch das `*` in `%*f` wird der Wert zwar gelesen, aber nicht weiter abgespeichert. Der Befehl `'delimiter' ';'` gibt das Trennzeichen an, mit dem die einzelnen Spalten in der Messdatei von einander getrennt werden. Bei der Nivel Datei ist das ein Semikolon. Die jeweils gelesenen Werte werden in eine Matrix `Daten` gespeichert. Anschließend wird die Datei wieder geschlossen.

5. Analyse von Zeitreihen

Zur besseren Übersicht der Daten wird nun die Matrix `Daten` in einzelne Spaltenvektoren aufgeteilt. Dies geschieht mit:

```
time = [Daten{1}];  
x     = [Daten{2}];  
y     = [Daten{3}];  
temp = [Daten{4}];
```

Durch die Festlegung der Datenformate beim Einlesen der Datei besitzt nun der Vektor `time` einen Inhalt, bestehend aus Strings. Die restlichen Vektoren beinhalten die Messwerte als `double`-Werte.

Nun kann eine Multiplikation ausgeführt werden, um bspw. die Einheiten der Beschleunigung von $[g]$ in $[m/s^2]$ zu überführen. Um jeden einzelnen Wert des Vektors mit einem Faktor zu versehen, wird folgender Befehl genutzt:

```
AccelZ_ms2 = AccelZ_g .* 9.80665;
```

5.3.2 Erzeugen einer Zeitreihe

Für die weiteren Berechnungen und die Visualisierung wird eine Zeitreihe der Messwerte benötigt. Jedem Messwert muss eine entsprechende Zeitmarke zugewiesen werden. Am Beispiel der `Nivel` Datei existiert ein solcher Vektor mit den entsprechenden Zeitwerten. Die Verknüpfung von `double`-Messwerten mit `String`-Verkettungen ist nicht möglich. Daher muss eine Zeitreihe erzeugt werden. Dies geschieht mit Hilfe der bekannten Frequenz des Messinstrumentes und der Anzahl der Daten in der Messdatei:

```
Messwerte = x; % Zuweisen der Messwerte  
AnzahlDaten = length(Messwerte); % bestimmt die Länge des Vektors  
frequenz = 4; % [Hz]  
dt = 1/frequenz; % [sec] – Zeitintervall zw. zwei Messwerten  
Zeit_sec=(0:dt:AnzahlDaten*dt-dt)'; % erzeugen eines Zeitvektors  
Zeit=Zeit_sec./3600; % Zeit [h]
```

5.3.3 Erzeugen der Stationarität

Um die Stationarität der Messwerte zu erzeugen, muss der Mittelwert und der Trend beseitigt werden. Mit dem Befehl `mean(x)` wird der Mittelwert des Vektors `x` berechnet. Im Anschluss werden die Messwerte um den Mittelwert reduziert.

```
MittelX = mean(x);  
X_red = x-MittelX;
```

Zur Trendberechnung werden die Befehle `polyfit` und `polyval` genutzt. Mit `polyfit` werden zunächst die Parameter einer Trendfunktion bestimmt. Die Parameter beziehen sich auf die gewöhnliche Polynomdarstellung $f(x) = a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$. Der letzte Wert in der Klammer bezeichnet den Grad des Polynoms. Mit dem Befehl `polyval` wird ein Vektor erzeugt, der die Funktionswerte des Trends besitzt.

```
parameterX = polyfit(Zeit,X_red,1);  
regressionX = polyval(parameterX,Zeit);
```

Um nun eine trendbefreite Messreihe zu erzeugen, muss der Trend von den Messwerten subtrahiert werden.

```
X_ohneTrend = X_red-regressionX;
```

5.3.4 Erzeugen des Powerspektrums

Im nächsten Schritt wird die Zeitreihe der Messwerte in den Frequenzraum überführt. Dazu wird zunächst die maximale Schrittweite `MaxLag` für die Berechnung der Autokovarianzfunktion bestimmt. Diese maximale Schrittweite ist mit einem maximalen τ aus 5.1 gleichzusetzen. Im Anschluss werden die trendbefreiten Messwerte und der Wert für `MaxLag` an die Funktion `AutoKov` übergeben. Diese Funktion führt die Berechnung der Autokovarianzfunktion aus und liefert einen Vektor `Akvf` mit den entsprechenden Autokovarianzen.

```
Rohwerte = X_ohneTrend;  
MaxLag = (round(AnzahlDaten/10)+1);  
Akvf = AutoKov(Rohwerte,(MaxLag+1));
```

5. Analyse von Zeitreihen

Die Funktion für die Berechnung der Autokovarianz kann in MATLAB auch als eine extra Datei ausgelagert werden. Durch den Befehl `Akvf = AutoKov(Rohwerte, (MaxLag+1));` wird das separate Unterprogramm aufgerufen und führt die Berechnungen mit den Übergabeparametern `Rohwerte` und `(MaxLag+1)` aus.

Die Funktion nimmt die Übergabeparameter auf und speichert sie unter den Variablen `x` und `MaxLag` für weitere Berechnungen.

```
function [AKV] = AutoKov(x,MaxLag)
N = length(x); % Länge des Vektors (Anzahl der Elemente)
MittelWert=sum(x)/N; % Berechnung des Mittelwertes der Messwerte
xred = x-MittelWert; % Messwerte werden vom Mittelwert befreit
Cxx=zeros(1,MaxLag); % Erzeugen eines Nullvektors mit den Dimensionen (1,MaxLag)
for k=1:MaxLag % äußere Schleife von 1 bis MaxLag
    for i=1:N-(k-1) % innere Schleife von 1 bis N-(k-1)
        Cxx(k)=Cxx(k)+(xred(i)*xred(i+(k-1)));
    end
    AKV(k)=Cxx(k)/(N-(k-1)-1);
end
end
```

In den Schleifen erfolgt ein Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der empirischen Autokovarianzfunktion:

$$\hat{C}(k) = \frac{1}{n-k-1} \sum_{j=1}^{n-k} (x_j - \bar{X})(x_{j+k} - \bar{X})$$

Die ausgelagerte Berechnungsfunktion gibt den Vektor `AKV` an das Hauptprogramm zurück. Dort wird es als `Akvf` wieder aufgenommen und für weitere Berechnungen genutzt. In den nächsten Schritten wird die Zeitfunktion in eine Frequenzfunktion überführt. Dazu wird die FOURIER- Cosinus – Transformation angewendet. Die einzelnen Berechnungsschritte werden in einer Schleife ausgeführt und liefern die Energiewerte der einzelnen Frequenzen.

```
for k=0:MaxLag
    Power(k+1)=0.5*(Akvf(1)+((-1)^k)*Akvf(MaxLag+1));
    CosF=cos(pi*k*(1:(MaxLag-1))/MaxLag);
    ZwS1=sum(Akvf(2:MaxLag).*CosF);
    Power(k+1)=4*(Power(k+1)+ZwS1)*dt;
```

5. Analyse von Zeitreihen

end

Abschließend wird nach dem NYQUIST- Kriterium ein Vektor erzeugt, der einer Zeitreihe gleichzusetzen ist, jedoch beinhaltet er keine Zeitmarken sondern eine geordnete Reihe von Frequenzen. Mit Hilfe der Energiewerte aus der FOURIER- Transformation werden die Amplituden für des Powerspektrum berechnet. Sie sind die zugehörigen Funktionswerte der Frequenzreihe.

```
Nyquist = 2*dt;  
Frequenzen=(0:MaxLag)/(MaxLag*Nyquist);  
HilfsParameter=MaxLag*dt;  
Amp=sqrt(abs(Power)/HilfsParameter);
```

5.3.5 Plotten der Daten

Zur Visualisierung der Daten wird in MATLAB ein sogenannter `plot` Befehl genutzt. Die einzelnen Plots tauchen in einem neuen Fenster auf. Um ein Fenster neu anzulegen wird `figure(1)` verwendet. Die Ziffer in der Klammer legt eine Reihenfolge der auftauchenden Fenster fest. Wenn in einem Fenster mehrere Grafiken angezeigt werden sollen, wird `subplot` benötigt. Mit `subplot` können die Positionen der einzelnen Plots konfiguriert werden. Dabei legen die ersten beiden Zahlen die Anzahl der Plots fest und die letzte Zahl bestimmt die Position `subplot(zeilen,spalten,position)`. Nun werden die Datenreihen ausgewählt, die dargestellt werden sollen. Die erste Reihe wird als mathematische x-Achse angenommen, die zweite Reihe stellt die Funktionswerte dar. Mit 'b' können die Graphen unterschiedlich eingefärbt werden (b - blue, r - red, g - green ...). Die Befehle `title`, `xlabel` und `ylabel` stellen Beschriftungen dar. Sie können mit `FontName` und `FontSize` zusätzlich angepasst werden. Mit `legend` öffnet sich im Plot ein kleines Textfenster, das als Legende dient. In dem Fenster wird ein kurzer Anstrich in der Farbe des Graphen dargestellt und beschriftet. Um die Graphen besser ablesen zu können kann mit `grid` ein Raster ein- oder ausgeschaltet werden.

```
figure(1)  
subplot(1,2,1)  
plot(zeit,y,'b',zeit,Mittelwert,'.r')  
title ('Stochastischer Prozess mit Mittelwert','FontName','Sans','FontSize',14)
```

5. Analyse von Zeitreihen

```
xlabel('Zeit [h]', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12)
ylabel('Neigungen [mrad]', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 12)
legend('Messwerte');
grid on
```

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Die vermuteten Schwingungen in der Marienkirche werden durch das Glockenspiel hervorgerufen. Jedoch nicht durch die viertelstündigen Hammerschläge auf die Glocken, sondern durch das Spiel der gesamten Glocken. Bei dem Glockenspiel werden alle fünf Glocken in eine Pendelbewegung versetzt, die sich über den hölzernen Glockenstuhl an das Gebäude übertragen soll. Betroffen von dieser Erscheinung ist lediglich der 90m hohe Kirchturm, in dem sich in einer Höhe von ca. 36m der Glockenstuhl befindet. Da es sich bei dem Kirchturm der Marienkirche um ein Bauwerk mit quadratischem Grundriss handelt, wird vermutet, dass die Bewegungen parallel zu den Gebäudekanten verlaufen. Durch die massive Bauweise des Kirchturms kann vermutet werden, dass schwingende Bewegungen, so sie denn auftreten, einen Bereich von wenigen Zentimetern nicht überschreiten werden.

6.1 Vorbereitung

Zur Überprüfung der Bewegungen des Kirchturms werden zwei verschiedene Verfahren angewendet. Zum einen wird der Kirchturm von Außerhalb mit Tachymetern überwacht und zum anderen mit verschiedenen Messstationen im Inneren des Turms. Für die inneren Messungen werden Neigungssensoren und Beschleunigungssensoren eingesetzt.

Die tachymetrischen Messungen werden von zwei verschiedenen Standpunkten aus durchgeführt. Die Prismen die beobachtet werden, befinden sich an der nördlichen und an der westlichen Fassade des Kirchturms. Die Standpunkte der Tachymeter sind damit ebenfalls nördlich und südlich des Kirchturms. Der nördliche Standpunkt befindet sich dabei auf dem Parkplatz hinter dem RADISSON BLU Hotel. Der westliche Standpunkt ist auf einem Innenhof hinter dem DRK BLUTSPENDEDIENST (ABB 69). Diese beiden Orte sind öffentlich zugänglich, sodass keine Genehmigung für deren Betreten erforderlich ist. Durch das Messen der Prismen, können die Bewegungen in Nord-Süd- Richtung und Ost-West- Richtung selektiert werden. Eine Bewegung in Nord-Süd- Richtung wird vom nördlichen Standpunkt aus in den Streckenmessungen zu finden sein, während sie vom westlichen Standpunkt aus in der Richtungsmessung auftaucht. Die Bewegung in Ost-West- Richtung

6. Probeläuten der Kirchenglocken

taucht vom nördlichen Standpunkt aus in der Richtungsmessung auf und ist in den Streckenmessungen des westlichen Standpunktes zu sehen.

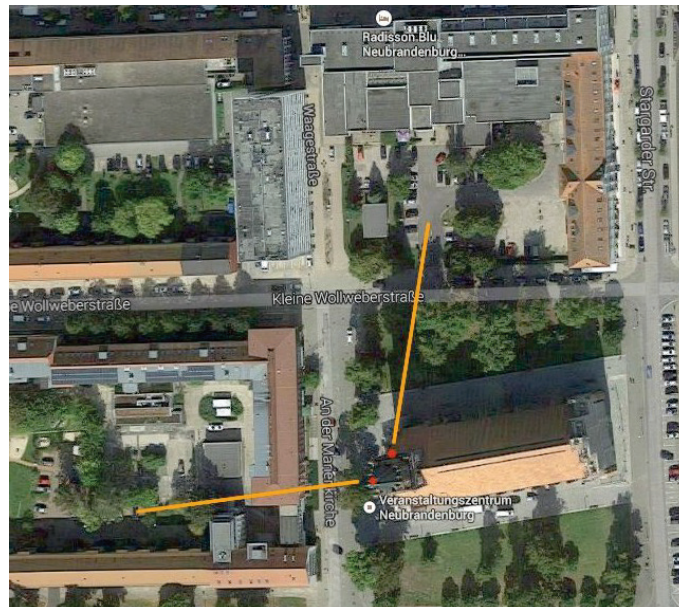


Abbildung 69: Lage der Tachymeterstationen

[[google.de/maps](https://www.google.de/maps)]

Die inneren Messstationen für die Neigungssensoren befinden sich an drei verschiedenen Positionen an der östlichen Gebäudewand. *Abbildung 70* zeigt schemenhaft die Standorte der Nivel- Neigungssensoren.

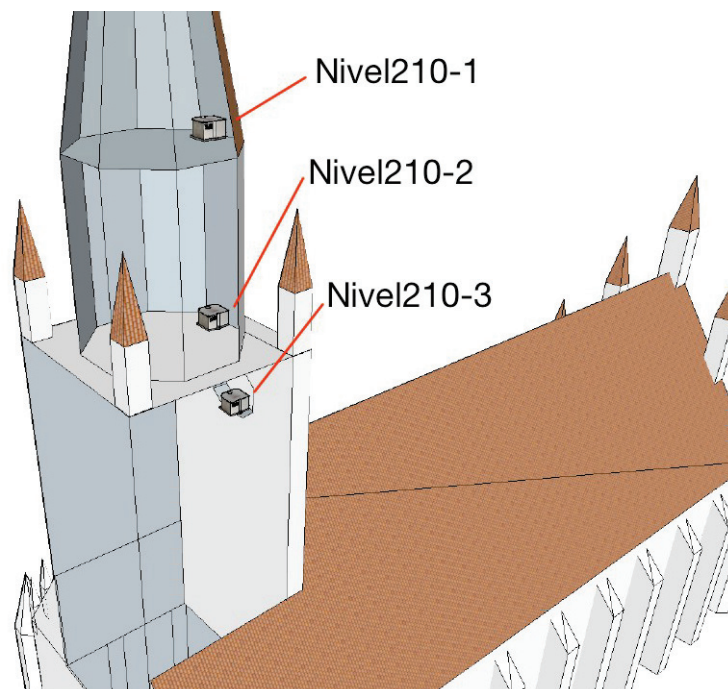


Abbildung 70: Standorte der Nivel Neigungssensoren

[SketchUp – eigene Darstellung]

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Um nach dem Messvorgang eine Aussage über das Verhalten des Kirchturms der Marienkirche treffen zu können, werden die Neigungssensoren an der gleichen Gebäudeseite, in verschiedenen Höhen angebracht. Dadurch kann untersucht werden, ob sich der obere Teil des Kirchturms stärker neigt als der untere. Der höchste Standpunkt befindet sich auf dem Dachboden unter dem Spitzdach des Kirchturms (Höhe = 55m). Die zweite Position ist auf dem Fußboden des Oktogons (Höhe = 45m). Der dritte Standpunkt befindet sich auf Höhe der Glockenstube, in einer Wandvertiefung für eine der Turmuhren (Höhe = 40m). Jede dieser Messpositionen wird zusätzlich mit einem Laptop zur Datenaufzeichnung ausgestattet.

6.2 Messablauf während des Probeläutens

Das Probeläuten wurde in drei Abschnitte unterteilt. Dazu gehörte das reguläre 12-Uhr Läuten an einem Freitag, bei dem lediglich die Gebetsglocke in Schwingung versetzt wurde. Im Anschluss wurden alle fünf Glocken für einen Zeitraum von 10min geläutet. Abschließend erfolgte das Spiel der Sakramentsglocke für das sogenannte Beerdigungsläuten. Ab 12.05Uhr begann das 12Uhr Läuten. Das Glockenspiel aller Glocken folgte um 12.13Uhr und hielt ca. 10min an. Das Beerdigungsläuten startete um 12.35Uhr und spielte ebenfalls für 10min.

6.2.1 Tachymetrische Messung

Für die tachymetrische Messung kamen zwei verschiedene Messinstrumente der Firma LEICA GEOSYSTEMS zum Einsatz. Das waren die Ingenieurtachymeter TS15i und TS30. Das LEICA TS15i wurde auf dem nördlichen Messstandort, auf dem Parkplatz des RADISSON Hotels, aufgebaut. Das TS30 Tachymeter befand sich an der westlichen Messposition. Beide Tachymeter wurden mit Stativen an ihre Position gebracht. Sie führten eine lokale Messung ohne Anschluss an ein geodätisches Festpunktfeld aus. Dabei wurden die Standpunkte mit willkürlichen Koordinaten festgelegt. Eine Orientierung zu einem koordinatenmäßig bekannten Ziel war nicht vorgesehen.

Beide Tachymeter arbeiteten mit den gleichen Konfigurationen. Es wurde ein Messintervall

6. Probeläuten der Kirchenglocken

von 0,5s (= 2Hz) eingestellt und die Prismen wurden mit Hilfe des Lock-Modus erfasst. Das bedeutet, dass während der gesamten Messung eine Zielverfolgung stattfand. Die Messung der Strecken erfolgte dabei im Tracking- Modus, sodass eine kontinuierliche Datenerfassung von Strecken und Richtungen gegeben war.

6.2.2 Neigungsmessung

Für die Erfassung der Neigung des Kirchturms wurden drei LEICA Nivel210-C Neigungssensoren eingesetzt. Da für die Neigungssensoren keine feste Installationsmöglichkeit gegeben war, wurden sie mit Schrauben versehen, um eine präzise Dreipunktauflage zu gewährleisten. Dies ist erforderlich, da der Untergrund im Inneren der Kirche oft uneben und rau ist. Die Nivel- Neigungssensoren besitzen eine plan geschliffene Unterseite zur Positionierung auf dem Untergrund. Auf Grund der Rauheit und Verschmutzung durch Staub kann diese präzise Positionierung nicht gewährleistet werden. Die Verwendung von angespitzten Schrauben macht eine solche Positionierung möglich. Die Spitzen wirken dabei wie Stativbeine, die sich mit einer kleinen Auflagefläche an die Gegebenheiten des Untergrundes anpassen. Kontermuttern an den Schrauben helfen dabei die Neigungssensoren zu horizontieren. Für eine grobe Horizontierung ist an der Oberseite des Nivel-Sensors eine Dosenlibelle im Gehäuse verbaut. Die präzise Horizontierung erfolgt im Anschluss mit der Verwendung der Software *Nivel210.exe*. Dabei werden die momentan gemessenen Werte der Neigung angezeigt und können manuell an den Kontermuttern justiert werden.

Die Positionen der Neigungssensoren wurden so gewählt, dass sie sich an der gleichen Gebäudewand in verschiedenen Höhen befinden. Die Orientierung erfolgte ebenfalls bei allen drei Stationen gleich. Die Neigungssensoren wurden so ausgerichtet, dass die positive Y-Achse nach Norden zeigte.

6.3 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Nach Beendigung des Probeläutens wurden die Messergebnisse ausgewertet. Für die rechnerische Auswertung und die anschließende Visualisierung wurde die Software MATLAB genutzt.

6.3.1 tachymetrische Messung

Beide Tachymeter erzeugen Messdateien vom Format *.gsi und eine zusätzliche Datenbank, in der die Messwerte ebenfalls enthalten sind. Auf Grund der durchgängigen Messung, befinden sich alle Daten der einzelnen Glockenspielszenarien in einer Datei.

LEICA TS15i – der nördliche Standpunkt

Vom nördlichen Standpunkt aus werden die Bewegungen in Nord-Süd- Richtung in den Schrägstrecken zu erkennen sein. Die Bewegungen in West-Ost- Richtung tauchen in den Horizontalrichtungen auf.

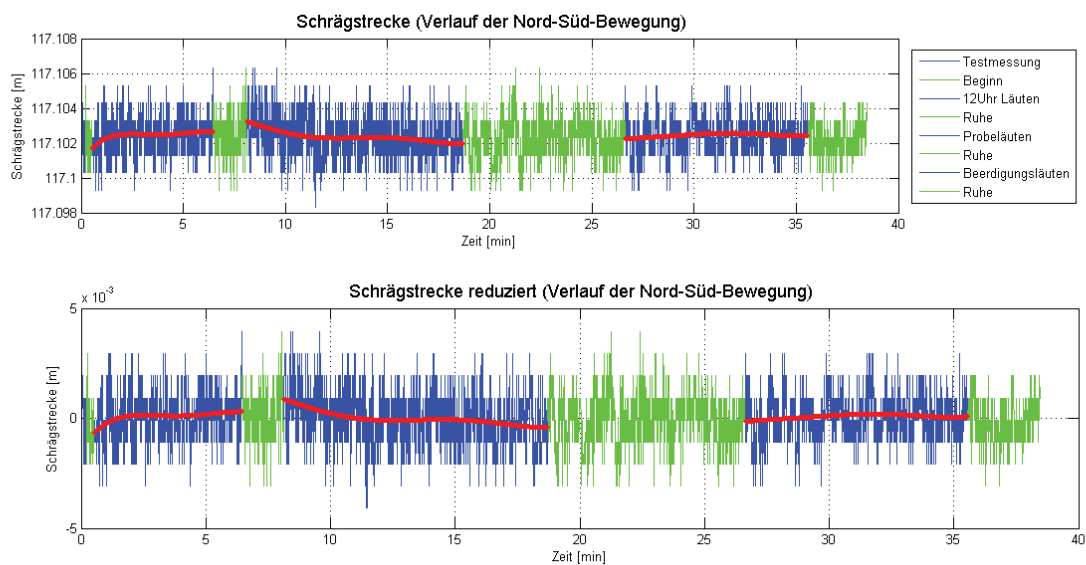


Abbildung 71: Schrägstrecken des nördlichen Standpunktes

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Abbildung 71 zeigt die Schrägstrecken der gesamten Messung. Blau eingefärbt sind die Abschnitte während der Glockenspiele. Der erste Abschnitt zeigt das 12Uhr- Läuten. Während des zweiten blauen Abschnittes läuteten alle fünf Glocken und der letzte blaue Abschnitt zeigt das Beerdigungsläuten. Die grünen Abschnitte in der Darstellung sind die Momente in denen kein Glockenspiel zu hören war.

In der zweiten Darstellung sind die Daten um den gesamten Mittelwert reduziert. Dies ermöglicht eine Aussage über die erfassten Bewegungen in Nord-Süd- Richtung. Die Spanne zwischen dem kleinsten und dem größten Wert beträgt bei dem 12Uhr Läuten 6,0mm, die Spanne des zweiten Abschnittes beträgt 7,5mm und die des Beerdigungsläutens 6,0mm. Die Genauigkeit des TS15i wird mit $2\text{ mm} + 1,5\text{ ppm}$ angegeben. Das ergibt bei der Entfernung von 117m eine Ungenauigkeit von 2,2mm. Die ermittelten Werte sind daher kein Messrauschen sondern tatsächliche Bewegungen der Kirche im Millimeterbereich.

Um die einzelnen Bereiche besser darstellen zu können, wurden sie von einander getrennt (ABB 72 – 74). Zusätzlich wird das Powerspektrum der Messwerte gezeigt. Die Amplituden verheißen, dass sich jede berechnete Frequenz unterhalb von 0,5mm befindet. Diese Frequenzen sind daher nur auf theoretischem Wege entstanden. Bei einer Messgenauigkeit von 2,2mm auf 117m Entfernung wären solche Amplituden nicht detektierbar. Auf Grund der Messfrequenz von 2Hz sind nur Frequenzen bis zu 1Hz erfassbar.

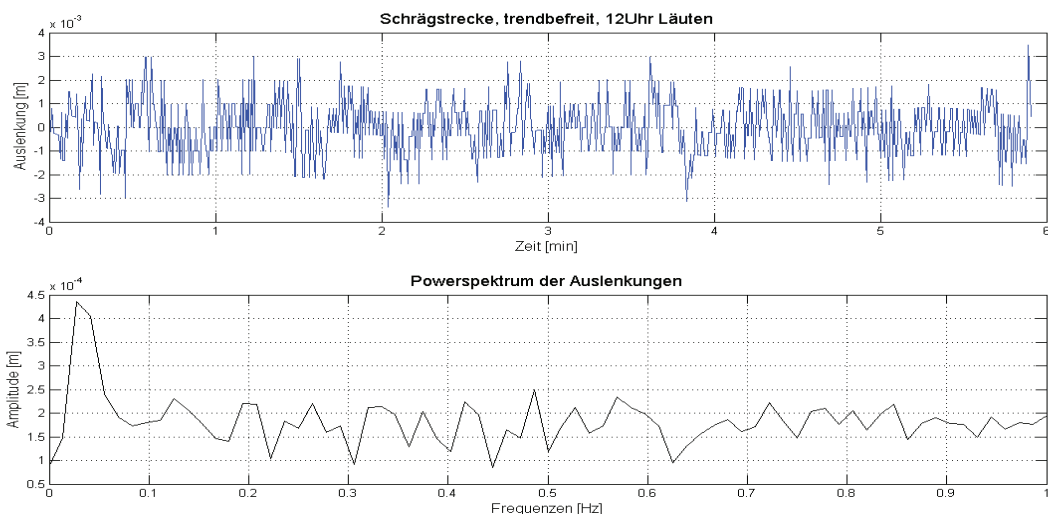


Abbildung 72: Schrägstrecken des 12Uhr Läutens (TS15)

6. Probeläuten der Kirchenglocken

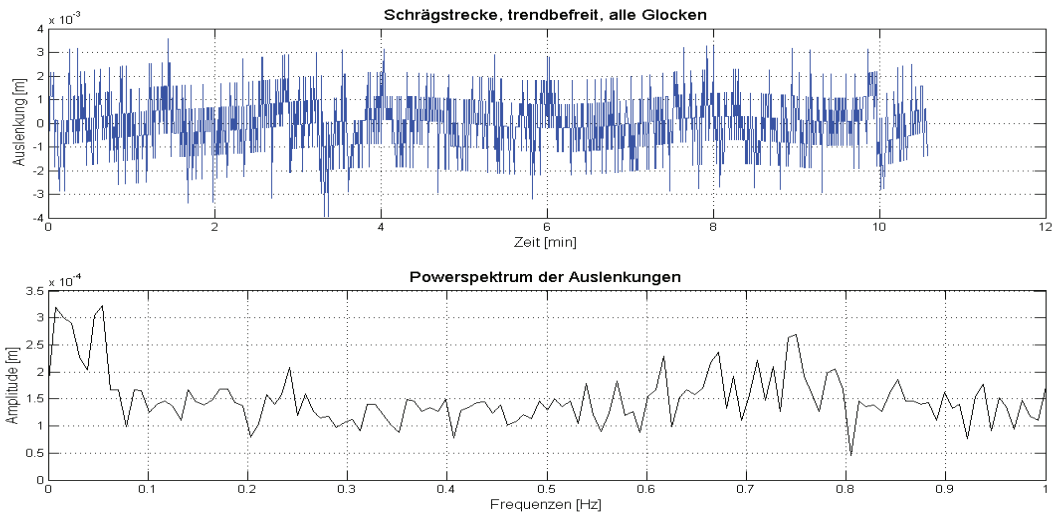


Abbildung 73: Schrägstrecken des Läutens aller Glocken (TS15)

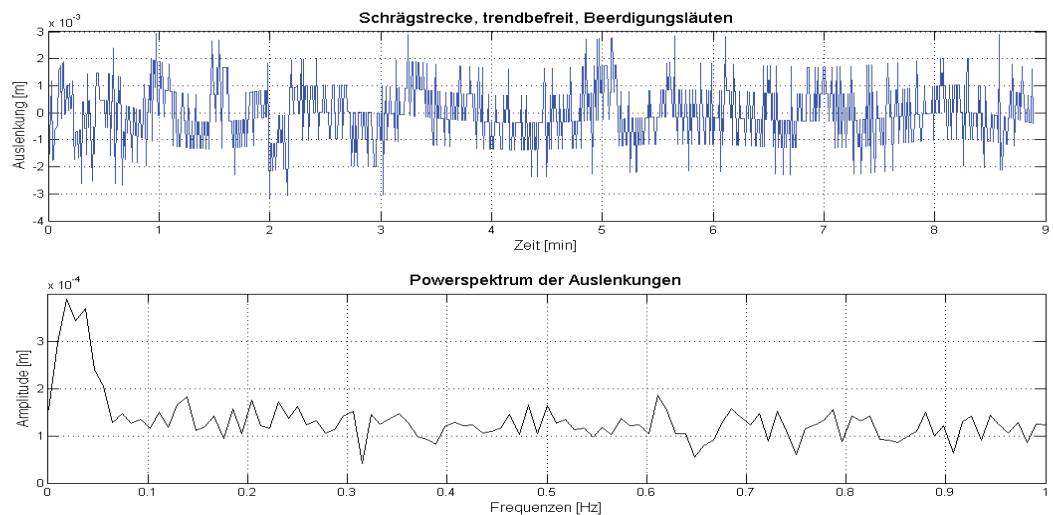
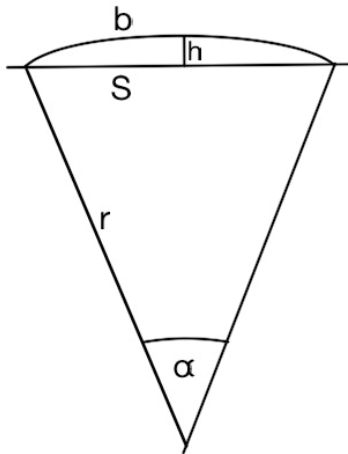


Abbildung 74: Schrägstrecken des Beerdigungsläutens (TS15)

Im nächsten Schritt wird die Richtungsmessung ausgewertet. Der gesamte Verlauf der Horizontalrichtungsmessung ist in *Abbildung 75* dargestellt. Zur Verdeutlichung welche seitlichen Ausschläge diese Richtungen bewirken, wurden die Richtungen mit der Bogenformel umgerechnet. Für die Berechnung wurde die gemittelte Schrägstrecke der gesamten Messung von 117,1024m benutzt. Dabei ist zu erkennen, dass die seitliche Auslenkung der gesamten Messung in einem Bereich von 6mm liegt. Zur besseren Auswertung werden die Datenreihen wieder gesplittet (*ABB 76 – 78*).

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Bei der Berechnung mit der Bogenformel wird die seitliche Auslenkung nicht als geradlinige Strecke berechnet, sondern es wird die Länge eines Bogenstückes b bestimmt. Dies geschieht mit der Formel:



$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho}$$

Bei einer maximalen Winkelspannung von $\alpha = 3,4 \text{ mgon}$ über den gesamten Messzeitraum und einer gemittelten Entfernung von $r = 117,1024 \text{ m}$ ergibt sich ein Bogenstück von der Länge $b = 6,254 \text{ mm}$. Für die Berechnung der Sehne S wird folgende Formel benötigt:

$$S = 2r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

Mit den gleichen Werten ergibt sich dadurch eine Sehnenlänge von $S = 6,254 \text{ mm}$. Die Vorgehensweise der Berechnung macht daher keinen Unterschied. Auch die Verwendung der gemittelten Strecke über den gesamten Messzeitraum ist unproblematisch. Die gemessenen Schrägstrecken befinden sich während der kompletten Messung in einem Bereich zwischen $117,1062 \text{ m}$ und $117,0985 \text{ m}$. Die berechneten Bogenstücke für die entsprechenden Entfernungen sind $b_{117,1062} = 6,2543 \text{ mm}$ und $b_{117,0985} = 6,2534 \text{ mm}$. Diese Unterschiede wirken sich nicht auf die Messergebnisse aus. Auf Grund dieser Erkenntnis wird in den folgenden Berechnungen nach der gleichen Methode verfahren.

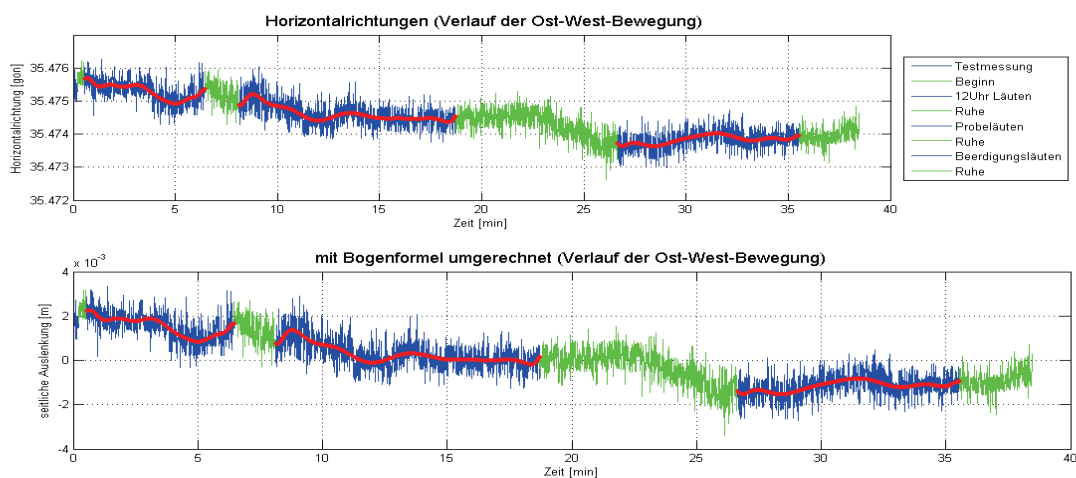


Abbildung 75: Horizontalrichtungen des nördlichen Standpunktes

6. Probeläuten der Kirchenglocken

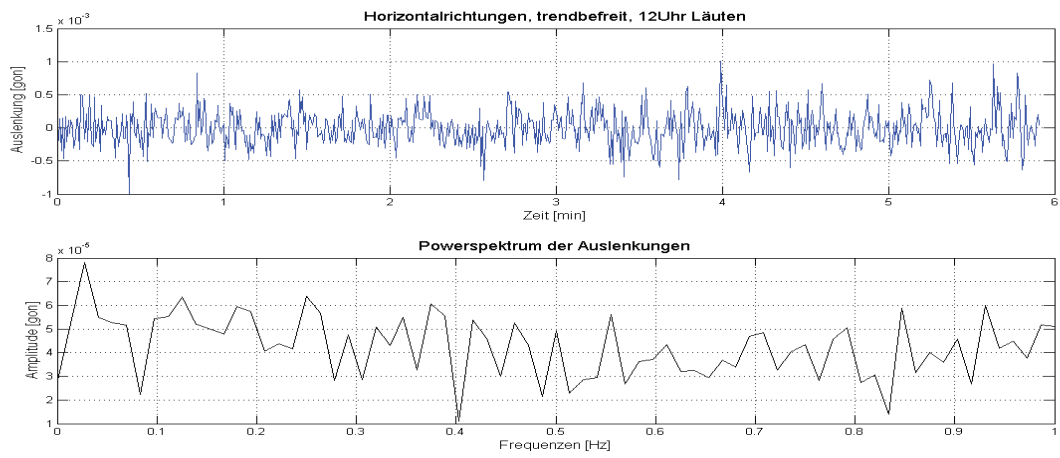


Abbildung 76: Horizontalrichtungen des 12Uhr Lätens (TS15)

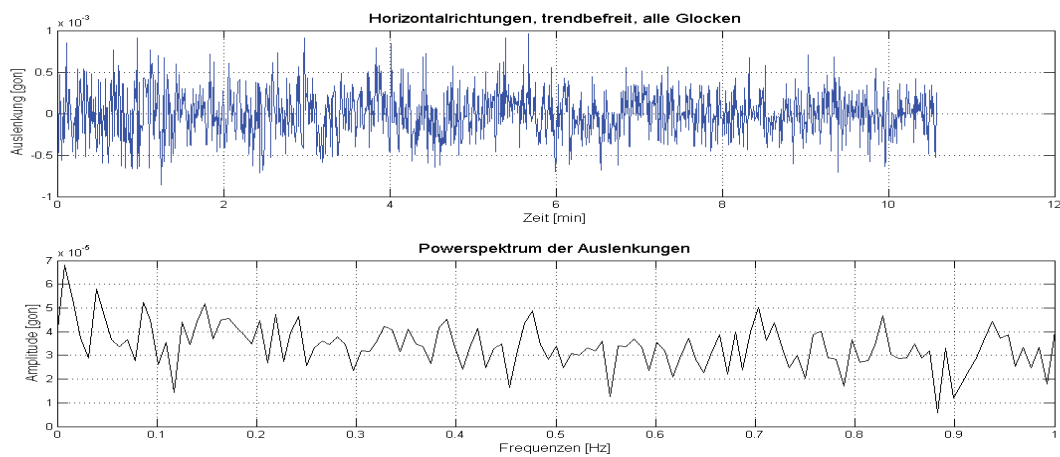


Abbildung 77: Horizontalrichtungen des Lätens aller Glocken (TS15)

6. Probeläuten der Kirchenglocken

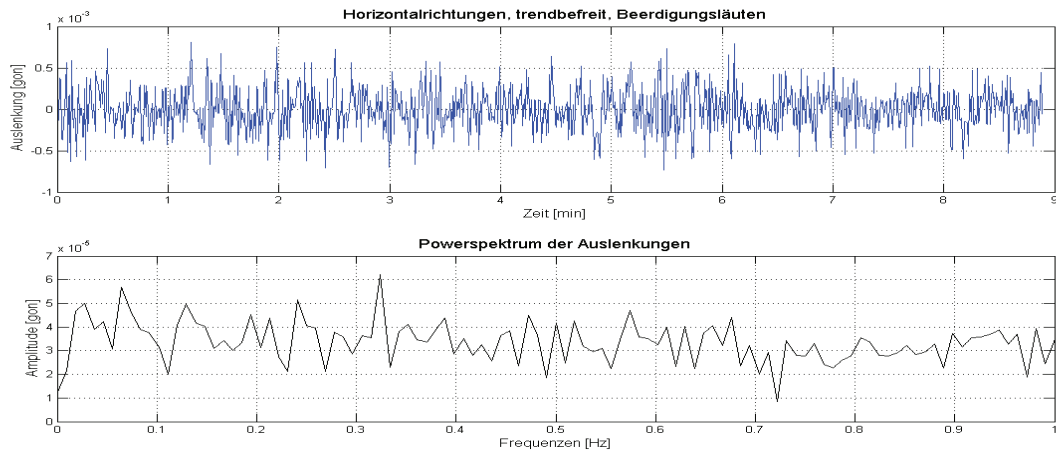


Abbildung 78: Horizontalrichtungen des Beerdigungsläutens (TS15)

Werden die Spannen der Hz-Richtung der einzelnen Abschnitte mit der Bogenformel umgerechnet ergeben sich seitliche Auslenkungen von 2,4mm bei dem 12Uhr Läuten, 2,9mm beim Läuten aller Glocken und 2,7mm beim Beerdigungsläuten. Die Instrumentengenauigkeit des TS15i gibt Leica mit 0,3mgon an. Mit dieser Winkelgenauigkeit und der gemittelten Schrägstrecke von 117,1024m können Auslenkungen von bis zu 0,6mm erfasst werden.

Die Powerspektren der einzelnen Abschnitte zeigen keine Peaks in den Messwerten. Demnach sind keine eindeutigen Frequenzen in den Messwerten enthalten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit dem Leica TS15i vom nördlichen Standpunkt aus eine maximale Schwankung von 7,5mm in Nord-Süd- Richtung und 2,9mm in Ost-West Richtung festgestellt wurde. Diese maximale Bewegung trat während des Glockenspiels aller fünf Glocken auf. Allerdings sind mit den verwendeten Messkonfigurationen keine periodischen Schwingungen erfassbar.

LEICA TS30 – der westliche Standpunkt

Vom westlichen Standpunkt aus, werden die Bewegungen in Ost-West- Richtung in den Daten der Schrägstrecke dargestellt und die Bewegungen in Nord-Süd- Richtung tauchen in den Horizontalrichtungen auf. Die *Abbildung 79* zeigt den gesamten Verlauf der Schrägstreckenmessung.

6. Probeläuten der Kirchenglocken

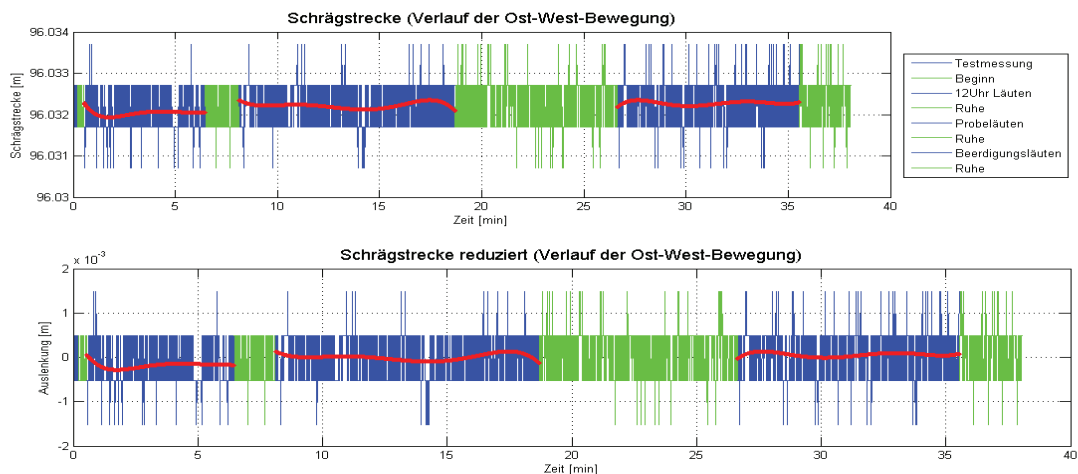


Abbildung 79: Schrägstrecken des westlichen Standpunktes (TS30)

In der *Abbildung 79* ist deutlich zu erkennen, dass die Streckenmessung des LEICA TS30 sehr konstant verläuft. LEICA gibt eine Streckenmessgenauigkeit von $1\text{ mm} + 1\text{ ppm}$ an. Bei einer gemittelten Entfernung von $96,0322\text{ m}$ ergibt das eine Ungenauigkeit von $1,1\text{ mm}$. Die Messwerte liegen alle in einem Bereich von $3,0\text{ mm}$. Eine Bewegung des Kirchturms ist daher kaum zu vermuten.

Für die Analyse der Powerspektren werden die einzelnen Abschnitte genauer betrachtet. In den *Abbildungen 80 - 82* sind die einzelnen Abschnitte dargestellt. Eine weitere Analyse der Messwerte ist durch die konstanten Schrägstrecken überflüssig. Die Powerspektren zeigen keinerlei Peaks. Eine deutliche Detektion von periodischen Bewegungen ist bei der Messfrequenz von 2 Hz nicht erfolgt.

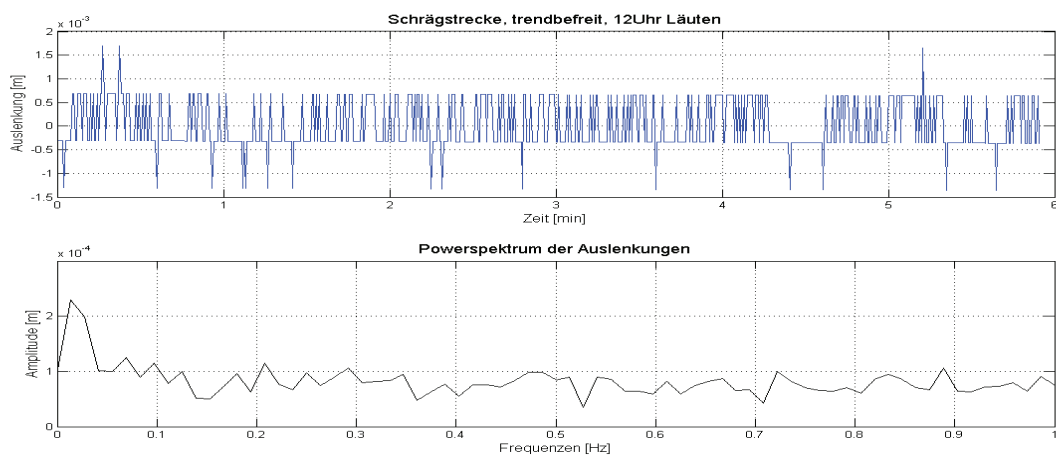


Abbildung 80: Schrägstrecken des 12Uhr Läutens (TS30)

6. Probeläuten der Kirchenglocken

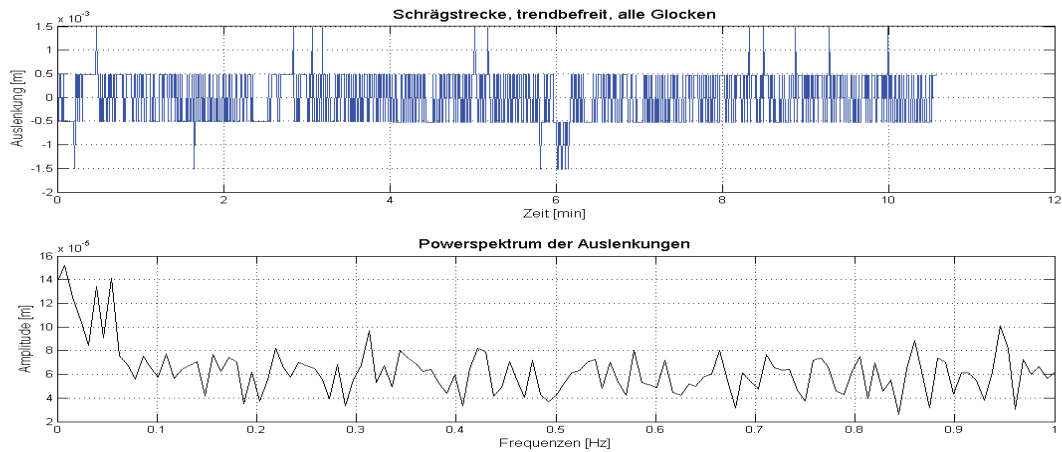


Abbildung 81: Schrägstrecken des Läutens aller Glocken (TS30)

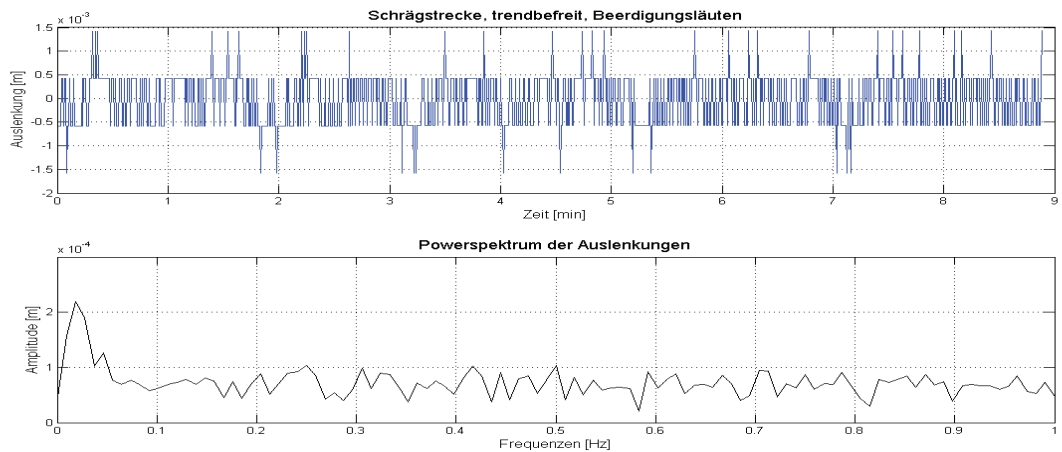


Abbildung 82: Schrägstrecken des Beerdigungsläutens (TS30)

Der Verlauf der gesamten Horizontalrichtungen ist in *Abbildung 83* dargestellt. Zur besseren Verdeutlichung wurden die Richtungen mit der Bogenformel und der gemittelten Schrägstrecke 96,0322m umgerechnet. Die seitlichen Auslenkungen spiegeln die Bewegung des Kirchturms in Nord-Süd- Richtung wieder. Sie befinden sich während der gesamten Messung in einem Bereich von 8,2mm. Zur genaueren Analyse werden die einzelnen Abschnitte aufgeteilt und in *Abbildung 84 – 86* dargestellt.

6. Probeläuten der Kirchenglocken

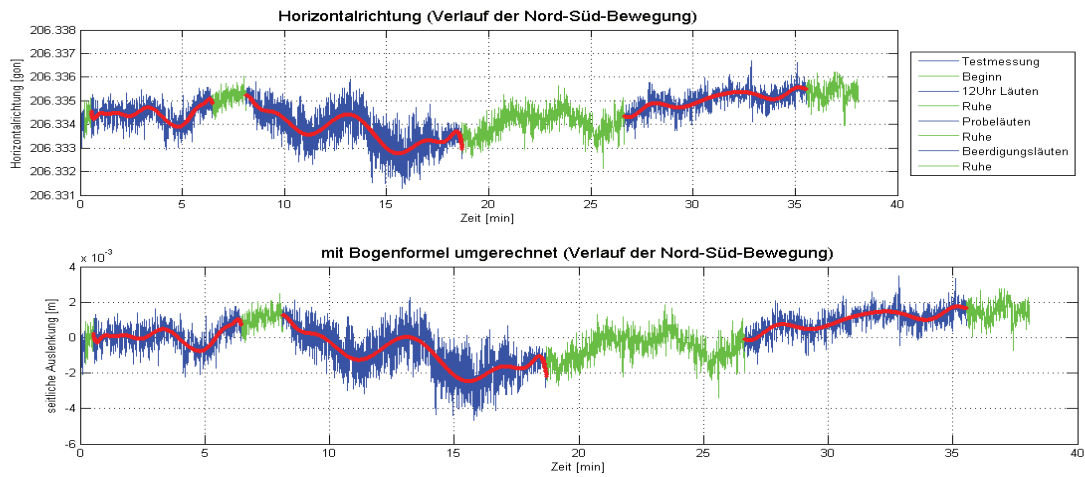


Abbildung 83: Horizontalrichtungen des westlichen Standpunktes

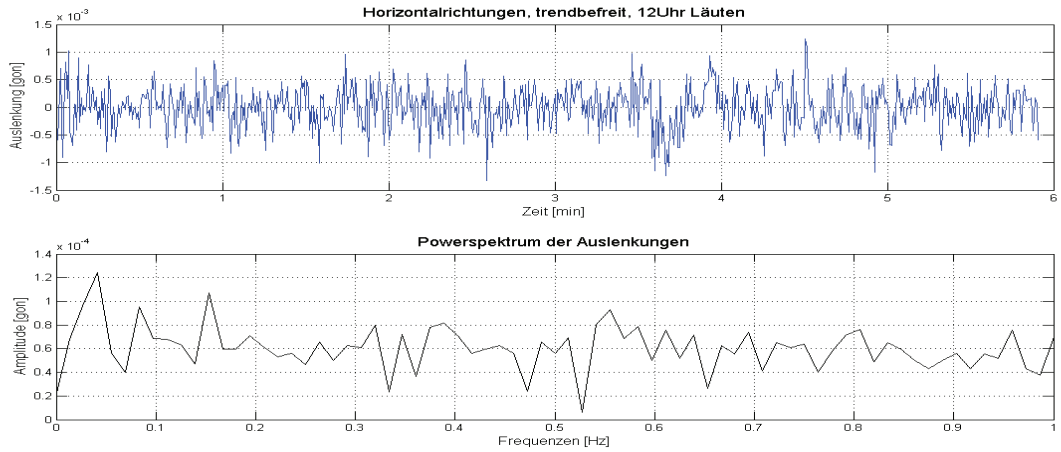


Abbildung 84: Horizontalrichtungen des 12Uhr Läutens (TS30)

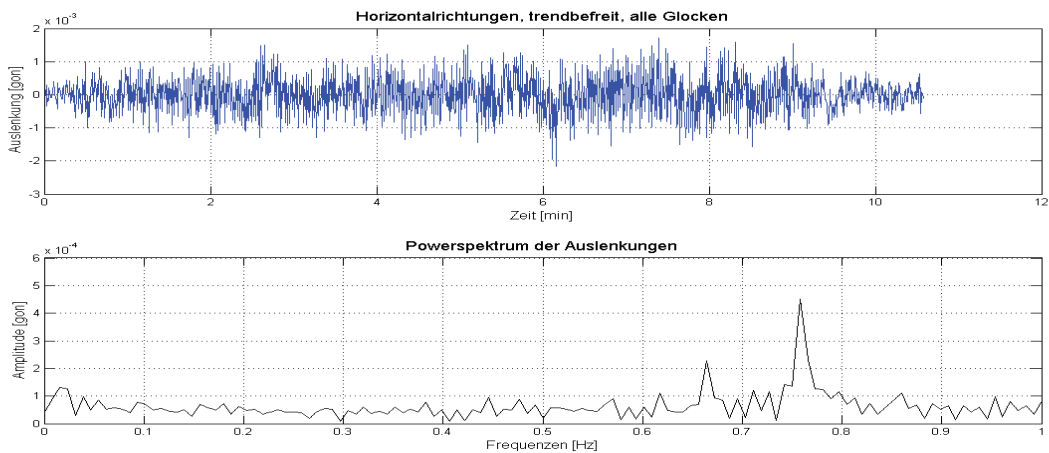


Abbildung 85: Horizontalrichtungen des Läutens aller Glocken (TS30)

6. Probeläuten der Kirchenglocken

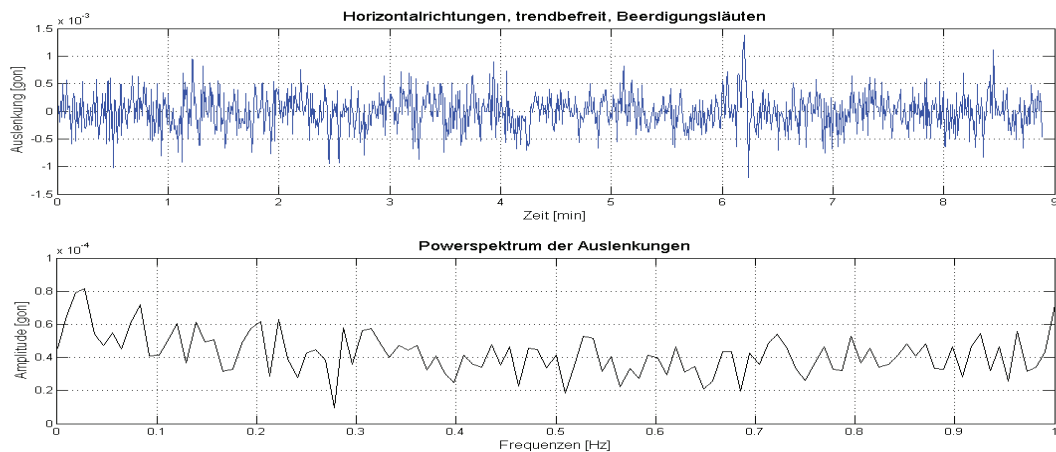


Abbildung 86: Horizontalrichtungen des Beerdigungsläutens (TS30)

Durch das Transformieren der einzelnen Abschnitte mit der Bogenformel ergeben sich folgende seitliche Auslenkungen. Während des 12Uhr Läutens werden Schwankungen von 3,0mm gemessen. Der nächste Berechnungsabschnitt erfolgt während des Glockenspiels aller fünf Glocken. Dabei ergibt sich eine Bewegung von 5,9mm. Die Horizontalrichtungen des Beerdigungsläutens werden ebenfalls mit der gemittelten Schrägstrecke 96,0322m und der Bogenformel umgerechnet und ergeben eine seitliche Auslenkung von 3,8mm.

In den Powerspektren der Messungen tauchen im Wesentlichen keine Peaks auf. Lediglich während des Glockenspiels aller Glocken sind zwei Peaks zu erkennen. Diese befinden sich bei 0,67Hz und bei 0,76Hz.

Mit dem LEICA Tachymeter TS30 wurden vom westlichen Standpunkt aus maximale Bewegungen von 5,9mm in Nord-Süd- Richtung und 3,0mm in Ost-West- Richtung festgestellt. Erneut sind die maximalen Bewegungen während des Glockenspiels aller fünf Glocken aufgetreten. Die Auswertung der Powerspektren ergab, dass zwei Peaks bei 0,67Hz und 0,76Hz auftauchen. Diese Frequenzanalyse würde mit einer höheren Messfrequenz bessere Ergebnisse liefern.

6.3.2 Neigungsmessung

Die drei LEICA Nivel210 Sensoren waren jeweils an einem Laptop angeschlossen und zeichneten die Messdaten mit der Software *Nivel210.exe* und einer Frequenz von 4Hz auf. Die Daten der Glockenszenarien wurden in eine Datei gespeichert und im Anschluss mit MATLAB ausgewertet.

Nivel210-1 – der oberste Standpunkt auf dem Dachboden

Der höchste Nivel- Messpunkt in der Kirche befindet sich unter dem Spitzdach des Kirchturms auf einer Höhe von etwa 55m. Die Ausrichtung erfolgte so, dass die positive Y-Achse des Sensors nach Norden zeigte. *Abbildung 87* zeigt den gesamten Neigungsverlauf während der Glockenspiele. Die Messung startete um 11.25Uhr und lief kontinuierlich. Wie auch schon von den Tachymetern entdeckt, ist in den Neigungswerten deutlich zu erkennen, dass es Unterschiede in der Bewegungsrichtung gibt. Die Neigungswerte für die Y- Richtung (Nord-Süd) sind dabei deutlich höher als die Neigungen in X (Ost-West- Richtung). In den gesamten Daten sind für die Y-Neigung die einzelnen Glockenspiele erkennbar. In der X- Neigung sind das 12Uhr Läuten und das Beerdigungsläuten nicht zu erkennen.

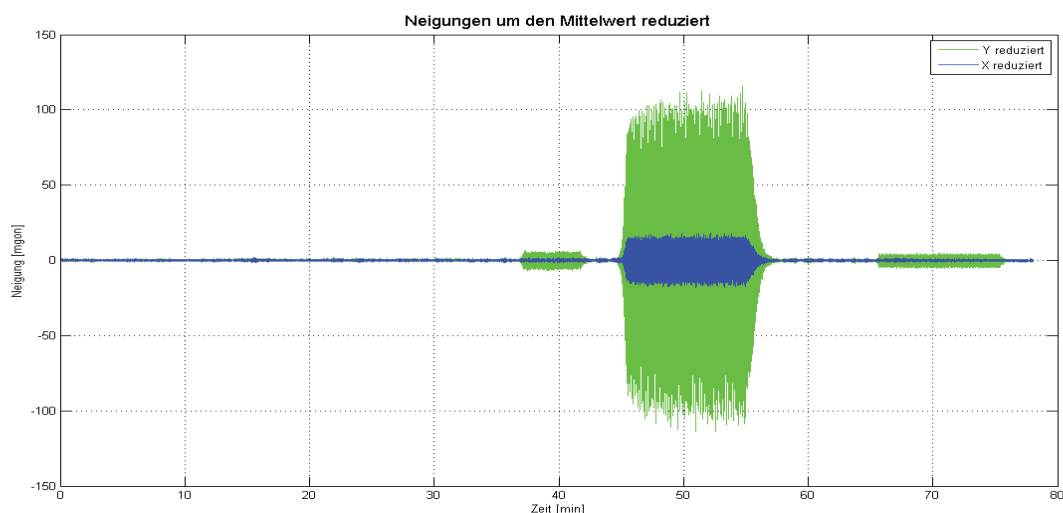


Abbildung 87: gesamte Messung des Nivel210-1

Um bessere Aussagen treffen zu können, werden die einzelnen Abschnitte gesondert

6. Probeläuten der Kirchenglocken

untersucht. In den *Abbildungen 88* und *89* befinden sich die Messwerte und die zugehörigen Powerspektren für die Neigungen der Y-Achse und der X-Achse. Bei dem 12Uhr Läuten befinden sich die Messwerte der Neigungen in einem Bereich von 12mgon in Y-Richtung. Die Neigungen beim Glockenspiel aller Glocken betragen 200mgon und die des Beerdigungsläutens 10mgon.

Eine Aussage über die seitlichen Auslenkungen auf Grund dieser Neigungen lassen sich nicht treffen, da nicht bekannt ist, in welcher Höhe der Ursprung der Neigung stattfindet. Würde mit den Neigungen und der Messpunkthöhe von 55m eine seitliche Auslenkung mit Hilfe der Bogenformel berechnet werden, würden die Schwankungen 10,3mm, 172,8mm und 8,6mm in Nord-Süd- Richtung betragen. Diese Bewegungen wären schon mit der tachymetrischen Messung aufgedeckt worden. Würde man sich bei dieser Berechnung auf die Amplituden der detektierten Schwingungsfrequenzen beziehen, wären das im Maximalfall von 80mgon, beim Glockenspiel aller Glocken, eine seitliche Auslenkung von 69,1mm. Auch dieser Wert ist zu groß. Daher wird in diesem Abschnitt lediglich eine Analyse der detektierten Frequenzen erfolgen.

Die Powerspektren zeigen deutliche Peaks in den Messwerten. Im 12Uhr Läuten der Y-Neigungen sind ein Peak bei 0,44Hz und ein Peak bei 1,40Hz zu erkennen. Der 1,40Hz-Peak taucht ebenfalls in den X-Neigungen auf. Da bei dem 12Uhr Läuten lediglich die Gebetsglocke in Schwingung versetzt wurde, lässt sich vermuten, dass diese mit einer Frequenz von 1,40Hz schwingt und die Impulse des Glockenschlages in den Neigungswerten des Nivel- Neigungssensors enthalten sind.

Beim Läuten aller Glocken sind ebenfalls Peaks der Glocken zu erkennen. Den größten Einfluss hat dabei die schwerste Marienglocke. Sie verursacht einen Ausschlag bei einer Frequenz von 1,14Hz. Die kleineren Glocken verschwinden unter der Intensität der Marienglocke. Sie verursachen nur kleine Peaks, die sich bei 1,26Hz (Johannessglocke), 1,40Hz (Gebetsglocke) und 1,44Hz (Sakramentsglocke) vermuten lassen.

Die Frequenz der Sakramentsglocke von 1,44Hz lässt sich bei dem Beerdigungsläuten bestätigen. Sie erzeugt in der Messung ebenfalls einen Ausschlag im Powerspektrum. Ebenfalls tauchen in allen Powerspektren Peaks bei 0,44Hz, 0,40Hz und 0,48Hz auf. Der Nivel210- Neigungssensor erfasst die Neigungen mit Hilfe einer Flüssigkeitsoberfläche. Dabei ist unklar, ob sich diese Flüssigkeit durch die Impulse der direkten Schalleinwirkung oder des Körperschalls in Schwingung versetzen lässt und damit die Messergebnisse

6. Probeläuten der Kirchenglocken

beeinträchtigt.

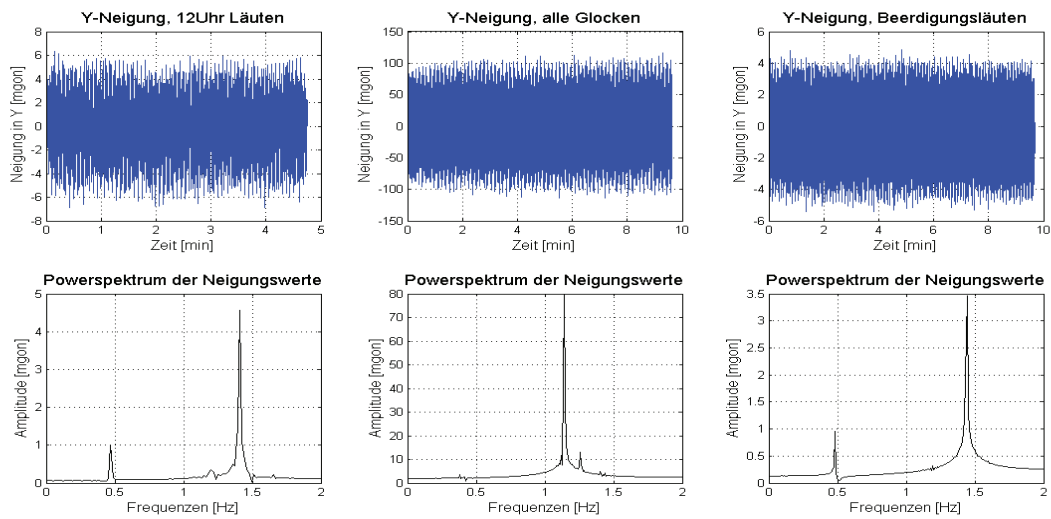


Abbildung 88: Powerspektren der Y-Neigung (Nivel210-1)

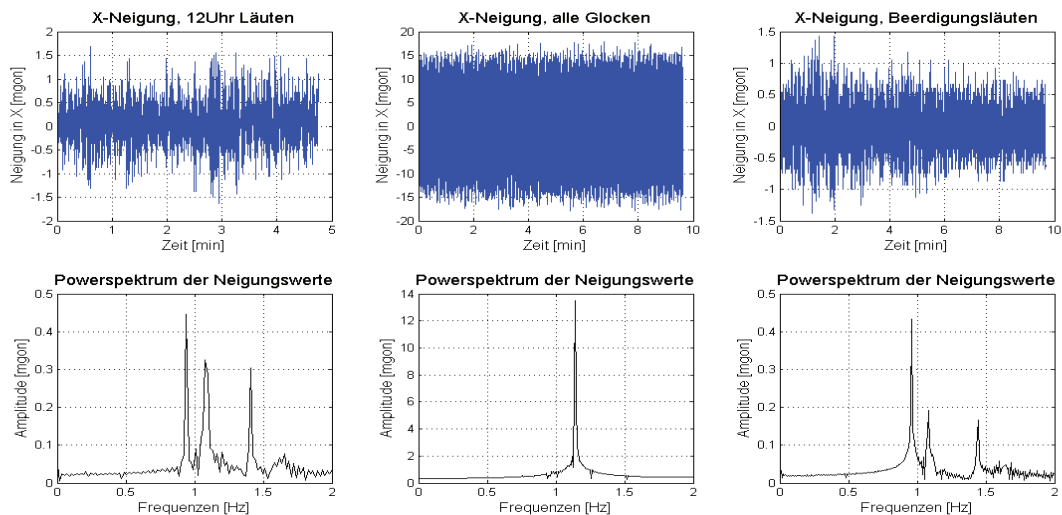


Abbildung 89: Powerspektren der X-Neigung (Nivel210-1)

Im Powerspektrum der X-Neigungen tritt bei dem 12Uhr Läuten ebenfalls die Frequenz der Gebetsglocke von 1,40Hz auf. Ebenso sind zwei weitere Peaks bei 0,95Hz und 1,08Hz zu erkennen. Die Ursache dafür ist ungeklärt. Während des Glockenspiels aller Glocken ist eindeutig der Peak der Marienglocke bei 1,14Hz zu sehen. Ein Peak der Johannesglocke lässt sich bei 1,26Hz vermuten. Das Schlagen der Sakramentsglocke beim Beerdigungsläuten verursacht den Peak bei 1,44Hz. Auch bei dieser Messung treten Frequenzen bei 0,95Hz und 1,08Hz auf. Die Amplituden des 0,95Hz Peaks betragen in

6. Probeläuten der Kirchenglocken

der 12Uhr Messung und während des Beerdigungsläutens 0,45mgon.

Nivel210-2 – der mittlere Standpunkt im Oktogon

Der Mittlere der drei Messpositionen befindet sich im Oktogon auf einer Höhe von 45m. Der Nivel210- Neigungssensor wurde ebenfalls mit der positiven Y-Achse nach Norden ausgerichtet. Die Messung erfolgte mit der *Nivel210.exe* Software und einer konstanten Messfrequenz von 4Hz. In *Abbildung 90* ist zu sehen, dass die Messung nicht kontinuierlich geschah. Während des Läutens aller fünf Glocken wurde die Messung abrupt beendet und musste neu gestartet werden. Erneut ist zu sehen, dass die Neigungen in der Y-Achse (Nord-Süd- Richtung) größer sind, als die Neigungen in der Ost-West- Richtung.

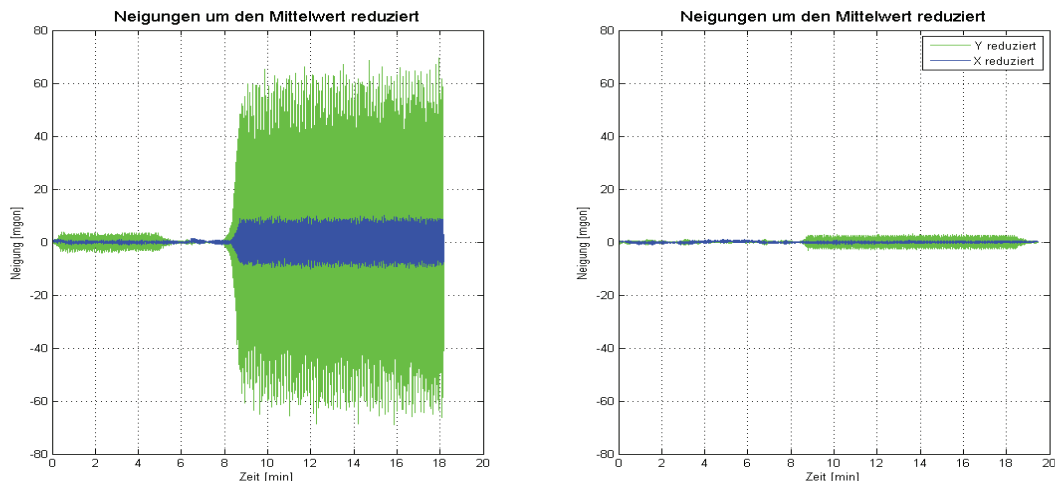


Abbildung 90: gesamte Messung des Nivel210-2

Für eine bessere Analyse der Frequenzen werden die Messdateien aufgeteilt und gesondert betrachtet. In den *Abbildungen 91* und *92* sind die Neigungswerte und die zugehörigen Powerspektren der einzelnen Glockenspiele dargestellt. Die Neigungsspannen der Y-Messwerte betragen 7mgon beim 12Uhr Läuten, 120mgon beim Läuten aller Glocken und 5mgon beim Läuten der Sakramentsglocke. Es ist festzuhalten, dass die Beträge der Neigungswerte kleiner sind, als die der Dachbodenmessung. Dies ist naheliegend, da der Kirchturm vermutlich in höheren Bereichen eine größere Bewegung erfährt.

Auch wenn die Amplituden der Peaks der Powerspektren nicht so hoch sind wie die der

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Messung des Dachbodens, sind dennoch eindeutige Aussagen zu den enthaltenen Frequenzen möglich. Die Y-Werte weisen in der 12Uhr Messung Peaks bei 0,48Hz, 1,18Hz und 1,40Hz auf. Wobei die 1,40Hz die Schwingungen der Gebetsglocke darstellt. Beim Glockenspiel aller Glocken ist die Marienglocke mit einer Frequenz von 1,14Hz deutlich vertreten. Weitere Peaks bei 0,40Hz und 1,25Hz (Johannesglocke) sind nur schwach enthalten. Während des Beerdigungsläutens wird die Schwingung der Sakramentsglocke mit 1,44Hz erfasst. Ein weiterer Peak bei 0,48Hz ist unerklärlich.

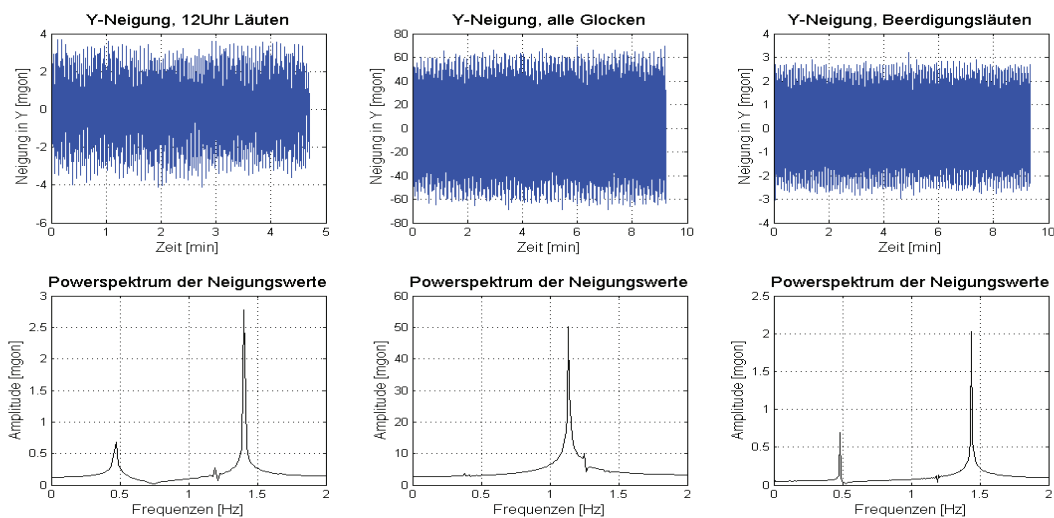


Abbildung 91: Powerspektren der Y-Neigung (Nivel210-2)

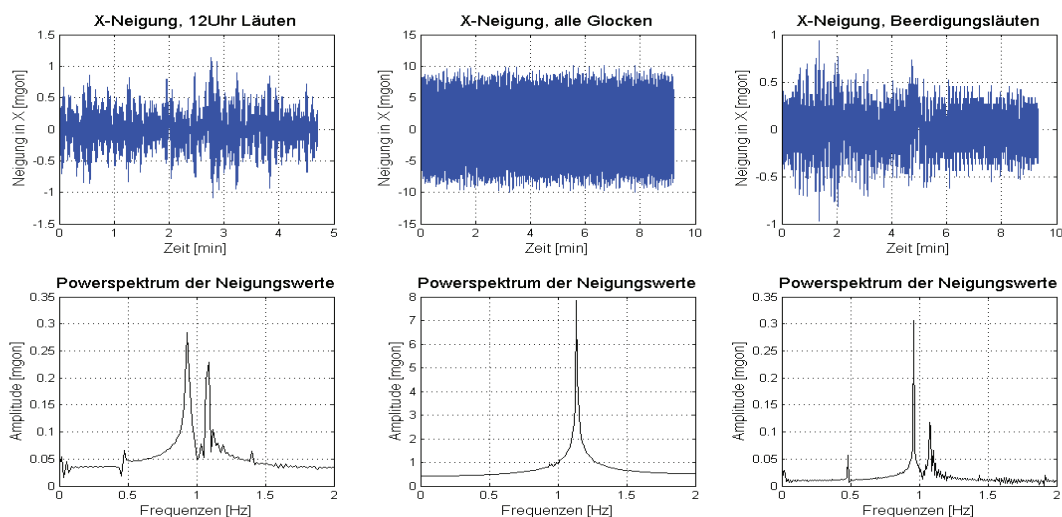


Abbildung 92: Powerspektren der X-Neigung (Nivel210-2)

Die Powerspektren der X-Achse verdeutlichen ebenfalls die in den Messwerten

6. Probeläuten der Kirchenglocken

enthaltenen Frequenzen. Während des 12Uhr Läutens lassen sich Peaks bei 0,47Hz, 0,93Hz, 1,09Hz und 1,40Hz (Gebetsglocke) feststellen. Dabei ist zu erkennen, dass die beiden Frequenzen 0,93Hz und 1,09Hz einen höheren Einfluss haben als die Gebetsglocke. In der Zeit, in der alle fünf Glocken schlugen, ist lediglich die Frequenz der Marienglocke mit 1,14Hz zu erkennen. Ein weiterer Peak bei 0,95Hz lässt sich jedoch vermuten. Das Pendeln der Sakramentsglocke, während des Beerdigungsläutens ist mit 1,44Hz nur sehr schwach in den Messwerten vertreten. Einen größeren Anteil haben die Frequenzen 0,48Hz, 0,96Hz und 1,08Hz.

Nivel210-3 – der niedrigste Standpunkt auf Höhe der Turmuhren

Die dritte Nivel Position befindet sich in der Glockenstube an einer der Turmuhren. Dieser Standpunkt ist in einer Höhe von ca. 40m an der östlichen Seite des Kirchturmes. Der Neigungssensor wurde so ausgerichtet, dass die positive Y-Achse nach Norden zeigte. Die Messergebnisse wurden mit einer Frequenz von 4Hz in der Software *Nivel210.exe* aufgezeichnet. In der *Abbildung 93* ist der gesamte Verlauf der Messung zu sehen. Die Messung startete um 11.00Uhr. Nach einer langen Messphase begann das 12Uhr Läuten. Im Anschluss als das Läuten aller Glocken starten sollte, erlitt die Festplatte des Laptops, zur Steuerung der Nivel- Software, vermutlich einen Head Crash. Der Bildschirm des Laptops war eingefroren und es ließen sich keine Befehle mehr ausführen. Ein Neustart war nicht möglich, sodass die Messung an dieser Position beendet war. Der letzte Messwert wurde um 12.13Uhr abgespeichert.

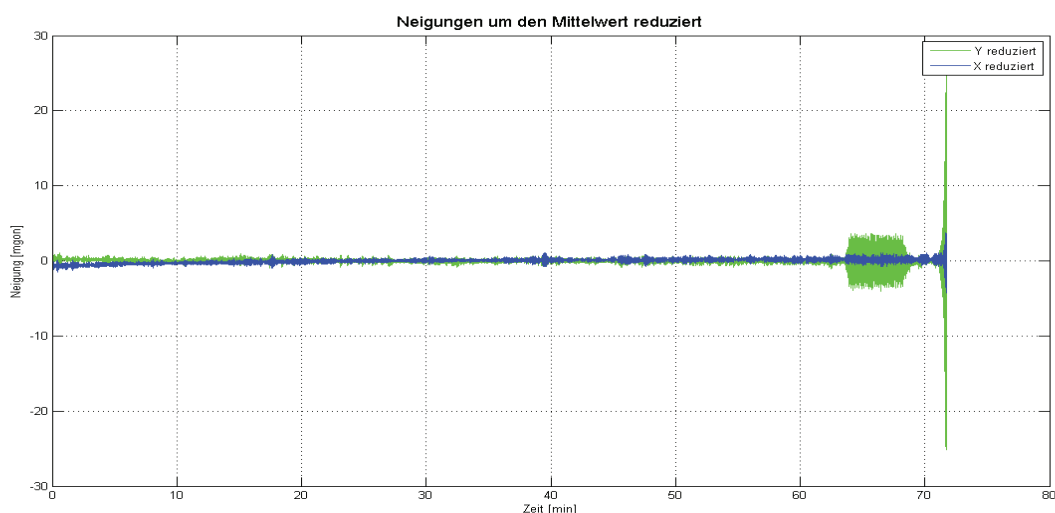


Abbildung 93: Messung des Nivel210-3

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Die Auswertung des 12Uhr Läutens ist in der *Abbildung 94* zu sehen. Sie zeigt die Messwerte der Y- und X- Neigung und das jeweils zugehörige Powerspektrum. Die Spannen der Neigungen sind 7mgon in Y-Richtung und ca. 1,6mgon in X-Richtung.

Im Powerspektrum der Y-Werte sind drei Peaks zu erkennen. Diese haben eine Frequenz von 0,50Hz, 1,25Hz und 1,47Hz. Die Frequenz der Gebetsglocke mit 1,40Hz ist im Spektrum nicht vertreten. Das Powerspektrum der X-Werte weist die Frequenzen 0,50Hz, 0,97Hz, 1,13Hz und 1,47Hz auf.

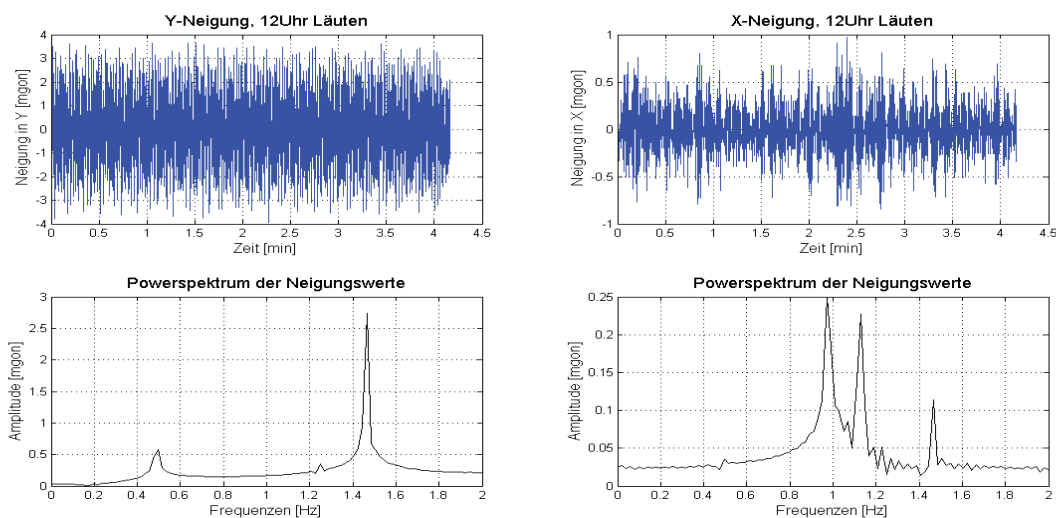


Abbildung 94: Powerspektren der X- und Y-Neigung (Nivel210-3)

	12Uhr Läuten	Alle Glocken	Beerdigungsläuten
	[Hz]	[Hz]	[Hz]
Nivel-1 X	0,95; 1,08; 1,40	1,14; 1,26	0,96; 1,07; 1,44
Nivel-1 Y	0,44; 1,20; 1,40	0,40; 1,14; 1,26; 1,40; 1,44	0,48; 1,44
Nivel-2 X	0,47; 0,93; 1,09; 1,40	0,95; 1,14	0,48; 0,96; 1,08; 1,44
Nivel-2 Y	0,47; 1,18; 1,40	0,40; 1,14; 1,25	0,48; 1,44
Nivel-3 X	0,50; 0,97; 1,07; 1,13; 1,47	-	-
Nivel-3 Y	0,50; 1,25; 1,47	-	-

Tabelle 9: Frequenzen aus den Powerspektren

Zur Veranschaulichung werden die detektierten Frequenzen der Powerspektren in einer Tabelle dargestellt (*Tabelle 9*). Dabei ist zu erkennen, dass einige Frequenzen in mehreren Messungen deutlich zu finden sind, andere haben in mehreren Messungen

6. Probeläuten der Kirchenglocken

einen Einfluss, sind aber nicht eindeutig und konstant. Das Läuten der Gebetsglocke mit einer Frequenz von 1,40Hz ist in den 12Uhr Messungen der Nivel-1 und Nivel-2 Sensoren vertreten. Ebenso ist das Läuten der Marienglocke (1,14Hz) und der Johannesglocke mit 1,26Hz in dem zweiten Messszenario enthalten. Während des Beerdigungsläutens wird die Sakramentsglocke mit 1,44Hz aufgezeichnet.

Ebenso ist auffällig, dass während der gesamten Messung ein Frequenzband von 0,4-0,5Hz aufgezeichnet wurde. In den X-Werten aller Messungen sind zwei weitere Frequenzen vertreten. Diese sind bei ca. 0,96Hz und ca. 1,08Hz.

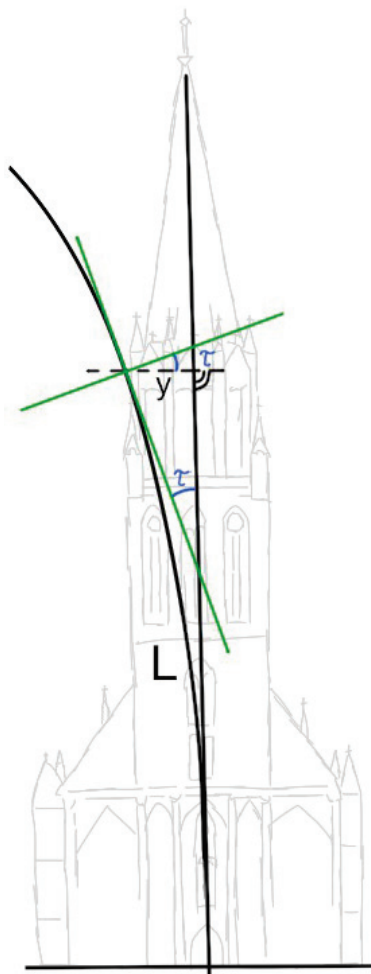
Diese Schwingfrequenzen können verschiedene Hintergründe besitzen. Am naheliegendsten ist, dass durch den Einfluss des Windes der Kirchturm der Marienkirche eine konstante Schwingung mit der entsprechenden Frequenz erfährt. Da der Wind nicht konstant auf den Turm einwirkt, sind die Frequenzen ebenfalls in einem Frequenzband zu finden. Eine weitere Möglichkeit ist der Einfluss vom Straßenverkehr. Durch rotierende Motoren und den Körperschall der Straßenvibration, können ebenfalls die Messergebnisse mit Störungen belegt sein. Ebenso ist es möglich, dass die Neigungssensoren die Eigenfrequenz des Kirchturms aufzeichnen. Die Eigenfrequenz bezeichnet die Frequenz eines schwingungsfähigen Systems, mit der dieses System nach einmaliger Anregung Schwingen kann [wikipedia.de/Eigenfrequenz].

6.3.3 Berechnung der seitlichen Auslenkung als Klothoide

Die Neigungswerte haben gezeigt, dass der Kirchturm der Marienkirche an den höheren Messstationen größere Neigungen aufweist. Dieses Verhalten erinnert an das Krümmungsbild einer Klothoide. Eine Klothoide wird hauptsächlich in der Trassierung und Straßenplanung angewendet. Sie beschreibt eine Kurve, bei der die Krümmung mit stetigem Kurvenverlauf wächst. Bei der Berechnung wird die Bogenlänge L der Klothoide durch die Stationshöhe des Messpunktes approximiert. Den Tangentenwinkel τ bildet dabei die gemessene Neigung des Nivel- Neigungssensors. Um die größtmögliche seitliche Auslenkung zu berechnen, werden die Werte der Messstation des Dachbodens genutzt. Die Höhe entspricht damit der Bogenlänge $L=55\text{ m}$. Die Berechnung einer Klothoide sieht lediglich einen Krümmungsverlauf in eine Richtung vor.

6. Probeläuten der Kirchenglocken

Daher wird die Hälfte der Schwingungsamplitude benutzt. Die größten Neigungen, und damit verbunden die größten Schwingungen, treten bei der Nivel- Messung auf dem Dachboden auf, während alle fünf Glocken pendeln. Die Werte befinden sich in einem Bereich von 200mgon (größter bis kleinster Messwert). Die effektivere Amplitude liefert dabei das Powerspektrum der Messung. Dies zeigt die größte Amplitude von 80mgon und steht damit für die größte periodische Neigung in eine Richtung (Nord-Süd). Damit wird $\tau=0,080 \text{ gon}$ gesetzt.



Für die Berechnung werden zunächst zwei Klothoidenparameter A und I berechnet.

$$A = \frac{L}{\sqrt{2 \cdot \tau}} \qquad I = \frac{L}{A}$$

Das Umstellen der Formeln zeigt, dass die Bogenlänge für diese Berechnung irrelevant ist:

$$I = \frac{L}{\frac{L}{\sqrt{2 \cdot \tau}}} = \frac{\cancel{L} \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}{\cancel{L}} = \sqrt{2 \cdot \tau} .$$

Die seitliche Auslenkung y berechnet sich mit:

$$y = \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\tau^{2n-1}}{(4n-1)(2n-1)!}$$

oder mit der Näherungsformel für $0 \leq I \leq 1$ und sechs-stelliger Genauigkeit:

$$y = [(42410^{-1} \cdot I^4 - 336^{-1}) \cdot I^4 + 6^{-1}] \cdot I^3 .$$

[Gruber, 2012]

Abbildung 95: Skizze eines Klothoidenverlaufs

Damit ergibt sich für die Neigung der Y- Richtung (Nord-Süd) ein Betrag von 10,7mm. Als Schwingung in beiden Richtungen betrachtet ergibt das 21,4mm.

Mit einem Winkel von $\tau=0,014 \text{ gon}$, für die Schwingung in Ost-West- Richtung, ergibt sich ein Betrag von 0,8mm. In beiden Richtungen sind das 1,6mm.

Die Werte der Berechnung für die Bewegung in Nord-Süd- Richtung sind nicht vorstellbar. Schwankungen von dieser Größe wären in den Messungen der Tachymeter entdeckt

6. Probeläuten der Kirchenglocken

worden. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die Neigungswerte durch die Nivel-Methode, des Abgriffs der Flüssigkeitsoberfläche, für diese Anwendung nicht ausreichend ist.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

Für eine dauerhafte Messung im Bereich des Gebäudemonitorings müssen die zu verwendenden Messinstrumente dauerhaft am Einsatzort vorhanden sein. Bei Überwachungen von Stauwerken und Brücken ist es oft der Fall, dass die Messsysteme mit einem Warnsystem verbunden sind. Werden dann bestimmte Grenzwerte überschritten, erfolgt eine Mitteilung an eine zuständige Person und notwendige Schritte können eingeleitet werden. Dies setzt voraus, dass die Messsysteme kontinuierlich messen.

7.2 Auswahl der Standorte

Das Gebäudemonitoring in der Marienkirche in Neubrandenburg soll auf die Messungen während des Probeläutens aufbauen. Dazu werden Standorte bestimmt, an denen eine Messvorrichtung angebracht werden soll. In erster Linie wird das Monitoring auf der Neigungsmessung beruhen. Um, wie auch schon bei der Probemessung, genaue Aussagen über das Verhalten des Turms treffen zu können, werden die gleichen Positionen festgelegt. Diese befinden sich an der Ostseite im Inneren des Kirchturms. Die bereits bekannten Standpunkte werden um einen weiteren ergänzt. Ein weiterer wichtiger Punkt für die Installation fester Messstationen, ist die Zugänglichkeit und der Schutz. Die Messstandorte wurden daher wie folgt ausgewählt:

Messstation 1 – unterhalb des Glockenstuhls

Der Kern des Kirchturms ist eine Betonkonstruktion von dem aus kleine Abzweigungen zu den Ausstellungsräumen führen. Am oberen Ende des Betontreppenhauses in einer Höhe von etwa 32m befindet sich ein Zwischengang zu einem Versorgungsraum. Die erste Messstation befindet sich in diesem Zwischengang (*ABB 96*). Durch eine abschließbare Tür ist sie vor Vandalismus geschützt. Mit Hilfe eines Schlüssels kann der Zwischenraum betreten werden und der Zugang zur Messstation ist gegeben.

Messstation 2 – in der Glockenstube

Vom Bereich der ersten Messstation führt eine Metalltreppe weiter Richtung Turmspitze. Eine Etage darüber beginnt die Glockenstube mit dem hölzernen Glockenstuhl. Oberhalb des Glockenstuhls sind vier kleine Räume für die Turmuhren. An der östlichen Turmuhr befindet sich die zweite Messstation (*ABB 97*). Zum Schutz der Turmuhren sind die kleinen Räume vergittert. Dieses Gitter sorgt auch dafür, dass die zweite Messstation ohne einen entsprechenden Schlüssel nicht zugänglich ist.

Messstation 3 – im Oktogon

Eine weitere Treppe führt weiter nach oben zum Oktogon des Kirchturms. Dieser Raum wird genutzt um Besuchern einen Überblick über das historische Neubrandenburg zu geben. Dafür befinden sich an den Wänden acht Beamer, die jeweils auf die gegenüberliegende Wand ein Video projizieren. In den Mauerecken des Oktogons befinden sich Mauervorsprünge zur Verzierung des Raumes. Einer der Vorsprünge wird genutzt um die dritte Messstation aufzunehmen (*ABB 98*). Der Vorsprung ist in einer Höhe von ca. 5m über dem Oktogonboden und ist damit ohne eine Leiter nicht zu erreichen.

Messstation 4 – auf dem Dachboden

Vom Oktogon aus führt eine Feuerleiter zum Dachboden. Die Feuerleiter ist ohne eine andere Leiter nicht zu erreichen. Damit ist die oberste Messstation ebenfalls vor Vandalismus geschützt. Sie befindet sich auf dem Dachboden an der Ostseite des Kirchturmes (*ABB 98*).

Um eine sichere Stromversorgung zu gewährleisten, wurden die einzelnen Messstationen mit jeweils zwei Steckdosen und zwei Ethernetanschlüssen versehen. Damit ist auch die Möglichkeit gegeben die Messstationen mit einem zentralen Server zu verbinden und die Sensoren fernzusteuern.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring



Abbildung 96: Messstation 1



Abbildung 97: Messstation 2

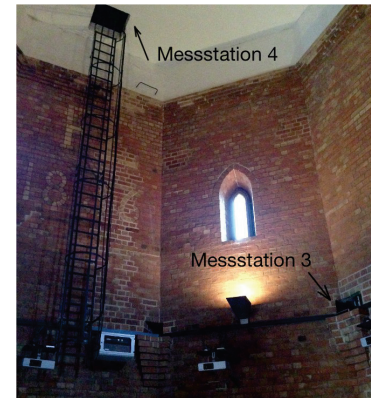


Abbildung 98: Messstationen 3 und 4

7.2 Die Konsolen der Messstationen

Für eine dauerhafte Verankerung der Messsensoren mit dem Gebäude werden Konsolen angefertigt. Diese Konsolen bestehen aus einer Edelstahlplatte mit diversen Gewindelöchern für die Aufnahme verschiedener Sensoren.

Die oberen drei Messstationen (Dachboden, Oktogon, Glockenstube) werden am Boden befestigt. Dazu besitzen die entsprechenden Konsolen eine Drei-Punkt-Auflage (ABB 100). Die untere Messstation, unter dem Glockenstuhl, wird an der Wand angebracht. Dazu wird eine Winkelkonstruktion verwendet, die an der Wand angebracht wird und die Platte der Konsole aufnimmt. Zur Befestigung im Gebäude besitzen die Konsolen und die Winkelkonstruktion Metallbolzen, die im Mauerwerk der Kirche eingelassen werden. Dazu werden die Konsolen in die richtige Position gebracht, mit einer Libelle horizontalisiert und Markierungen am Mauerwerk vorgenommen. An den Markierungen werden die Bohrlöcher gesetzt. Dabei ist die Position so zu wählen, dass die Bohrlöcher in einen Backstein gesetzt werden können. Nach dem Bohren werden die Bohrlöcher mit einer Flaschenbürste und einem Kompressor vom Bohrstaub befreit. Dies ist notwendig für die Verwendung des Spezialmörtels. Der Mörtel besteht aus zwei Komponenten, die beim Zusammentreffen im Bohrloch aushärten. Diese feste Verbindung zwischen dem Mauerwerk und den Konsolen soll verhindern, dass bei der Übertragung der Schwingungen an die Sensoren eine zusätzliche Übertragungsfunktion durch eine elastische Verbindung entsteht. Nach dem einbringen des Mörtels werden die Konsolen mit ihren Metallbolzen eingesetzt und mit Hilfe von Distanzschrauben horizontalisiert. Der

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

Mörtel ist nach ca. 10min ausgehärtet und kann dann nicht mehr verarbeitet werden.

Die Gewindelöcher in den Konsolen sind so gewählt, dass durch verschiedene Kontaktplatten diverse Sensoren angebracht werden können. Bei einer Variation der Sensoren können passende Kontaktplatten angefertigt werden, die dann an die Konsolen angeschraubt werden können (ABB 99).



Abbildung 100: Drei-Punkt-Auflage an der Messstation 3



Abbildung 99: diverse Kontaktplatten auf der Konsole

7.3 DABAMoS – Messclient

DABAMoS ist ein Datenbank-orientiertes Monitoring- und Analyse-System, das im Rahmen eines Forschungsprojektes 2009 an der Hochschule Neubrandenburg entwickelt wurde. Es bietet eine OpenSource Umsetzung für die Verarbeitung von Daten und Messwerten aus verschiedenen geodätischen und geotechnischen Sensoren. Es besteht in seiner Gesamtheit aus verschiedenen Komponenten für Hardware und Software. Mit DABAMoS ist es möglich diverse Messsensoren zu steuern, Daten zu erfassen, abzuspeichern und zu verarbeiten. Damit ist es speziell für das Monitoring von Gebäuden, Geländeabschnitten und geodätischen Netzen geeignet. Die Überwachung der einzelnen Sensoren verläuft dabei webbasiert, sodass die Daten von jedem Smartphone, Laptop oder Desktop PC mit Internetverbindung eingesehen und verarbeitet werden können (ABB 101).

Abbildung 102 zeigt die Messstation unterhalb des Glockenstuhls. Der Nivel210-Neigungssensor wird von einem Einplatinen-Computer mit der Software OpenADMS gesteuert. Die Daten werden dann per Ethernet an einen Server gesendet, der sie für

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

einen Onlinezugriff bereitstellt. Ein solches Gehäuse mit einem Einplatinen-Computer wird ebenfalls an die anderen Messstationen installiert. Von dort aus können die einzelnen Sensoren angesteuert werden, die dann ihre Messdaten auf dem Server bereitstellen.

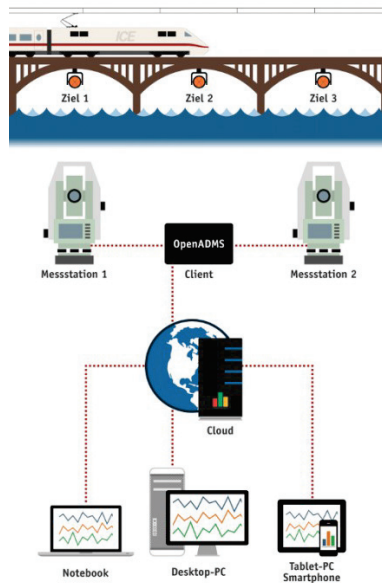


Abbildung 101: DaBaMoS
Prinzipskizze

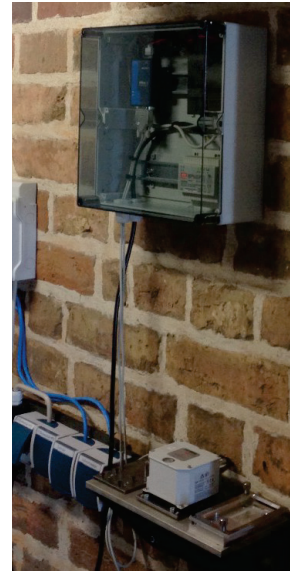


Abbildung 102:
Messstation 1 mit
Konsole und DaBaMoS

[dabamos.de]

7.4 Dauermessung eines Neigungssensors

Der Neigungssensor für die Dauermessung ist ein LEICA Nivel210-C und befindet sich an der untersten Messstation, unterhalb des Glockenstuhls (ABB 102). Der Sensor wird an die Konsole angeschraubt und mit der DABAMoS Messstation verkabelt. Die Orientierung des Neigungssensors erfolgt dabei so, dass die positive Y-Achse nach Norden zeigt. Mit Hilfe der DABAMoS Software OpenADMS wird der Nivel-Sensor konfiguriert, sodass eine dauerhafte Messung mit einer Frequenz von 1Hz erfolgt. Die Messung beginnt am Donnerstag, den 06.08.2015 um 13.28Uhr und endet am Montag, den 24.08.2015 um 11.16Uhr. Während dieser Messung sind keine Unterbrechungen und keine Änderungen

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

der Parameter vorgesehen, sodass der Sensor kontinuierlich Daten an den Webserver sendet. *Abbildung 103* zeigt den gesamten Verlauf der Messwerte. Es ist zu erkennen, dass in den Messwerten verschiedene Peaks auftauchen. Diese Peaks befinden sich fast ausschließlich in der Y-Neigung (Nord-Süd- Richtung) und verdeutlichen ein Glockenspiel. Dabei ist zu sehen, dass an jedem Tag drei Glockenspiele mit geringem Einfluss auf die Messwerte stattfinden. Am Samstag Abend und am Sonntag Vormittag sind Glockenspiele mit größerer Intensität zu erkennen. In den X-Werten ist ein gewisses periodisches Rauschen zu sehen, das im Laufe des Tages auftritt. Bei den Übergängen von einem Tag zum nächsten ist dieses Rauschen gemindert. Am Sonntag tritt dieses Rauschen erst zu einem späteren Zeitpunkt auf, wie an den anderen Tagen in der Woche. Dieses Rauschen ist durch den Verkehr, durch Autos und Passanten, im innerstädtischen Bereich zu erklären. Wie schon die 24h-Messung unter Laborbedingungen zeigte (Abschnitt 4.2.2), können Motoren und die damit verbundenen Vibrationen der Straße einen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Dieses Phänomen ist in den Messwerten des Gebäudemonitorings in der Marienkirche ebenfalls zu erkennen.

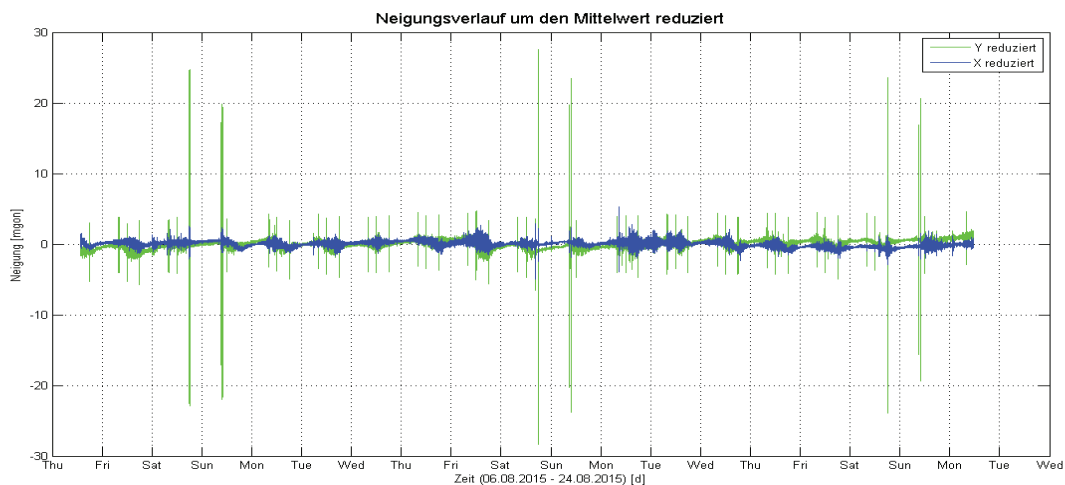


Abbildung 103: Dauermessung des Nivel Sensors mit DaBaMoS

Für eine bessere Anschaulichkeit werden die Datenreihen von einander getrennt betrachtet und mit MATLAB separat geplottet.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

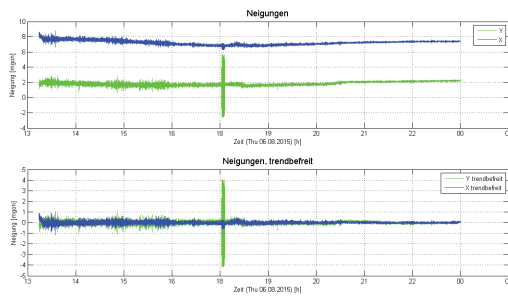


Abbildung 104: Neigungsmessung, Do. der 06.08.2015

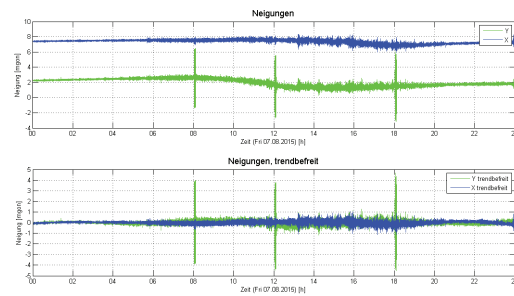


Abbildung 105: Neigungsmessung, Fr. der 07.08.2015

Die *Abbildungen 104* und *105* zeigen die Messwerte der ersten beiden Tage. Es sind deutlich die Peaks der Glockenspiele um 08Uhr, 12Uhr und 18Uhr zu erkennen. Diese Peaks haben einen Ausschlag von ± 4 mgon. Der Nivel- Neigungssensor nimmt die Schwingungen des Glockenspiels auf und stellt sie als Neigungen dar. Diese Neigungswerte sind nicht durch eine Neigung des Kirchturms zu erklären. Würde der Turm durch das Glockenspiel zum schwingen angeregt werden, wäre in den Neigungswerten eine gedämpfte Schwingung nach dem Glockenspiel zu sehen. Da das nicht der Fall ist, sind die Neigungspeaks durch die in Schwingung geratene Flüssigkeit im Sensor zu erklären. Das geschieht durch direkte Schalleinwirkung auf den Neigungssensor oder durch die Körperschallübertragung vom Mauerwerk, über die Konsole an den Sensor.

Ein Neigungsverlauf ist dennoch zu erkennen. Er zeigt sich als Polynomregression in der gesamten Messung. Der Verlauf der Neigung macht eine Pfeilerdrehung deutlich. Eine Pfeilerdrehung entsteht durch den Einfluss der Sonne auf pfeilerförmige, hohe Bauwerke. Durch die einseitige Anstrahlung der Sonne dehnt sich das Material unterschiedlich aus und erfährt somit eine Neigung.

In *Abbildung 105* (Freitag, 07.08.2015) ist in den Y-Werten zu sehen, dass sich der Turm in den Morgenstunden leicht nach Norden neigt und ab ca. 08Uhr eine Neigung in südliche Richtung erfährt. Ab ca. 14Uhr neigt sich der Turm leicht nach Westen, das ist in den Neigungswerten der X-Achse zu sehen.

Diese Neigungsänderung in südlicher Richtung entspricht einem Betrag von ca. 2 mgon. Die Messstation befindet sich in einer Höhe von 32m. Eine Berechnung mit der Bogenformel würde eine seitliche Auslenkung von 1,01 mm in südlicher Richtung betragen. Da jedoch unklar ist, ab welcher Höhe der Turm eine Neigung erfährt, kann die Berechnung mit einer gesamten Höhe von 32m nicht zum gewünschten Ergebnis führen.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

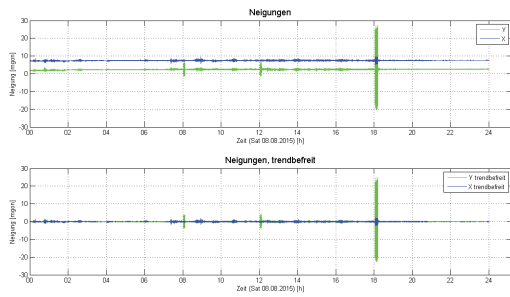


Abbildung 106: Neigungsmessung, Sa. der 08.08.2015

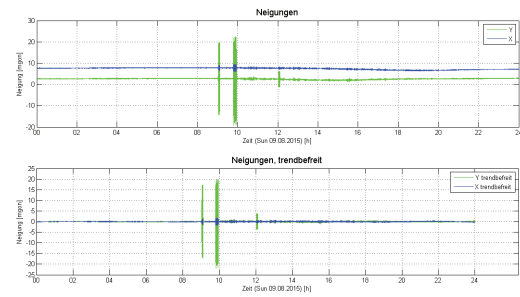


Abbildung 107: Neigungsmessung, So. der 09.08.2015

Die Neigungsverläufe des Wochenendes sind in den *Abbildungen 106* und *107* dargestellt. Am Samstag den 08.08.2015 sind ebenfalls die Glockenspiele um 08Uhr und um 12Uhr zu sehen. Das 18Uhr Glockenspiel hat einen größeren Ausschlag als an den anderen Tagen in der Woche. Die gemessene Neigung liegt dann in einem Bereich von 45mgon. Am Sonntag den 09.08.2015 sind die großen Glockenspiele um 09Uhr und um 09.45Uhr. Ein weiteres Läuten mit geringerer Intensität findet um 12Uhr statt. Das 18Uhr Läuten fällt am Sonntag aus. Die Streuung der Messwerte wird am Sonntag erst ab ca. 10Uhr größer. Vorher findet nur ein eingeschränkter Personenverkehr statt. Ein Regressionsverhalten ist am Sonntag zu erkennen. Die Annäherung der Graphen zeigt, dass sich der Turm in nordwestliche Richtung neigt.

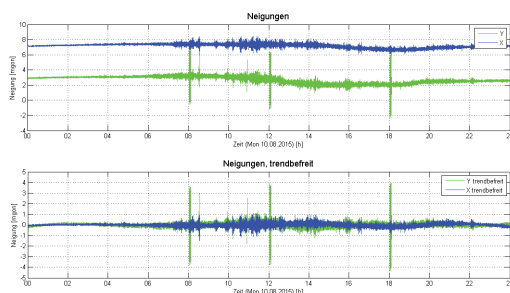


Abbildung 108: Neigungsmessung, Mo. der 10.08.2015

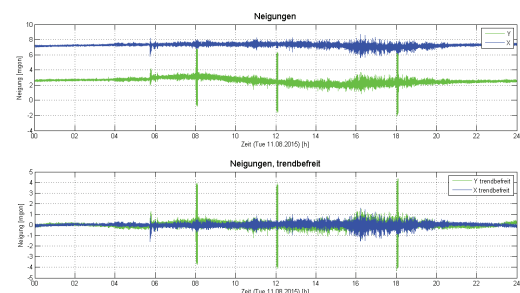


Abbildung 109: Neigungsmessung, Di. der 11.08.2015

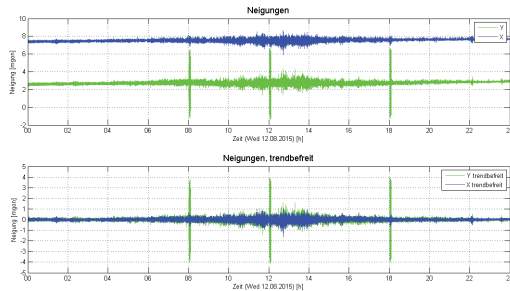


Abbildung 111: Neigungsmessung, Mi. der 12.08.2015

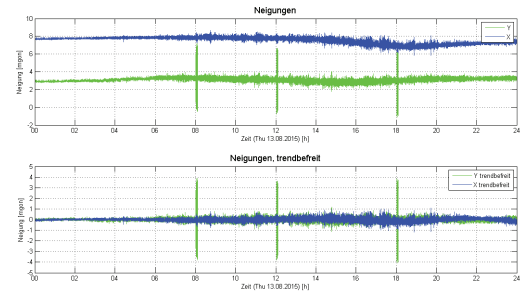


Abbildung 110: Neigungsmessung, Do. der 13.08.2015

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

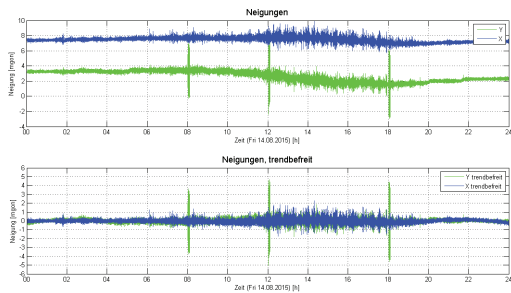


Abbildung 112: Neigungsmessung, Fr. der 14.08.2015

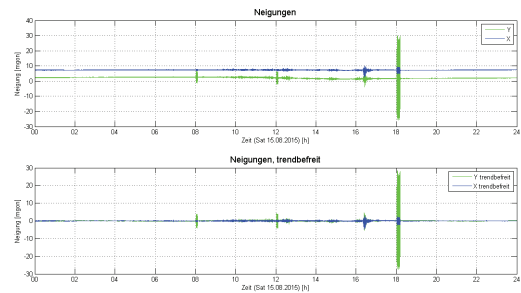


Abbildung 113: Neigungsmessung, Sa. der 15.08.2015

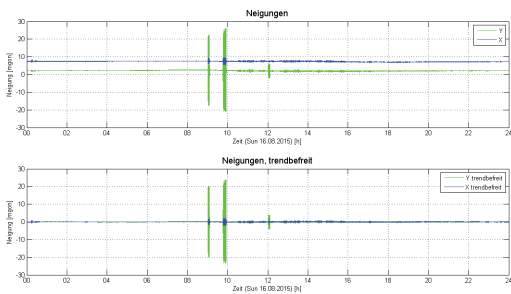


Abbildung 114: Neigungsmessung, So. der 16.08.2015

In der Woche vom 10.08. - 16.08. (ABB 108 – 114) sind Wiederholungen der Phänomene zu erkennen. An Werktagen sind die Peaks der Glockenspiele bei 08Uhr, 12Uhr und 18Uhr zu erkennen. Ebenso wie das erhöhte Rauschen der Messwerte durch den Verkehr. Am Wochenende sind die Glockenspiele anders als an den Werktagen. Die Regressionsverläufe der einzelnen Tage lassen auf eine Pfeilerdrehung schließen bei der sich der Kirchturm im Laufe des Tages hauptsächlich in südliche Richtung neigt. Der Betrag der Neigung ist ca. 1mgon. Die Laborversuche unter Abschnitt 4.2.2 haben gezeigt, dass auf Grund der Nullpunktstabilität des Neigungssensors von $<0,00471\text{mrad}/^\circ\text{C}$ ein Driftverhalten nicht ohne weiteres bewiesen werden kann. Die gemessenen Temperaturen mit dem Nivel- Neigungssensor bewegen sich in einem Bereich von 25°C . Das hat eine Nullpunktstabilität von $0,02355\text{mrad}$ (= $1,49924\text{mgon}$) zur Folge. Eine interpretierte Pfeilerdrehung von 1mgon würde daher in der Messungenauigkeit untergehen.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

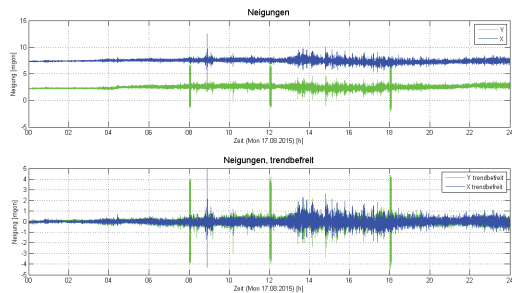


Abbildung 115: Neigungsmessung, Mo. der 17.08.2015

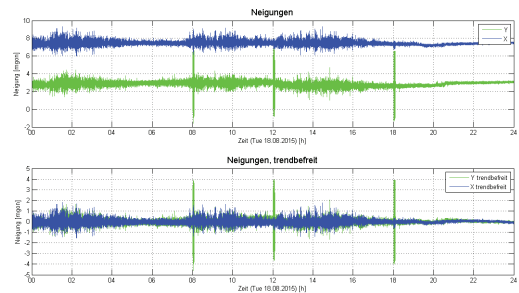


Abbildung 116: Neigungsmessung, Di. der 18.08.2015

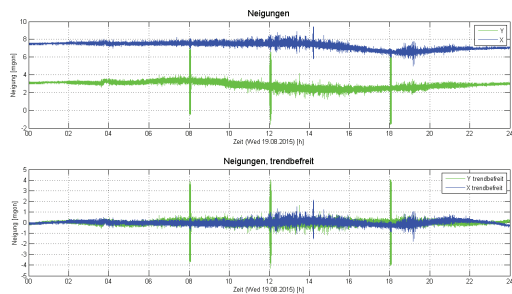


Abbildung 117: Neigungsmessung, Mi. der 19.08.2015

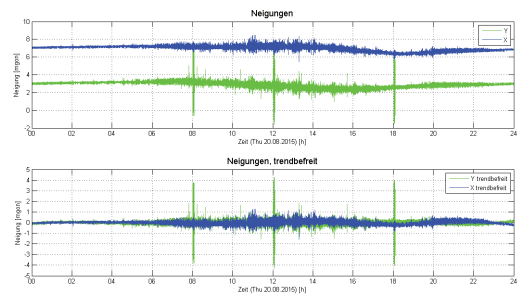


Abbildung 118: Neigungsmessung, Do. der 20.08.2015

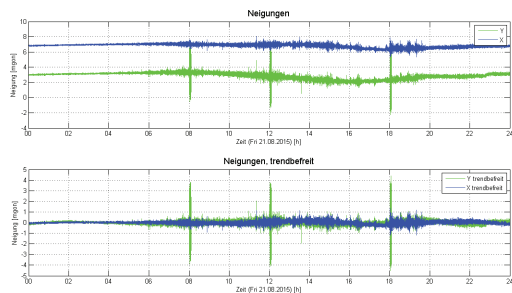


Abbildung 119: Neigungsmessung, Fr. der 21.08.2015

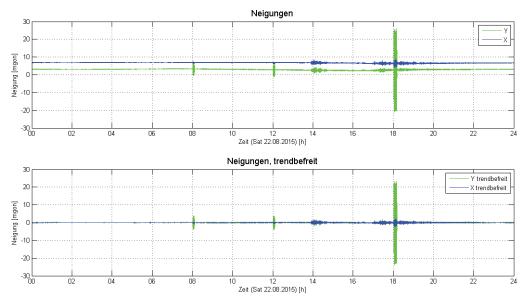


Abbildung 120: Neigungsmessung, Sa. der 22.08.2015

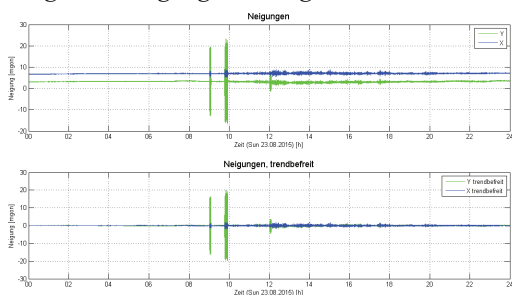


Abbildung 121: Neigungsmessung, So. der 23.08.2015

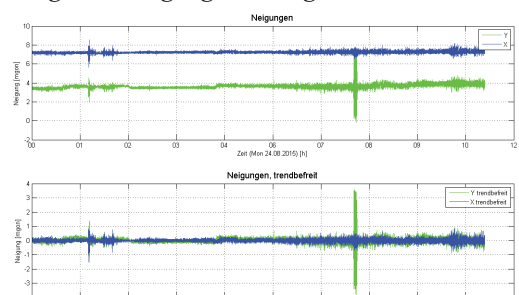


Abbildung 122: Neigungsmessung, Mo. der 24.08.2015

Die Messwerte der Tage 17.08. - 24.08. (ABB 115 – 122) zeigen die gleichen Verhalten. Dabei sind erneut die einzelnen Glockenspiele zu den gegebenen Uhrzeiten zu erkennen. Das erhöhte Rauschen der Messwerte zu den Verkehrszeiten und ein gewisses Driftverhalten kommt ebenfalls wieder vor.

Die Firma LEICA GEOSYSTEMS gibt für den Nivel210- Neigungssensor eine Nullpunktstabilität

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

von $<0,00471\text{mrad}/^\circ\text{C}$ ($= 0,29985\text{mgon}/^\circ\text{C}$) an. Während der gesamten Dauermessung befanden sich die gemessenen Temperaturen des Neigungssensors zwischen $22,5$ und $28,5^\circ\text{C}$ (ABB 123). Die Nullpunktstabilität des Neigungssensors wird für einen Temperaturwert von $20,0^\circ\text{C}$ angenommen, sodass die Stabilität mit jedem Grad Abweichung ungenauer wird. Im Extremfall bei $28,5^\circ\text{C}$ beträgt die versprochene Nullpunktstabilität $2,54873\text{mgon}$. Ein Driftverhalten der Messwerte des Neigungssensors könnte also auch damit erklärt werden. Eine interpretierte Pfeilerdrehung von 2mgon wäre damit nicht erfassbar. Hinzukommend ist unklar, welche Einwirkung die Temperatur auf das Verhalten der Konsole ausübt. Eine genaue Aussage über das Verhalten des Kirchturms kann daher mit der einzelnen Dauermessung des Nivel210- Neigungssensors nicht getroffen werden. Zur Überprüfung des Verhaltens der Konsole wird eine Referenzmessung mit einer Präzisionslibelle benötigt.

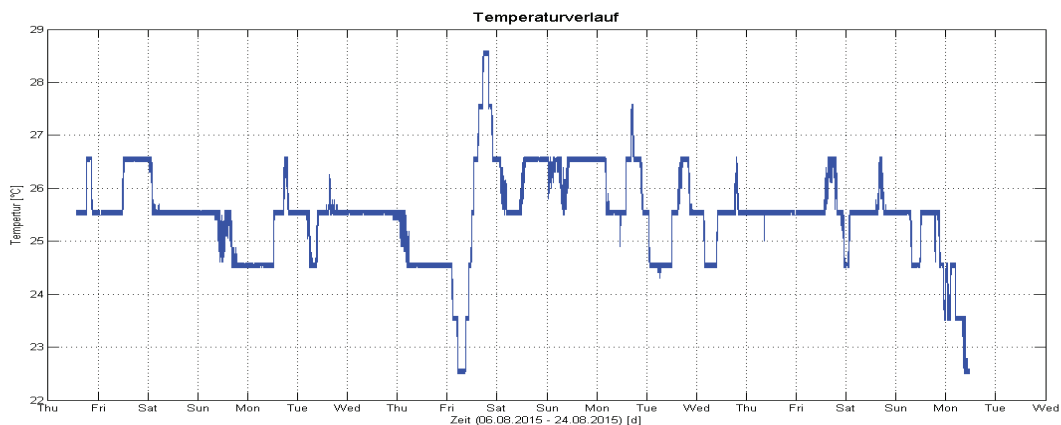


Abbildung 123: Temperaturverlauf während der Dauermessung

7.5 Schwingungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Abbildung 124 zeigt die Konsole der niedrigsten Messstation unterhalb des Glockenstuhls. Die Konsole ist neben der Vorrichtung für einen Nivel- Neigungssensor mit zwei weiteren Trägerplatten ausgestattet, die verschiedene Beschleunigungssensoren aufnehmen können. Voll bestückt befinden sich ein SBG IG-500E, ADXL345 und ein Smartphone auf der Konsole, die die Beschleunigungen im Kirchturm aufzeichnen sollen. Da bei den Sensoren hohe Datenraten von ca. 100Hz vorgesehen sind, entstehen große

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

Datenmengen. Solche Sensoren sind daher nicht für eine Dauermessung geeignet. Um dennoch einen Beschleunigungseinfluss der Glocken zu messen, werden die drei Sensoren zu einem 12Uhr Glockenspiel installiert. Bei diesem Glockenspiel wird zunächst das Hammerwerk der Gebetsglocke vier mal angeschlagen. Die vier Schläge signalisieren eine volle Stunde. Im Anschluss erfolgen 12 Hammerschläge auf die Johannesglocke. Danach wird die Gebetsglocke in eine pendelnde Bewegung versetzt und erzeugt das Glockenspiel. Mit Hilfe der Beschleunigungssensoren soll untersucht werden, ob sich die Pendelbewegung der Glocke auf den Turm überträgt und in Form von seitlichen Beschleunigungen aufgezeichnet werden kann.



Abbildung 124: Messstation 1 mit Sensoren

Die drei Beschleunigungssensoren werden installiert und für die Messung vorbereitet. Um eine Synchronität in den Messwerten zu erzeugen, wird ein kleiner Impuls, in Form eines kleinen Schlages mit einem Inbusschlüssel, auf die Konsole gegeben. In den Messwerten soll dieser Impuls als Peak zu erkennen sein. In *Abbildung 125* (SBG-Sensor) sind deutlich die Peaks zu sehen. Ein Peak bei ca. 6,5min Messzeit signalisiert den Beginn der Messung aller Sensoren. Der nächste Peak bei 34min beendet die gemeinsame Messung. Der Startimpuls bei ca. 6min ist in *Abbildung 126* (ADXL345) ebenfalls zu erkennen. Der Beendigungsschlag tritt hier allerdings zu einem anderen Zeitpunkt auf, als beim SBG-Sensor. Der Grund dafür ist die Berechnung der Zeitreihe aus der Messfrequenz des ADXL-Sensors. Die Testmessungen in Abschnitt 4.3.2 haben ergeben, dass der ADXL-Beschleunigungssensor keine konstante Messfrequenz einhält. Ein gemittelter Wert ergab daher eine Frequenz von 91Hz, die für die weiteren Berechnungen als Grundlage genutzt wurde. Durch diese variierende Frequenz verschieben sich die Messwerte zeitlich. Durch die Peaks in den Messwerten des SBG IG-500E und des ADXL345 können die Werte

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

synchronisiert werden. Der SBG IG-500E Beschleunigungssensor besitzt eine konstante Stromversorgung. Seine Messfrequenz von 100Hz wird daher als konstant und richtig angenommen. Mit dieser Erkenntnis können die Messwerte des ADXL345 zeitlich skaliert werden:

$$Frequenz_{ADXL345} = \frac{Anzahl_{ADXL345}}{Zeit_{IG-500E}} .$$

Nach dieser Berechnung ergibt sich eine Messfrequenz von 86,86Hz für den ADXL345 Beschleunigungssensor. Mit der jetzigen Frequenz wird eine neue Zeitreihe berechnet (ABB 127), die mit der des SBG-Sensors synchronisiert ist.

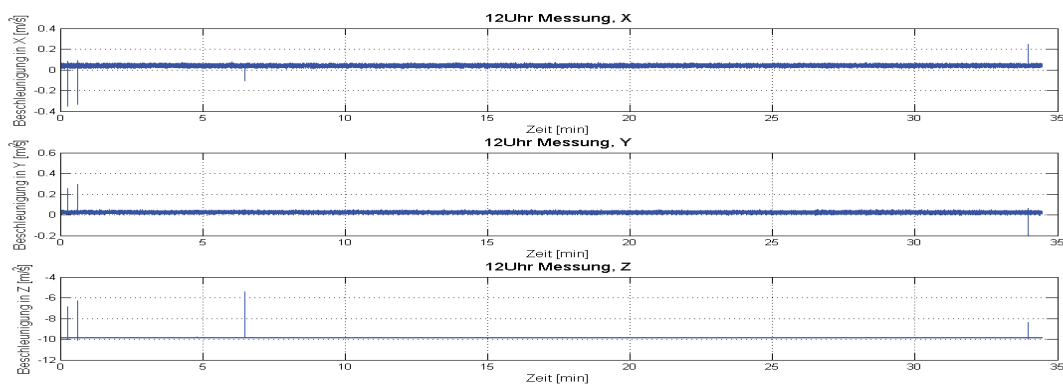


Abbildung 125: gesamte Messung des sbg IG-500E

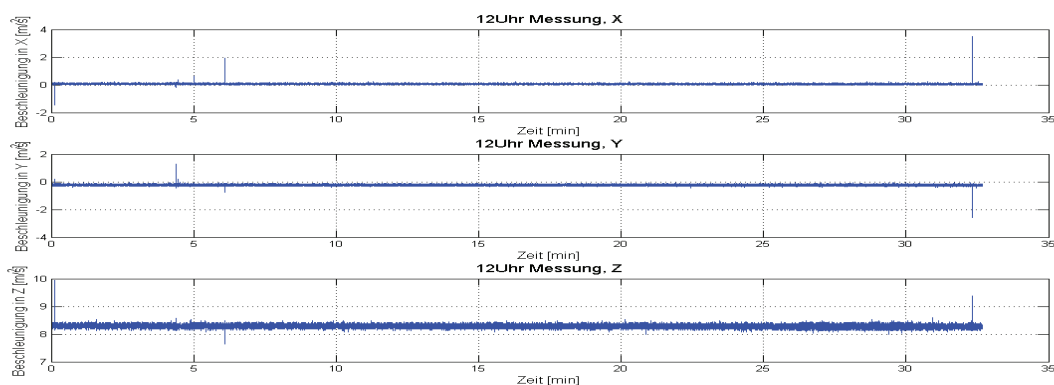


Abbildung 126: gesamte Messung des ADXL345 mit 91Hz

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

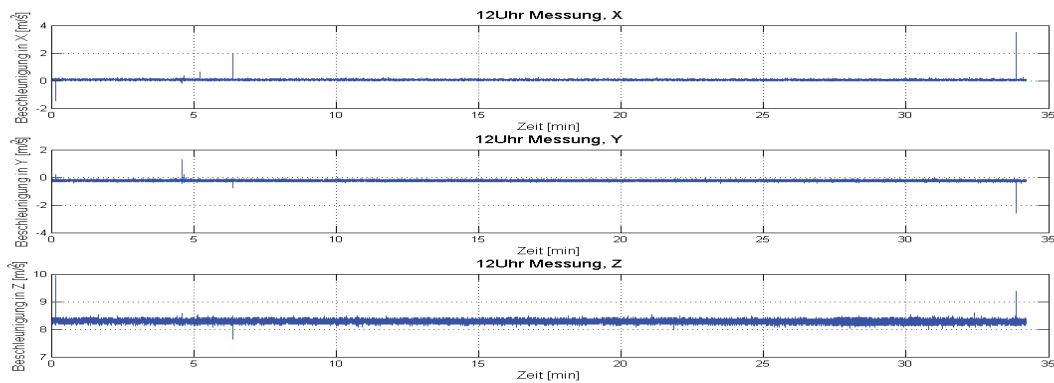


Abbildung 127: gesamte Messung des ADXL345 mit 86,86Hz synchronisiert

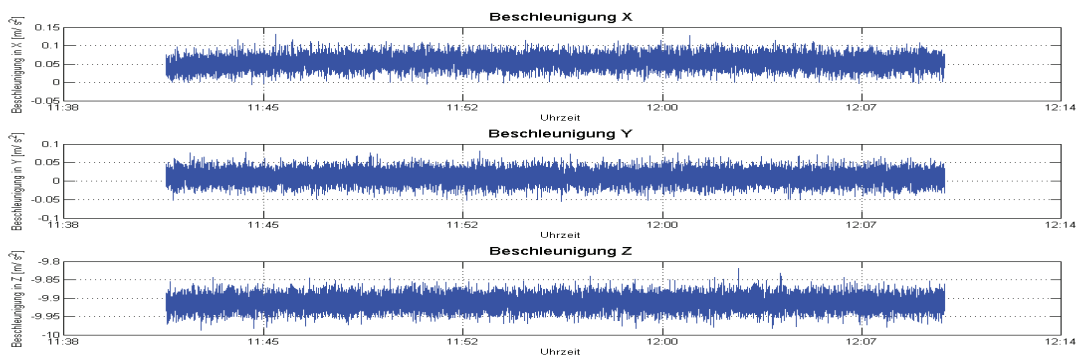


Abbildung 128: gesamte Messung mit dem iPhone5

Die *Abbildung 128* zeigt die Messwerte des iPhone5. Mit der SENSORLOG-App wird neben den Beschleunigungswerten noch eine zugehörige Zeitmarke mit abgespeichert. So können die Beschleunigungswerte einer genauen Zeit zugeordnet werden. Auf Grund der Datenmenge und dem anschließenden Transfer per E-Mail konnte keine 100Hz Messung realisiert werden. Die Messfrequenz wurde auf 10Hz herabgesetzt. Auffällig ist, dass die Impulse für die Messung nicht in den Messwerten auftauchen. Eine Synchronisation mit den anderen Sensoren kann daher nicht stattfinden.

Im nächsten Schritt werden alle Messreihen mit MATLAB verarbeitet. Zunächst werden die Werte von ihrem Trend befreit und eine anschließende Frequenzanalyse berechnet. Damit wird überprüft, ob das Pendeln der Gebetsglocke mit den entsprechenden Sensoren aufgezeichnet werden kann. Die Messreihen werden gekürzt, um den Einfluss des Glockenspiels bestmöglich zu untersuchen.

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

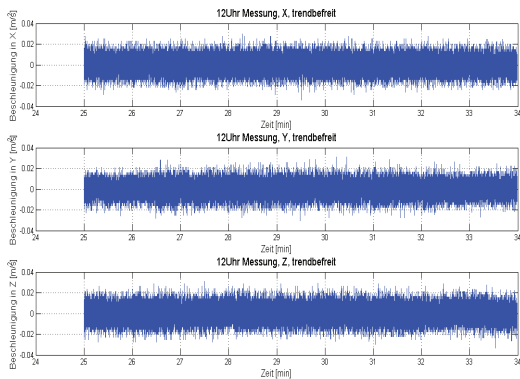


Abbildung 129: 12Uhr Glockenspiel, sbg IG-500E

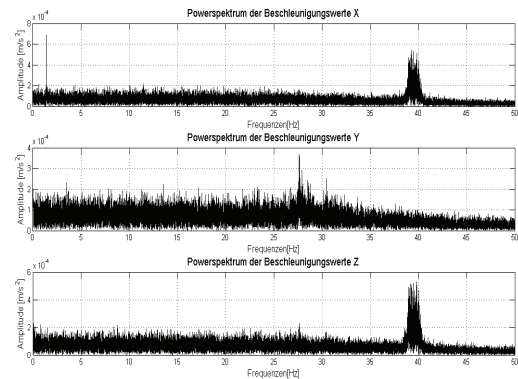


Abbildung 130: Powerspektrum, sbg IG-500E

Der sBG IG-500E Beschleunigungssensor wurde so auf der Konsole ausgerichtet, dass die X-Achse die Beschleunigungen in Nord-Süd- Richtung erfasst. Die Pendelbewegung der Gebetsglocke sollte daher lediglich in den X-Beschleunigungen erscheinen. *Abbildung 129* zeigt die trendbefreiten und gekürzten Messwerte des sBG- Sensors. Wie auch schon in *Abbildung 125* zu erkennen ist, erfolgt keine Verstärkung der Amplituden durch das Glockenspiel. Die Beschleunigungen der einzelnen Achsen befinden sich alle im Bereich von $-0,03\text{m/s}^2$ bis $0,03\text{m/s}^2$. Ein Einfluss der Glocke ist nicht zu erkennen. Die *Abbildung 130* zeigt die enthaltenen Frequenzen in der Messung. Ein einzelner, deutlicher Peak bei $1,41\text{Hz}$ in der X-Achse stellt dabei die Frequenz der Gebetsglocke dar. In der X- und der Z- Achse sind zwei Frequenzbänder von $38,5 - 40,5\text{ Hz}$ vertreten. Dieses Band fehlt komplett in der Y- Richtung. Die Standardabweichungen der einzelnen Achsen betragen

$$s_X = 0,0078\text{ m/s}^2, s_Y = 0,0067\text{ m/s}^2 \text{ und } s_Z = 0,0080\text{ m/s}^2 .$$

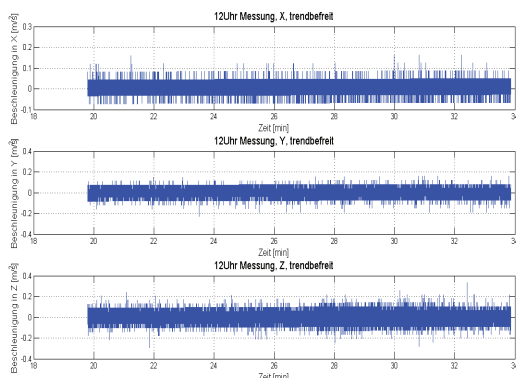


Abbildung 131: 12Uhr Glockenspiel, ADXL345

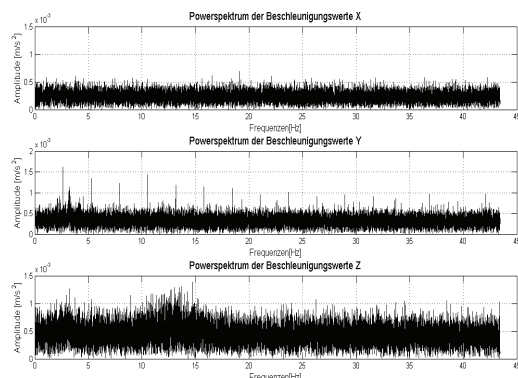


Abbildung 132: Powerspektrum, ADXL345

Die *Abbildung 131* zeigt die trendbefreiten Beschleunigungswerte des ADXL345

7. Installation von Messstationen für ein dauerhaftes Gebäudemonitoring

Beschleunigungssensors. Die Messreihe wurde gekürzt, um ein deutlicheres Ergebnis im Powerspektrum (ABB 132) zu erhalten. Durch die Ausrichtung des Sensors auf der Konsole zeigt die Y-Achse in nördlicher Richtung. Die Standardabweichungen der einzelnen Achsen betragen $s_x=0,0244\text{ m/s}^2$, $s_y=0,0337\text{ m/s}^2$ und $s_z=0,0460\text{ m/s}^2$. In der X- und in der Z- Achse sind keine eindeutigen Peaks im Powerspektrum zu erkennen, die auf eine vorkommende Frequenz hinweisen würden. In der Y- Achse hingegen sind wiederkehrende Frequenzen zu sehen. Diese treten bei 2,63 Hz und jeweils einem Vielfachen davon auf.

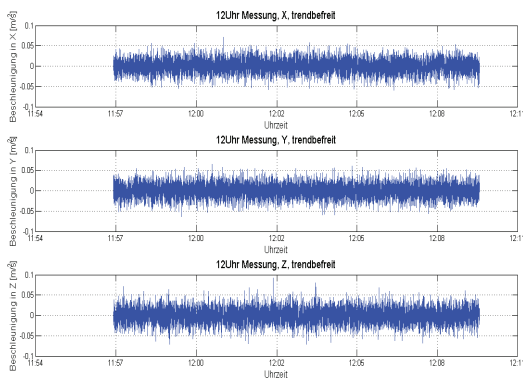


Abbildung 133: 12Uhr Glockenspiel, iPhone5

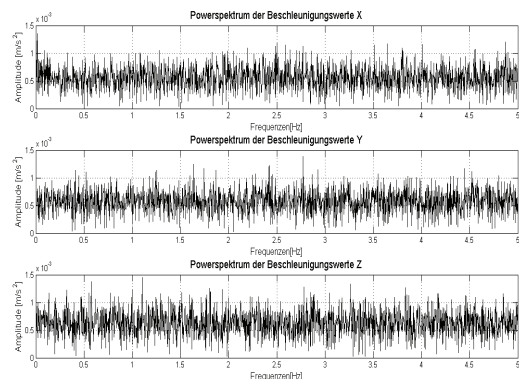


Abbildung 134: Powerspektrum, iPhone5

Die Messungen mit dem iPhone5 sind in der *Abbildung 133* zu sehen. Durch die abgespeicherte Uhrzeit lässt sich deuten, dass ab 12 Uhr eine Veränderung in den Messwerten auftreten müsste. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Bewegungen der Glocke gehen in der Messgenauigkeit des iPhones unter. Die Standardabweichungen betragen $s_x=0,0171\text{ m/s}^2$, $s_y=0,0180\text{ m/s}^2$ und $s_z=0,0190\text{ m/s}^2$. Damit reißt sich das iPhone erneut zwischen SBG IG-500E und ADXL345 ein. Eine Frequenzanalyse ist jedoch erfolglos. Durch die niedrigere Messfrequenz von 10Hz werden enthaltene Frequenzen weniger deutlich dargestellt, allerdings ist auch die erwartete Glockenfrequenz von 1,41Hz nicht zu erahnen.

Die Messposition unterhalb des Glockenstuhls zeigt, dass sich bei einem 12Uhr Glockenspiel keine Beschleunigungen messen lassen, die auf den Einfluss der Glocke zurückzuführen sind. Eine Transformation von Beschleunigungswerten in Neigungswerte wird daher nicht vorgenommen

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorliegende Masterarbeit befasst sich mit dem Gebäudemonitoring der Marienkirche in Neubrandenburg. Es wird vermutet, dass sich beim Glockenspiel der fünf Glocken der Kirchturm neigt. Um diese Bewegung zu untersuchen kamen verschiedene Messinstrumente zum Einsatz.

Eine tachymetrische Untersuchung beleuchtete das Gebäudemonitoring von Standpunkten außerhalb des Kirchturms. Testmessungen haben gezeigt, dass die beiden Produkte der Firma LEICA (TS15i und TS30) in der Lage sind, Prismenbewegungen von 1 - 2 cm mit einer Frequenz von bis zu 6,5 Hz aufzuzeichnen. Die beiden Tachymeter unterscheiden sich dabei in der möglichen Messfrequenz (TS15i = 6,5 Hz, TS30 = 5,0 Hz).

Um eine Bewegung des Turms zu erfassen sind zwei geodätische Prismen am Turm befestigt, die als Ziel für eine tachymetrische Messung dienen. Ein Prisma befindet sich an der nördlichen Fassade, um von einem Standpunkt auf dem RADISSON Hotel Parkplatz erfasst zu werden und das andere Prisma ist an der westlichen Fassade befestigt und wird von einem angrenzenden Hinterhof überwacht. Die Auswertungen der Messergebnisse eines großen Glockenspiels, bei dem alle fünf Glocken in Bewegung versetzt werden, ergibt vom nördlichen Standpunkt aus (TS15i) eine Bewegung in Nord-Süd- Richtung von 7,5 mm und in Ost-West- Richtung von 2,9 mm. Die detektierte Bewegung vom westlichen Standpunkt aus ergibt eine Auslenkung von 5,9 mm in Nord-Süd- Richtung und 3,0 mm in Ost-West- Richtung. Auf Grund der geringen Messfrequenz von lediglich 2 Hz können die periodischen Bewegungen der Glocken nicht erfasst werden. Die Tachymeter sind aber in der Lage mehr zu leisten. Eine Wiederholungsmessung mit höherer Messfrequenz könnte eine Schwingung erfassbar machen.

Als Neigungssensoren kommen Nivel210-C Modelle der Firma LEICA GEOSYSTEMS zum Einsatz. Diese Sensoren werden im Inneren des Kirchturms platziert und sollen die Neigungen messen die beim Glockenspiel auftreten. Testmessungen haben ergeben, dass die Neigungssensoren für schnelle Neigungsänderungen nicht geeignet sind. Auf Grund der Flüssigkeitsoberfläche im Inneren des Messinstrumentes erfolgt ein Aufschaukeln und damit eine fehlerhafte Messung. Für eine Frequenzanalyse sind die Nivel- Neigungssensoren nur bedingt einsetzbar. Durch ihre geringe Messfrequenz von max. 4Hz können nur langperiodische Schwingungen $< 2\text{Hz}$ erfasst werden. Die

8. Zusammenfassung und Ausblick

Flüssigkeit dient dabei als Filter, der enthaltene Schwingungen nicht störungsfrei wiedergibt. Bei der Testmessung im Kirchturm sorgen die Übertragungen des Schalldruckes auf direktem Wege und der Körperschall als Faktoren für eine Verschlechterung der Messergebnisse. In den Neigungswerten der einzelnen Messstationen sind dennoch Tendenzen zu erkennen, dass bei höheren Messstationen eine größere Neigungsspanne auftritt. Die höchste Messstation auf dem Dachboden zeichnete eine maximale Neigungsspanne von 200 mgon auf, die Messstation im Oktagon maß eine Spanne von 120 mgon und die niedrigste Messstation auf Höhe der Turmuhren erfuhr eine Neigungsspanne von 50 mgon. Diese Neigungen spiegeln allerdings auf Grund der auftretenden Schallschwingungen und dem damit verbundenen Aufschaukeln der Flüssigkeitsoberfläche im Sensor nicht die tatsächliche Neigung des Kirchturms wieder. Eine Berechnung der seitlichen Bewegungen des Turms entfällt damit ebenfalls. Auch ist ungeklärt in welcher Höhe der Ursprung der Neigung ist.

Frequenzanalysen ergaben, dass die Glocken mit unterschiedlichen Frequenzen in den Messwerten aufgezeichnet sind. Die Marienglocke schwingt mit einer Frequenz von 1,14 Hz, die Johannesglocke mit 1,26 Hz, die Gebetsglocke mit 1,40 Hz und die Sakramentsglocke ist mit einer Frequenz von 1,44 Hz vertreten. Der Einfluss der Lob- und Dankglocke ist zu gering, um in der Frequenzanalyse zu erscheinen.

Eine zweiwöchige Dauermessung mit einem Nivel Neigungssensor hat gezeigt, dass im Laufe des Tages eine Neigung in südlicher Richtung von 2 mgon auftritt. Unklar ist dabei, ob es sich um ein Driftverhalten des Neigungssensors handelt, sich die Konsole der Messstation durch Temperaturänderung bewegt, oder ob der Kirchturm eine Pfeilerdrehung auf Grund der Sonneneinstrahlung erfährt. Für eine weitere Aussage diesbezüglich ist eine Referenzmessung auf der Konsole der Messstation erforderlich.

Der SBG IG-500E, ADXL345 und ein iPhone5 sind Beschleunigungssensoren, die ebenfalls im Zuge dieser Arbeit untersucht wurden. Testmessungen haben ergeben, dass simulierte Schwingungen bis zu 50 Hz von den Sensoren erfasst und nach einer Frequenzanalyse detektiert werden konnten. Auf Grund der Datenmenge durch die hohe Messfrequenz von bis zu 100 Hz sind diese Sensoren nicht für den Dauereinsatz im Monitoring geeignet. Ein weiteres Manko ist die unkonstante Messfrequenz des ADXL345 Sensors auf Grund der Stromversorgung durch zwei Batterien.

Eine Aufzeichnung eines 12Uhr Glockenspiels der Marienkirche ergab, dass die Sensoren

8. Zusammenfassung und Ausblick

keine seitlichen Beschleunigungen, angeregt durch das Glockenspiel, aufzeichnen konnten. Gründe dafür können die niedrige Messstation sein, oder der zu geringe Schwingungsimpuls der Gebetsglocke. Eine Wiederholungsmessung bei einem Glockenspiel aller Glocken und einer höheren Messstation könnten bessere Ergebnisse liefern.

Zukünftig werden die weiteren Messstationen 2, 3 und 4 (in der Glockenstube, im Oktogon, auf dem Dachboden) vervollständigt und mit einem DABAMoS - Messsystem versehen. Damit ist es möglich die Nivel- Neigungssensoren von jedem webfähigen Computer, Smartphone oder Tablet zu steuern und Daten aufzeichnen zu lassen. Die Entwicklung des DABAMoS Projektes durch M.Eng. Philipp Engel und M.Eng. Björn Schweimler wird ebenfalls fortgesetzt. Damit ist es zukünftig möglich verschiedene Messsensoren für Überwachungsmessungen zu steuern, Daten zu erzeugen und auszuwerten. Für eine zusätzliche Datenübertragung wird eine Richt-WLAN Anlage installiert. Diese Anlage beinhaltet eine Richt-WLAN Antenne an der Hochschule Neubrandenburg und eine weitere an einem der Fialtürme der Marienkirche. Diese Antennen werden so ausgerichtet, dass sie Sichtkontakt haben und einen Datentransfer ermöglichen.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kirchturm der Marienkirche Neubrandenburg.....	6
Abbildung 2: Kirchenruine 1975.....	9
Abbildung 3: Ostgiebel der Marienkirche.....	11
Abbildung 4: Glockenstuhl mit den fünf Glocken.....	13
Abbildung 5: Setzung.....	16
Abbildung 6: Translation einer Talsperre.....	17
Abbildung 7: Rotation um die Stehachse.....	17
Abbildung 8: Torsion um die Längsachse der Tacoma Narrows Brücke.....	18
Abbildung 9: Skalierung eines Tunnelquerschnittes.....	18
Abbildung 10: Messverfahren und deren Genauigkeiten.....	19
Abbildung 11: Geodätisches Prisma an der Marienkirche.....	21
Abbildung 12: Aufmodulierung einer Trägerwelle.....	24
Abbildung 13: Auflösung der Phasenmessung.....	24
Abbildung 14: Einteilung der elektronischen Neigungssensoren.....	27
Abbildung 15: Aufhängungen bei Pendelsystemen.....	28
Abbildung 16: schematischer Aufbau eines Schaevitz Inclinometers.....	29
Abbildung 17: Aufbau eines Neigungssensors mit Flüssigkeitsoberfläche.....	30
Abbildung 18: Aufbau eines Nivel200- Neigungssensors.....	30
Abbildung 19: Funktionsweise eines Beschleunigungssensors.....	31
Abbildung 20: Messung der Horizontalrichtung.....	43
Abbildung 21: Messung der Schrägstrecke.....	43
Abbildung 22: Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS15I und Spektralanalyse....	48
Abbildung 23: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS15I Tachymeter.....	49
Abbildung 24: 3. Testmessung ohne Lotstab.....	49
Abbildung 25: 2. Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS15I und Spektralanalyse	51
Abbildung 26: 2. Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS15I Tachymeter.....	52
Abbildung 27: Horizontalrichtungsmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter.....	53
Abbildung 28: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter.....	54
Abbildung 29: Schrägstreckenmessung mit dem Leica TS30 Tachymeter im Synchro- Track Modus.....	56
Abbildung 30: NivelTool.exe.....	60
Abbildung 31: Nivel210.exe.....	60
Abbildung 32: Driftverhalten Nivel-1.....	62
Abbildung 33: Driftverhalten Nivel-2.....	62
Abbildung 34: Driftverhalten Nivel-3.....	62
Abbildung 35: Einschaltverhalten Nivel-1.....	63
Abbildung 36: Einschaltverhalten Nivel-2.....	63
Abbildung 37: Einschaltverhalten Nivel-3.....	63
Abbildung 38: Lage I der Offsetbestimmung.....	64
Abbildung 39: Lage II der Offsetbestimmung.....	64
Abbildung 40: Fehler bei der 2-Lagenmessung.....	65
Abbildung 41: Gyro Tester.....	66
Abbildung 42: Schwingungserzeuger.....	67
Abbildung 43: Frequenzspektren unter Einfluss des Master Gain.....	69
Abbildung 44: Frequenzmessung mit 3Hz.....	70
Abbildung 45: Frequenzmessung mit 4Hz.....	70

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 46: ADXL345.....	73
Abbildung 47: Platine eines iPhone 5.....	73
Abbildung 48: sbg IG-500E.....	73
Abbildung 49: sbgCenter.....	74
Abbildung 50: Seismometer 6th.....	75
Abbildung 51: DataCollection.....	76
Abbildung 52: iSeismometer.....	76
Abbildung 53: SensorLog.....	77
Abbildung 54: Driftverhalten des sbg IG-500E.....	80
Abbildung 55: Driftverhalten des ADXL345.....	80
Abbildung 56: Driftverhalten des iPhone 5.....	80
Abbildung 57: Schwingungsmessung mit 3Hz.....	82
Abbildung 58: Schwingungsmessung mit 4Hz.....	82
Abbildung 59: Schwingungsmessung mit 5Hz.....	82
Abbildung 60: Schwingungsmessung mit 10Hz.....	82
Abbildung 61: Schwingungsmessung mit 15Hz.....	83
Abbildung 62: Schwingungsmessung mit 20Hz.....	83
Abbildung 63: Schwingungsmessung mit 50Hz.....	83
Abbildung 64: Zeitreihe von Neigungswerten.....	88
Abbildung 65: Beseitigung des Mittelwertes.....	89
Abbildung 66: Zeitreihe mit linearem Trend.....	89
Abbildung 67: Zeitreihe und Powerspektrum.....	91
Abbildung 68: Aliaseffekt.....	92
Abbildung 69: Lage der Tachymeterstationen.....	101
Abbildung 70: Standorte der Nivel Neigungssensoren.....	101
Abbildung 71: Schrägstrecken des nördlichen Standpunktes.....	104
Abbildung 72: Schrägstrecken des 12Uhr Läutens (TS15).....	105
Abbildung 73: Schrägstrecken des Läutens aller Glocken (TS15).....	106
Abbildung 74: Schrägstrecken des Beerdigungsläutens (TS15).....	106
Abbildung 75: Horizontalrichtungen des nördlichen Standpunktes.....	107
Abbildung 76: Horizontalrichtungen des 12Uhr Läutens (TS15).....	108
Abbildung 77: Horizontalrichtungen des Läutens aller Glocken (TS15).....	108
Abbildung 78: Horizontalrichtungen des Beerdigungsläutens (TS15).....	109
Abbildung 79: Schrägstrecken des westlichen Standpunktes (TS30).....	110
Abbildung 80: Schrägstrecken des 12Uhr Läutens (TS30).....	110
Abbildung 81: Schrägstrecken des Läutens aller Glocken (TS30).....	111
Abbildung 82: Schrägstrecken des Beerdigungsläutens (TS30).....	111
Abbildung 83: Horizontalrichtungen des westlichen Standpunktes.....	112
Abbildung 84: Horizontalrichtungen des 12Uhr Läutens (TS30).....	112
Abbildung 85: Horizontalrichtungen des Läutens aller Glocken (TS30).....	112
Abbildung 86: Horizontalrichtungen des Beerdigungsläutens (TS30).....	113
Abbildung 87: gesamte Messung des Nivel210-1.....	114
Abbildung 88: Powerspektren der Y-Neigung (Nivel210-1).....	116
Abbildung 89: Powerspektren der X-Neigung (Nivel210-1).....	116
Abbildung 90: gesamte Messung des Nivel210-2.....	117
Abbildung 91: Powerspektren der Y-Neigung (Nivel210-2).....	118
Abbildung 92: Powerspektren der X-Neigung (Nivel210-2).....	118
Abbildung 93: Messung des Nivel210-3.....	119
Abbildung 94: Powerspektren der X- und Y-Neigung (Nivel210-3).....	120
Abbildung 95: Skizze eines Klothoidenverlaufs.....	122

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 96: Messstation 1.....	126
Abbildung 97: Messstation 2.....	126
Abbildung 98: Messstationen 3 und 4.....	126
Abbildung 99: diverse Kontaktplatten auf der Konsole.....	127
Abbildung 100: Drei-Punkt-Auflage an der Messstation 3.....	127
Abbildung 101: DaBaMoS Prinzipskizze.....	128
Abbildung 102: Messstation 1 mit Konsole und DaBaMoS	128
Abbildung 103: Dauermessung des Nivel Sensors mit DaBaMoS.....	129
Abbildung 104: Neigungsmessung, Do. der 06.08.2015.....	130
Abbildung 105: Neigungsmessung, Fr. der 07.08.2015.....	130
Abbildung 106: Neigungsmessung, Sa. der 08.08.2015.....	131
Abbildung 107: Neigungsmessung, So. der 09.08.2015.....	131
Abbildung 108: Neigungsmessung, Mo. der 10.08.2015.....	131
Abbildung 109: Neigungsmessung, Di. der 11.08.2015.....	131
Abbildung 110: Neigungsmessung, Do. der 13.08.2015.....	131
Abbildung 111: Neigungsmessung, Mi. der 12.08.2015.....	131
Abbildung 112: Neigungsmessung, Fr. der 14.08.2015.....	132
Abbildung 113: Neigungsmessung, Sa. der 15.08.2015.....	132
Abbildung 114: Neigungsmessung, So. der 16.08.2015.....	132
Abbildung 115: Neigungsmessung, Mo. der 17.08.2015.....	133
Abbildung 116: Neigungsmessung, Di. der 18.08.2015.....	133
Abbildung 117: Neigungsmessung, Mi. der 19.08.2015.....	133
Abbildung 118: Neigungsmessung, Do. der 20.08.2015.....	133
Abbildung 119: Neigungsmessung, Fr. der 21.08.2015.....	133
Abbildung 120: Neigungsmessung, Sa. der 22.08.2015.....	133
Abbildung 121: Neigungsmessung, So. der 23.08.2015.....	133
Abbildung 122: Neigungsmessung, Mo. der 24.08.2015.....	133
Abbildung 123: Temperaturverlauf während der Dauermessung.....	134
Abbildung 124: Messstation 1 mit Sensoren.....	135
Abbildung 125: gesamte Messung des sbg IG-500E.....	136
Abbildung 126: gesamte Messung des ADXL345 mit 91Hz.....	136
Abbildung 127: gesamte Messung des ADXL345 mit 86,86Hz synchronisiert.....	137
Abbildung 128: gesamte Messung mit dem iPhone5.....	137
Abbildung 129: 12Uhr Glockenspiel, sbg IG-500E.....	138
Abbildung 130: Powerspektrum, sbg IG-500E.....	138
Abbildung 131: 12Uhr Glockenspiel, ADXL345.....	138
Abbildung 132: Powerspektrum, ADXL345.....	138
Abbildung 133: 12Uhr Glockenspiel, iPhone5.....	139
Abbildung 134: Powerspektrum, iPhone5.....	139

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die fünf Glocken der Marienkirche.....	13
Tabelle 2: verschiedene Fabrikate von Tachymetern.....	25
Tabelle 3: verschiedene Fabrikate von Neigungssensoren.....	30
Tabelle 4: verschiedene Fabrikate von Beschleunigungssensoren.....	33
Tabelle 5: Offsets der Nivel- Neigungsmesser, bestimmt am Granittisch.....	65
Tabelle 6: Offsets der Nivel- Neigungsmesser, bestimmt am Gyro Tester.....	67
Tabelle 7: Offsets der Beschleunigungssensoren.....	81
Tabelle 8: Neigungsauflösung der Sensoren.....	85
Tabelle 9: Frequenzen aus den Powerspektren.....	120

11. Quellenverzeichnis

- [*Analog Devices*] : Analog Devices, Inc. (Hrsg.): . : Analog Devices, Inc.
- [*androidmag.de*] : <http://www.androidmag.de/wp-content/uploads/2013/09/s21.jpg>, 17.08.2015
- [*architectmagazine.com*] : http://www.architectmagazine.com/design/buildings/cayan-tower-designed-by-skidmore-owings-merrill_o, 17.08.2015
- [*berliner-unterwelten.de*] : <http://berliner-unterwelten.de/schwerbelastungskoeper.334.0.html>, 17.08.2015
- [*bernd-nebel.de*] : http://www.bernd-nebel.de/bruecken/index.html?/bruecken/4_desaster/tacoma/tacoma.html, 17.08.2015
- [*Bosch*] : Bosch Sensortec (Hrsg.): BMA220. : Bosch Sensortec
- [*bricks.eurob.org*] : http://bricks.eurob.org/index.php?node_id=69&lang_id=1&ds_target_id=436, 17.08.2015
- [*Buller; Wotin, 2001*] : Buller, M.; Wotin H.: Die Neubrandenburger Merienkirche 700 Jahre nach ihrer Weihe. Norderstedt: Books on Demand, 2001
- [*chip.de*] : http://www.chip.de/artikel/Bluetooth-4.1-Alle-Neuerungen-im-Detail_71165955.html, 17.08.2015
- [*dabamos.de*] : http://www.dabamos.de/_detail/images/dabamos-schematic.png?id=faq, 24.08.2015
- [*DXL360/S manual*] : DXL360/S Digital Protractor. . :
- [*elektronik-kompendium.de*] : <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1406261.htm>, 17.08.2015
- [*Engel, 2013*] : Engel, P.: Entwicklung eines autonomen Low-Cost-Messclients für geodätische Überwachungsmessungen. Neubrandenburg: Hochschule Neubrandenburg, 2013
- [*freespaceoptics.org*] : <http://www.freespaceoptics.org/>, 17.08.2015
- [*google.de/maps*] : <https://www.google.de/maps/place/Konzertkirche+Neubrandenburg/@53.555748,13.260046,257m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x0:0xf436373eeee42b9a!6m1!1e1>, 18.08.2015
- [*Gruber, 2012*] : Gruber, F.J.; Joeckel, R.: Formelsammlung für das Vermessungswesen, 16. Aufl.. Wiesbaden: Springer+Vieweg, 2012
- [*Heunecke; et al., 2013*] : Heunecke, O.; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H.: Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Berlin: Wichmann, 2013
- [*hochschule-bochum.de*] : http://www.hochschule-bochum.de/fb5/baeumker/download/gsi_formatbeschreibung.pdf, 17.08.2015
- [*Ingensand, 1985*] : Ingensand, H.: Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmeßsysteme für kontinuierliche Messungen. München: Bayerische Akademie der Wissenschaft, 1985
- [*Ingensand, 2012*] : Ingensand, H.: Einführung in die Gerdätische Messtechnik. Zürich: Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie, 2012
- [*konzertkirche-nb.de*] : http://www.konzertkirche-nb.de/htm/chronik_zeitspiegel.htm, 17.08.2015
- [*Leica 01*] : Leica Geosystems AG (Hrsg.): TCR1200, TS09, TS15, TS30, TS50. Heerbrugg, CH: Leica Geosystems AG
- [*Leica 02*] : Leica Geosystems AG (Hrsg.): Nivel200. Heerbrugg, CH: Leica Geosystems AG
- [*Leica TS15*] : Leica Geosystems AG (Hrsg.): TS15 manual. Heerbrugg, CH: Leica Geosystems AG, 2010
- [*Leica TS30*] : Leica Geosystems AG (Hrsg.): TS30 manual. Heerbrugg, CH: Leica Geosystems AG, 2009

11. Quellenverzeichnis

- [Luhmann, 2010] : Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 3. Aufl.. Berlin: Wichmann, 2010
- [Mandl, et al. 2010] : Mandl, P.; Bakomenko, A.; Weiß, J.: GrundkursDatenkommunikation: TCP/IP-basierte Kommunikation: Grundlagen,Konzepte und Standards. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010
- [mv-trip.de] : <http://mv-trip.de/marienkirche-neubrandenburg/>, 17.08.2015
- [neubrandenburg.de] : http://www.neubrandenburg.de/index.php?option=com_content&view=article&id=463:denkmr-und-sehenswgkeiten&catid=90:denkmr-a-sehenswgkeiten&Itemid=378, 17.08.2015
- [pce-instruments.com] : <https://www.pce-instruments.com/deutsch/images/pce-messgeraete/alias-effekt.jpg>, 17.08.2015
- [robotsinsearch.com] : <http://www.robotsinsearch.com.au/products/sbg-systems-ig-500-series-ins>, 17.08.2015
- [Sauter, 2015] : Sauter, M.: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth, 6. Aufl.. Köln: Springer+Vieweg, 2015
- [sbg Systems] : sbg Systems (Hrsg.): . North America: sbg Systems
- [Schlemmer, 1996] : Schlemmer, H.: Grundlagen der Sensorik: Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Heidelberg: Wichmann, 1996
- [seenplatte-entdecken.de] : http://www.seenplatte-entdecken.de/cms/index.php?SESS_ID=&s_id=127, 17.08.2015
- [solutions.3mdeutschland.de] : http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1310994447000&locale=de_DE&assetType=MMM_Image&assetId=1273690296164&blobAttribute=ThumbnailImage, 17.08.2015
- [sparkfun.com] : <https://www.sparkfun.com/products/retired/9814>, 17.08.2015
- [STMicroelectronics] : STMicroelectronics (Hrsg.): LIS331DLH. : STMicroelectronics
- [talsperren.net] : http://www.talsperren.net/Wissenswertes/Bauweise_von_Stauwerken/bauweise_von_stauwerken.html, 17.08.2015
- [techinsights.com] : http://www.techinsights.com/uploadedImages/Public_Website/Content_-_Primary/Teardowns/2012/iPhone_5_Teardown/apple-iphone-5-comm-front-web.jpg, 17.08.2015
- [Topcon] : Topcon AG (Hrsg.): IS-3, OS, DS200i, PS, MS AX, MSAX II. Tokio, JP: Topcon AG
- [Tränkler, 2014] : Tränkler, H.-R.: Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft, 2. Aufl.. Heidelberg: Springer, 2014
- [Trimble] : Trimble Navigation Ltd. (Hrsg.): S1, S7, S9, S9 HP. Kalifornien, USA: Trimble Navigation Ltd.
- [wikipedia.de/Eigenfrequenz] : <https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenfrequenz>, 19.08.2015
- [wikipedia.de/Sudden_Motion_Sensor] : https://de.wikipedia.org/wiki/Sudden_Motion_Sensor, 17.08.2015
- [Wyler] : Wyler AG (Hrsg.): NivelSWISS-D. Winterthur, CH: Wyler AG
- [Zarnekow, et al., 2013] : Zarnekow, R.; Wulf, J.; von Bornstaedt, F.: Internetwirtschaft: Das Geschäft des Datentransports im Internet. Heidelberg: Springer, 2013