

Philipp Mitterschiffthaler

**Untersuchungen zur
Wegbestimmung mit dem
Beschleunigungssensor
Q-Flex QA 1400**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



Technische Universität Graz

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Woschitz
Begutachter: o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Brunner
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, März 2011

meinen Töchtern

Ylvie & Maja Frida

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit wurde die Tauglichkeit des Beschleunigungssensors Q-Flex QA 1400 zur Wegbestimmung sowie dessen Präzision untersucht. Diese Untersuchungen wurden im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme durchgeführt.

Teil dieser Arbeit ist es ein Messsystem zu schaffen, das möglichst frei von etwaigen Fehlereinflüssen ist und für die Wegbestimmung verwendet werden kann. Neben dem Beschleunigungssensor (Q-Flex QA-1400) wurde ein A/D-Wandler (NI 9239) sowie eine Messsoftware verwendet. Auch diese Komponenten waren Teil der Untersuchungen, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Beschleunigungssensor und dem Gesamtsystem lag. Neben dem Aufwärm- und Driftverhalten wurden auch Untersuchungen zur Nullpunktstabilität und der Ermittlung der Grenzfrequenz durchgeführt. Weiters wurde die Temperaturabhängigkeit des Messsystems durch Messungen in der Klimakammer bestimmt (62 ppm/°C).

Durch Fahrten auf dem Vertikalkomparator wurde ein Maßstab bestimmt, dessen Ursache im Spannungsverlust im Messsystem bzw. der Verkipfung des Sensors liegt. Dieser beträgt 0.2 Prozent und ist an das Messsignal anzubringen.

Diese Korrekturterme wurden bei Messungen mit der Klimakammer, wo die Auswirkung der sich verändernden Umgebungstemperatur auf das Messsignal analysiert wurde, sowie bei Messungen mit dem Horizontalkomparator, wo die Wegbestimmung mit einer fixen Referenz verglichen wurde, kontrolliert.

Nach den Untersuchungen im Labor wurde mit dem Messsystem eine erste Feldmessung auf einer 80 m langen Fußgängerbrücke durchgeführt. Die Brücke wurde einerseits gezielt durch Hüpfen und Hammerschläge und andererseits durch auf dem Brückendeck gehende Passanten in Schwingung versetzt. Es wurden Bewegungsamplituden zwischen 0.02 mm und 1.2 mm festgestellt. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Brücke durch die Anregung von Fußgängern in der Eigenfrequenz (5.8 Hz) zu schwingen beginnt.

Abstract

Aim of this master thesis was to study the precision and the drift performance of the acceleration sensor Q-Flex QA 1400 for routing and determining the position. These studies were performed in the Laboratory of the Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems.

An Part of this work is to create a measurement system that is free from any error influences and can be used to determining the position. In addition to the acceleration sensor (Q-Flex QA-1400) and resistors, which convert the signal from volt to amperes, also an A/D converter (NI 9239) and a measurement software was used. These components were part of the investigation, but the focus was on the acceleration sensor and the overall system. In addition to the warm-up and drift behavior also studies on the zero stability and the determination of the cutoff frequency were carried out. Further the temperature dependence of the measurement system was determined by using the climatic chamber.

Passages on the vertical comparator were used to determining a measure, which must be attached to the signal. Its cause is located in the loss of tension in the measuring system and the tilt of the sensor. This is 0.2 percent and is affixed to the measuring signal.

These correction terms were checked by measurements with the climatic chamber, where the impact of changing ambient temperature was analyzed for the measurement signal. Even when driving with the horizontal comparator, where the determination of position get compared with a fixed reference.

According to the investigations in the laboratory, the measurement system was used by a field experiment on an 80 m long pedestrian bridge. The bridge was part of a targeted manner by hopping and hammer blows and by going on the bridge deck passers in vibrates. Movement amplitudes were found between 0.02 mm and 1.2 mm. It was also shown that the bridge starts to swing through the excitation of pedestrians in the natural frequency, which is 5.8 Hz.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinen Töchtern Ylvie und Maja Frida. Durch sie habe ich nicht nur wieder zum Studium zurückgefunden, sondern auch konsequent fertigstudiert. Ich danke auch meiner Ursi, die mich immer wieder motiviert hat und einfach die beste Frau der Welt ist.

Natürlich auch ein Danke an meine Eltern Elisabeth und Werner Mitterschiffthaler, die mich nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern mir und meinen Geschwistern eine sorgenfreie Kindheit ermöglicht haben.

Danke an meinen Betreuer Dr. Helmut Woschitz für die vielen Anregungen und Diskussionen, sowie für die Unterstützung bei den Messungen im Labor. Durch seine Unterstützung hat er diese Arbeit wesentlich beeinflusst.

Hiermit soll auch allen Mitarbeitern des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme unter der Leitung von Prof. Brunner für die stets freundliche Atmosphäre und für deren Hilfsbereitschaft in allen Belangen recht herzlich gedankt werden. Insbesondere möchte ich mich bei DI Robert Presl und Ing. Rudolf Lummerstorfer bedanken, die mich nicht nur bei den Messungen unterstützten, sondern auch das Messsystem aufgebaut bzw. angefertigt haben.

Meinem Bruder Georg gilt mein Dank für die Hilfe bei der Feldmessung.

Danke auch an meine Studienkollegen - ohne Euch wäre ich nie soweit gekommen!

Graz, März 2011

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung.....	2
1.3	Überblicküber die Arbeit	3
2.	Einige Grundlagen.....	4
2.1	Grundprinzipien der Beschleunigungsmessung	4
2.2	Arten von Beschleunigungssensoren	5
2.3	Realisierungen	5
2.4	Koordinatensysteme.....	6
2.4.1	Vereinfachung einachsiger Sensor	7
2.4.2	Transformationen.....	7
2.5	Physikalische Einflussgrößen auf die Beschleunigungsmessung	8
3.	Anforderungen an ein Messsystem	11
3.1	Messfrequenz.....	11
3.2	Notwendiger Messbereich	12
3.3	Notwendige Genauigkeit	12
3.3.1	Nullpunktverschiebung.....	13
3.3.2	Messrauschen.....	14
3.4	Position und Ausrichtung.....	15
3.5	Resümee	16
4.	Aufbau des Messsystems.....	17
4.1	Hardware.....	18
4.1.1	Beschleunigungssensor Q-Flex QA 1400	18
4.1.2	Umwandler	19
4.1.3	A/D-Wandler NI9239	20
4.2	Software	20
5.	Datenprozessierung	23
5.1	Filterung	23
5.2	Wegbestimmung durch Doppelintegration.....	24

5.3	Datenfluss	25
6.	Untersuchungen des Messsystems.....	29
6.1	Untersuchung des A/D-Wandlers NI 9239.....	29
6.1.1	Rauschmessungen	29
6.1.2	Mögliches Auftreten von Phasensprüngen.....	30
6.1.3	Mögliche Mittelung	32
6.1.4	Resümee.....	33
6.2	Untersuchung des Q-Flex QA 1400.....	33
6.2.1	Optimierung des Messsystems	34
6.2.2	Untersuchung der Eignung des Sensors.....	35
6.2.3	Analyse der auftretenden Frequenzen	37
6.2.4	60-Stunden- Messung.....	39
6.2.5	Rauschen	42
6.2.6	Drift	42
6.2.7	Aufheizeffekte	42
6.2.8	Aufwärmeeffekte	44
6.2.9	Nullpunktstabilität statisch	45
6.2.10	Nullpunktstabilität dynamisch.....	46
7.	Kalibrierung des Messsystems.....	49
7.1	Temperaturabhängigkeit des Messsystem	49
7.2	Maßstabsbestimmung	50
8.	Praxistests.....	56
8.1	Praxistest Temperaturkalibrierung.....	56
8.2	Feldmessung Krugwehrbrücke	57
8.2.1	Durchführung	58
8.2.2	Grundfrequenz der Brücke.....	59
8.2.3	Hochpassfilter	60
8.2.4	Bandstopfilter	61
8.2.5	Bewegung der Brücke durch Laufen	62
8.2.6	Anregung der Brücke durch Hüpfen.....	64
8.2.7	Bewegung der Brücke durch Gehen	65
8.2.8	Zusammenfassen der Ergebnisse.....	67
8.3	Praxistest Horizontalkomparator.....	68
8.3.1	Aufbau Messsystem.....	68
8.3.2	Ausrichten des Sensors	69

9. Schlussbetrachtung und Ausblick.....	73
Referenzen	76
Anhang A - Ermittlung der Eigenfrequenzen	80
Anhang B - Herleitung der Varianzfortpflanzung der Coriolisbeschleunigung	84
Anhang C – Eignung des Horizontalkomparators für Kalibriermessfahrten	86
Anhang D - Bestimmung einer linearen Drift	88
Anhang E - Hochfrequente Anteile	89
Anhang F - Wiederholung Reproduzierbarkeit Messsignal.....	90
Anhang G - Datenblätter.....	91
Anhang H - Messungen mit der Klimabox	93
Anhang I - Feldmessung.....	95
Anhang J - Praxistest Horizontalkomparator	98

1. Einleitung

1.1 Motivation

Wegen der zunehmenden Alterung von Infrastrukturanlagen liegt ein großes Augenmerk auf ihrer Überwachung. Ein Großteil der österreichischen Autobahnbrücken ist zwischen 25 und 35 Jahre alt (Gernot, 2008, S. 18), wobei ca. die Hälfte der Brücken einen stark beeinträchtigten Zustand aufweist, der reparaturliche Maßnahmen innerhalb der nächsten drei Jahre nach sich zieht. Aber auch andere Infrastrukture Objekte unterliegen einem Alterungsprozess, der durch Wind, Erdbeben, Straßenverkehr und viele andere Einflüsse Einwirkung auf Bauwerke hat.

Da tausende Brücken an ihre Alters- und/oder Leistungsgrenzen stoßen und nur wenige Neubauten realisiert werden können, ist es sinnvoll, die Nutzungsdauer kontrolliert zu verlängern (Wunderlich, 2006, S. 53). Gebäude unterliegen stets Bewegungen, die im Regelfall keine schlimmen Auswirkungen auf die Tragstruktur der Bauwerke haben. Allerdings ist die Anregung von Eigenfrequenzen von Bauwerken oft die Ursache von Beschädigungen bis hin zur Zerstörung.

In Wolgograd musste eine ca. 7 km lange Brücke nach 13 Jahren Bauarbeiten nur 7 Monate nach ihrer Eröffnung gesperrt werden, weil sie Schwingungen mit einer Amplitude von bis zu 1 Meter aufwies¹. Die Anregung soll durch starken Wind erfolgt sein. Durch Konstruktionsfehler oder fortgeschrittene Alterung kommt es immer wieder zu Beschädigungen von Bauwerken. Die größte Gefahr bildet die Anregung der Eigenfrequenzen, die sich in Extremfällen so sehr aufschaukeln kann, dass ein Bauwerk kollabiert, wie es beispielsweise bei der Tacoma-Narrows-Brücke passierte. Diese Brücke stürzte im Jahre 1940 nur 4 Monate nach ihrer Eröffnung ein². Dieses und viele andere Beispiele bezeugen die Notwendigkeit eines verlässlichen Messsystems, das Bewegungen von Bauwerken detektieren kann.

Es gibt viele verschiedene Überwachungsmethoden von Bauwerken. Zu den klassischen geodätischen Methoden zählen unter anderem Setzungsmessungen mit Theodoliten oder Nivellieren. Bei diesen Verfahren sind allerdings nur sehr geringe Messfrequenzen möglich. Dadurch können Bewegungen von kurzer Dauer nicht registriert werden. GPS-Sensoren eignen sich vor allem sehr gut für Langzeitüberwachungen von Brücken, wie Wieser und Brunner (2004, S. 186) festgestellt haben.

¹ <http://www.blick.ch/news/ausland/die-gefaehrlichste-bruecke-der-welt-147429> (22. 1. 2011)

² <http://de.wikipedia.org/wiki/Tacoma-Narrows-Brücke> (14.1.2011)

Daher konnte für einen Brückenpunkt unter besten Bedingungen eine Präzision von 2 mm mit einer Auflösung von wenigen Minuten erreicht werden. Allerdings wird vorgeschlagen, für genaue Deformationsmessungen weitere Sensoren zu verwenden. Einen großen Zulauf hat die Überwachung mit eingebauten faseroptischen Sensoren. Diese Sensoren müssen allerdings schon in der Bauphase in ein Bauwerk integriert werden (Brunner und Lienhart, 2004, S.84). Diese Messsysteme zeichnen sich vor allem durch eine hohe Genauigkeit ($\sigma < 1\mu m$) und sehr hohe Messraten - bis zu 20 kHz - aus.

Hier soll versucht werden, Deformationen mit einem Beschleunigungssensor zu messen. In einem ersten Schritt wird dazu in der vorliegenden Arbeit ein 1-Achs-Sensor verwendet.

1.2 Aufgabenstellung

Aufgrund der Messpräzision moderner Beschleunigungssensoren ist es möglich, Beschleunigungen im μg -Bereich zu detektieren. Durch die zweifache Integration dieser Messdaten können kleine Wegveränderungen bestimmt werden.

Allerdings sind diese Sensoren sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Daher soll die Leistungsfähigkeit von Beschleunigungssensoren zur Wegbestimmung im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme untersucht werden. In dieser Masterarbeit soll vorrangig der einachsige Beschleunigungssensor Q-Flex QA 1400 untersucht werden.

Nach dem Aufbau des Messsystems, bestehend aus Beschleunigungssensor, A/D-Wandler und Software, werden Systemtests durchgeführt. Hierbei sollen vor allem Driftverhalten, Alignement, Auflösung und Temperaturverhalten untersucht werden. Diese Testmessungen können über größere Wege, mit linearen Verschiebungen, bis zu 30m am Horizontal- und bis zu 3 m am Vertikalkomparator durchgeführt werden. Für die Wegbestimmung aus den Beschleunigungsdaten sollen verschiedene Auswertemethoden und Fehlermodelle untersucht werden.

Sollten damit zufriedenstellende und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, ist geplant, zum Beispiel die Vertikalbewegung einer Brücke oder die Horizontalbewegung eines Turmes zu detektieren. Es soll ein System geschaffen werden, das es ermöglicht, Gebäudebewegungen dort zu erfassen, wo herkömmliche Messmethoden wie etwa GPS oder terrestrische Vermessung zu langsam oder zu ungenau werden.

1.3 Überblick über die Arbeit

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen der Beschleunigungsmessung eingegangen. Neben den Arten von Beschleunigungssensoren werden hier auch die nötigen Koordinatensysteme und die physikalischen Einflussgrößen auf das Signal beschrieben. In Kapitel 3 wird abgeschätzt, mit welcher Genauigkeit die Messgrößen erfasst werden müssen. In Kapitel 4 wird das realisierte Messsystem beschrieben, und zwar die Hardwarekomponenten und die Messsoftware. In Kapitel 5 wird erklärt, welche Korrekturen und Berechnungen vorgenommen werden, um aus dem Beschleunigungssignal den zurückgelegten Weg bestimmen zu können. Kapitel 6 und Kapitel 7 bilden den Hauptteil der Arbeit. Hier wird untersucht, welche systematischen und zufälligen Fehlereinflüsse auf die Komponenten des Messsystems wirken und welche Korrekturen dafür abgeleitet werden. In Kapitel 8 wird auf die Messung auf einer Fußgängerbrücke eingegangen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 9 zusammengefasst, in dem auch ein Ausblick gegeben wird. Im Anhang sind weitere Informationen zu den Berechnungen und den Messungen enthalten.

2. Einige Grundlagen

2.1 Grundprinzipien der Beschleunigungsmessung

Das Grundprinzip der Beschleunigung beruht auf den Newtonschen Gesetzen der Bewegung von Massen im Raum aus dem Jahre 1697, entnommen aus Breuer (1991, S. 37).

- **Erstes Newtonsches Gesetz - Trägheitsprinzip:**

Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder einer gleichförmigen geraden Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.

$$m \cdot v = \text{const} \quad (2.1)$$

m ... Masse

v ... Geschwindigkeit

- **Zweites Newtonsches Gesetz - Aktionsprinzip:**

Daraus lässt sich unmittelbar das zweite Newtonsche Axiom ableiten. Wirkt eine Kraft auf einen Körper, so wird er beschleunigt, deformiert oder ändert seine Richtung. Es können alle Folgen gleichzeitig eintreten. Die beobachtete Beschleunigung ist proportional zur Kraft, also

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad (2.2)$$

a ... Beschleunigung

F ... Kraft

Da jede Masse der Erdbeschleunigung unterliegt, lässt sich daraus ableiten, dass auf jeden Beschleunigungssensor zumindest die Schwerkraft wirkt.

$$\mathbf{F}_g = m \cdot \mathbf{g} \quad (2.3)$$

g ... Schwerebeschleunigung

F_g ... im Schwerfeld wirkende Kraft

2.2 Arten von Beschleunigungssensoren

Der schematische Aufbau eines Beschleunigungssensors ist in Abbildung 1 dargestellt.

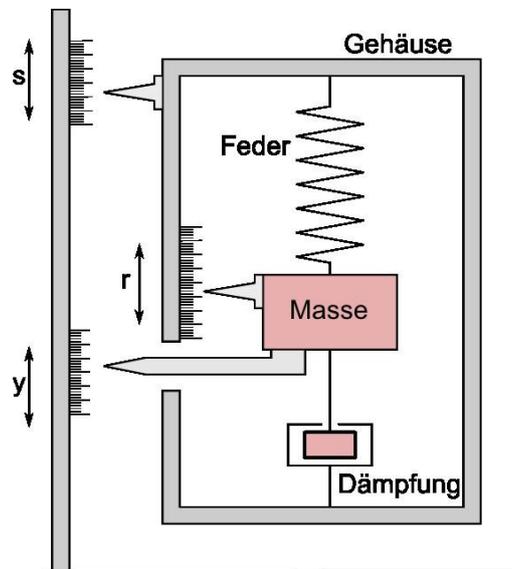


Abbildung 1: Messprinzip Beschleunigungssensor (nach Brunner, 2008, S. 18-1)

Die Relativbewegung der Masse resultiert aus der Bewegung der Masse gegenüber dem Gehäuse. Ist also ein Sensor „reibungsfrei“ mit einem System verbunden, so können Bewegungen dieses Systems gemessen werden.

$$r = y - s \quad (2.4)$$

r ... Relativbewegung der Masse
 y ... Absolutbewegung der Masse
 s ... Absolutbewegung des Gehäuses

2.3 Realisierungen

Es gibt viele verschiedene Bauarten von Beschleunigungssensoren. Hier sollen die verschiedenen Grundprinzipien der Sensoren schematisch dargestellt werden. Die nachfolgenden Beschreibungen sind von Neuhierl (2005, S. 18-20) entnommen und in Abbildung 2 dargestellt.

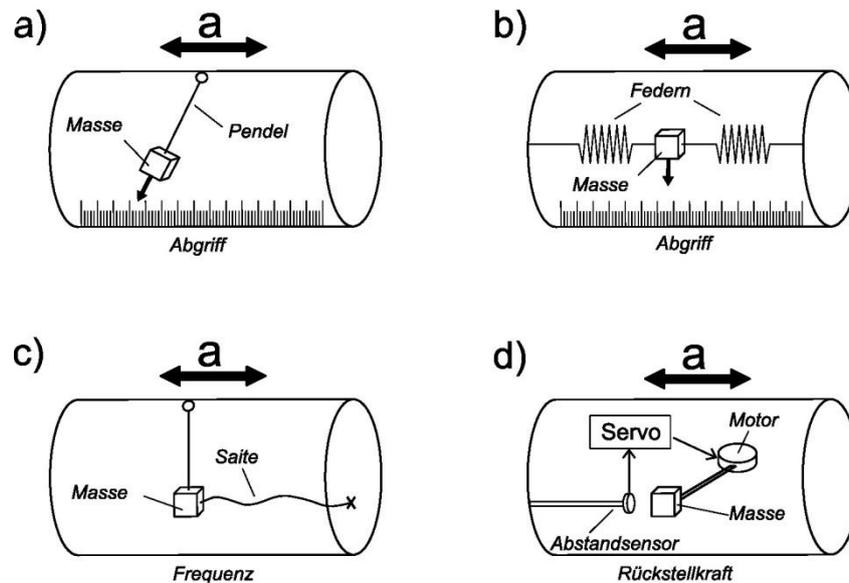


Abbildung 2: Arten von Beschleunigungssensoren: a) Pendel-Sensor b) Feder-Masse-Sensor
c) Schwingsaiten-Sensor d) Servo-Sensor

Während bei den ersten beiden Systemen die Auslenkung der Masse bestimmt wird und beim Schwingsaitensensor über die Veränderung der Frequenz der Saite auf das Beschleunigungssignal geschlossen wird, wird beim Servo-Beschleunigungssensor die Testmasse durch einen Motor konstant in ihrer Position gehalten. Dieser Sensor nutzt als Aufhängung ein Pendel oder ein Feder-Masse-System. Wirkt nun eine Beschleunigung auf den Sensor, ist eine erhöhte Rückstellkraft notwendig, die proportional zur Beschleunigung wirkt und wird als Stromstärke bzw. –spannung ausgegeben (Abbildung 2d).

2.4 Koordinatensysteme

Theoretisch ist es laut dem zweiten Newtonschen Gesetz möglich, die Bewegung eines Körpers zu bestimmen, sofern alle auf den Körper wirkenden Kräfte bekannt sind. Daher werden Beschleunigungssensoren auch verwendet, um durch die Integration Geschwindigkeits- bzw. Positionsveränderungen zu bestimmen. Es wird also über die Trägheit einer Masse auf die Bewegung des Sensors rückgeschlossen. Da nun allerdings einige Störgrößen mitgemessen werden, die u.a. im Bezug auf die Erde konstant sind, ist es notwendig, die Lage des Sensors auf der Erde zu kennen. Um die Bewegung einer Masse im Bezugssystem der Erde betrachten zu können, müssen verschiedene Referenzrahmen (Abbildung 3) definiert werden. Die folgenden Systeme sind dem Buch „Navigation“ (Hofmann-Wellenhoff et al., 2003, S. 19-24) entnommen.

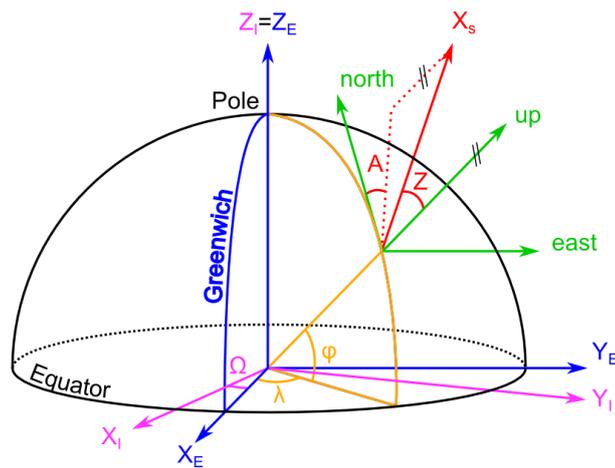


Abbildung 3: Koordinatensysteme

Koordinatensysteme:

- inertiales System
- erdfestes System
- lokales Horizontsystem
- Sensorkoordinatensystem

2.4.1 Vereinfachung einachsiger Sensor

Für das in dieser Masterarbeit verwendete Messsystem (siehe Kapitel 4) vereinfachen sich die Transformationen zwischen den Koordinatensystemen. Da der Sensor nur entlang einer Achse misst, fällt das Sensor- mit dem Objektkoordinatensystem zusammen. Bei vertikaler Aufstellung fallen diese Systeme auch noch mit dem lokalen Horizontsystem zusammen. Das erdfeste Koordinatensystem ist allerdings trotzdem wichtig, da die Korrektur der Coriolisbeschleunigung in diesem System gerechnet werden muss, ist sie doch von der geographischen Breite φ abhängig.

2.4.2 Transformationen

Um die Korrekturen im erdfesten System anbringen zu können, bedarf es einer Transformation vom Sensorkoordinatensystem in das erdfeste Koordinatensystem. Die Berechnung wird in zwei Schritte aufgeteilt, die im Folgenden genauer beschrieben wird:

$$R_b^e = R_I^e \cdot R_b^I \quad (2.5)$$

- **Sensorkoordinatensystem \rightarrow lokales Horizontsystem**

Um zwischen diesen Systemen transformieren zu können, muss die Ausrichtung des Sensors zum Ursprung bekannt sein.

$$R_b^I = \begin{pmatrix} \cos z \cos a & -\sin a & \sin z \cos a \\ \cos z \sin a & \cos a & \sin z \sin a \\ -\sin z & 0 & \cos z \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Die drei Drehwinkel werden durch Zenitdistanz (z) und Azimut (a) beschrieben. Der dritte Drehwinkel wird ($r = 0$), da eine Drehung um die Sensorachse

keinen Einfluss auf die Berechnung hat. Bei vertikaler Aufstellung, werden die Drehwinkel Null und die die Rotationsmatrix vereinfacht sich zur Einheitsmatrix.

- **Lokales Horizontsystem → erdfestes Koordinatensystem**

Für die Berechnung der Coriolisbeschleunigung bedarf es einer Rotation um die y-Achse, da die geographische Länge λ auf die Berechnung der Coriolisbeschleunigung keinen Einfluss hat. Die vereinfachte Rotationsmatrix sieht wie folgt aus:

$$R_1^e = \begin{pmatrix} -\sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

2.5 Physikalische Einflussgrößen auf die Beschleunigungsmessung

Neben den sensorspezifischen Einflüssen (siehe Abschnitt 6.2) auf das Beschleunigungssignal gibt es auch physikalische Einflussgrößen, die stets auf das Signal wirken. Um diese berechnen zu können, muss das Beschleunigungssignal in das erdfeste Koordinatensystem transformiert werden.

Für die Wegbestimmung müssen die Beschleunigungen im erdfesten System betrachtet werden, um sie von den physikalischen Einflüssen (Gravitation, Coriolisbeschleunigung, Zentrifugalbeschleunigung) zu befreien. Die folgenden Gleichungen wurde von Neuhierl (2005, S. 41f) entnommen:

$$\ddot{\mathbf{r}}_e = \mathbf{R}_b^e \cdot \mathbf{a} - \mathbf{G}_e - \underbrace{\boldsymbol{\omega}_e \times (\boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{r}_e)}_{\mathbf{a}_z} - \underbrace{2\boldsymbol{\omega}_e \times \dot{\mathbf{r}}_e}_{\mathbf{a}_c} \quad (2.8)$$

- $\ddot{\mathbf{r}}_e$... Beschleunigung des Sensors im erdfesten System
- \mathbf{R}_b^e ... Rotationsmatrix laut Gleichung 2.5
- \mathbf{a} ... vom Sensor gemessene Beschleunigung
- \mathbf{G}_e ... Gravitationsbeschleunigung
- $\boldsymbol{\omega}_e$... Erddrehrate
- \mathbf{r}_e ... Positionsvektor im erdfesten System
- \mathbf{a}_z ... Zentrifugalbeschleunigung
- $\dot{\mathbf{r}}_e$... Geschwindigkeitsvektor des Sensors im erdfesten System
- \mathbf{a}_c ... Coriolisbeschleunigung

Die Zentrifugalbeschleunigung ist ortsabhängig und lässt sich nicht von der Gravitationsbeschleunigung unterscheiden, so kann man sie wie folgt mit der ortsabhängigen Gravitationsbeschleunigung zur Erdschwerebeschleunigung \mathbf{g}_e zusammengefasst werden (Tabatabaei, 2008, S. 19).

$$\mathbf{g}_e = \mathbf{G}_e + \boldsymbol{\omega}_e \times (\boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{r}_e) \quad (2.9)$$

Formel 2.8 vereinfacht sich damit zu:

$$\ddot{\mathbf{r}}_e = \mathbf{R}_b^e \cdot \mathbf{a} - \mathbf{g}_e - \mathbf{a}_c \quad (2.10)$$

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten mit Abschätzungen der Einwirkung auf das Beschleunigungssignal beschrieben. Da diese Beschleunigung nur in eine Richtung auftreten, wird auf die eindimensionale Betrachtung umgestiegen. Die Formeln wurden Tabatabaei (2008, S.27) entnommen.

- Die **Zentrifugaleschleunigung** wirkt senkrecht auf die Rotationsachse des rotierenden Systems (siehe Abbildung 4 links).

$$|a_z| = \omega_e^2 \cdot R \cdot \cos \varphi \quad (2.11)$$

$|a_z|$... Zentrifugalbeschleunigung
 R ... Erdradius

Der Einfluss der Zentrifugalbeschleunigung bei $\varphi = 47,07^\circ$ und $\omega_e = 7.2921 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ beträgt demnach $a_z = 23.1 \cdot 10^{-3} m/s^2$. Die Zentrifugalbeschleunigung wird innerhalb des Arbeitsbereichs als konstant angenommen und wird daher durch die Reduktion auf den Nullpunkt mitmodelliert (Tabatabaei, 2008, S. 27).

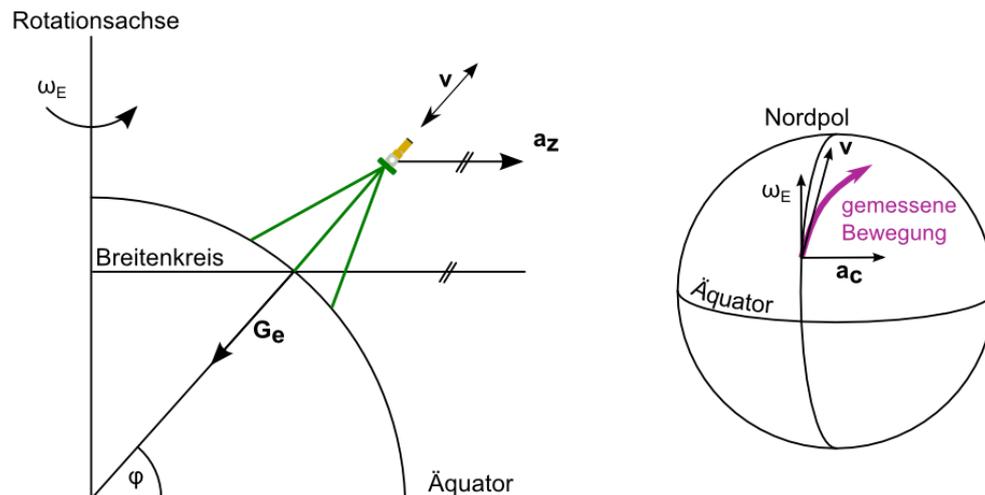


Abbildung 4: Prinzipskizze der Zentrifugalbeschleunigung (a_z) links, Coriolisbeschleunigung (a_c) rechts

- Die **Coriolisbeschleunigung** wirkt auf jeden Körper, dessen Bewegung in einem rotierenden Bezugssystem beschrieben wird. Die Richtung der Coriolisbeschleunigung ist senkrecht, sowohl zur Bewegungsrichtung des Körpers als auch zur Rotationsachse des Bezugssystems (siehe Abbildung 4 rechts), und wird mit folgender Formel beschrieben:

$$|a_c| = 2 \cdot \omega_e \cdot |v| \cdot \cos\varphi \quad (2.12)$$

$|a_c|$... Coriolisbeschleunigung
 v ... Geschwindigkeit der Bewegung
 φ ... geographische Breite

Der Einfluss der Coriolisbeschleunigung bei $\varphi = 47.07^\circ$ (für Graz) und einer Geschwindigkeit von $v = 3 \text{ m/s}$ bei einer Bewegung in West-Ost-Richtung ergibt $a_c = 3.1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$. Diese Störbeschleunigung bewirkt nach einer Minute bereits einen Distanzfehler von ca. 5 mm. Weitere Abschätzungen sind Tabelle 2 zu entnehmen.

3. Anforderungen an ein Messsystem

Um eine sinnvolle Überwachung von Gebäuden zu ermöglichen, müssen im Vorhinein die im Folgenden beschriebenen Messparameter (wie zB: Messfrequenz, Amplitude, Position und Ausrichtung) ermittelt werden. Diese sind abhängig von den zu ermittelnden Messgrößen sowie den Messgeräten. Da eine Anforderung an das Messsystem die Einsatzmöglichkeit im Freien ist, sollte es für Temperaturen zwischen -10°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ verwendbar sein.

3.1 Messfrequenz

Mit dem Messsystem müssen sehr niedrige Frequenzen messbar sein, da die Bewegungen von Bauwerken hauptsächlich in niederfrequenten Bereichen liegen. Als Beispiel werden in Tabelle 1 die Eigenfrequenzen ausgewählter Bauwerke angeführt.

Tabelle 1: Eigenfrequenzen [f] von ausgewählten Bauwerken

Bauwerk	f [Hz]	Quelle
Tacoma Narrow Bridge	0.2-1.0	http://www.cornelsen.de/physikextra/htdocs/Resonanz.html (4.August 2010)
Brücke Weil am Rhein	0.5-2.0	Mistler und Heiland, 2007
Reichsbrücke Wien	1.0-3.0	http://www.reichsbruecke.net/ergebnisse.php (1.Juli 2010)
Hangbrücke Schladming (aus SOFO-Sensoren ermittelt)	14.0-15.0	Gabriel und Stangl, 2008
Olympiaturm München	5.8	Wunderlich et al., 2004

Die Eigenfrequenzen von Gebäuden liegen typischerweise zwischen 10 und 30 Hz (Studer et al., 1997, S. 156). Gemessene Frequenzen über ca. 60 Hz sind auf impulsförmige Anregungen zurückzuführen. Da in der vorliegenden Arbeit die Gesamtauslenkung von Bauwerken untersucht werden soll, sind aber auch diese von Interesse.

Abbildung 5 veranschaulicht, dass Erschütterungen von 10 Hz bis 70 Hz bereits zu Schäden an Bauwerken jeglicher Art führen können. Neben den Eigenfrequenzen sollen vor allem diese Erschütterungen detektiert werden. In Mistler und Heiland (2008) wird empfohlen, Frequenzen bis zu 200 Hz aufzuzeichnen.

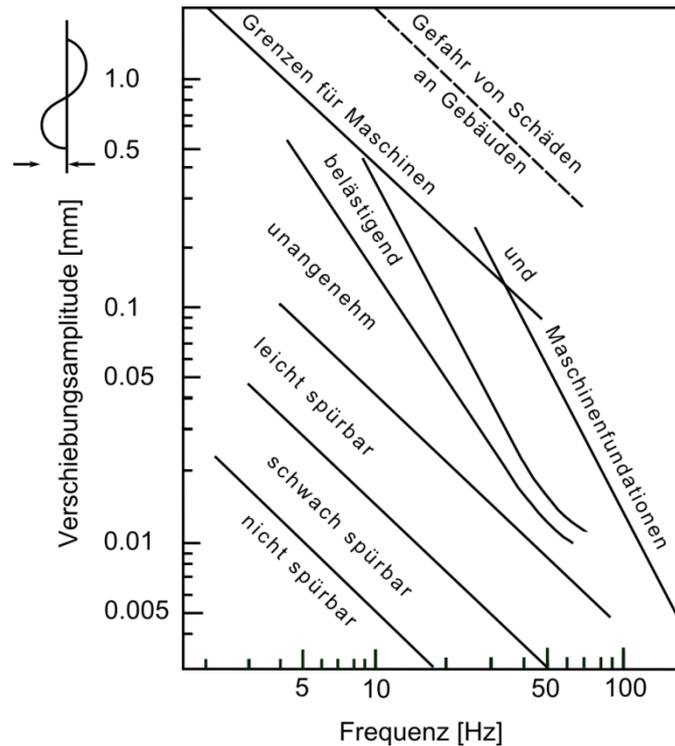


Abbildung 5: Allgemeine Grenzwerte der Wegamplitude für Erschütterungen (Richart et al., 1970)

3.2 Notwendiger Messbereich

Bei der dauerhaften Überwachung der Reichsbrücke Wien wurden maximale impulsartige Beschleunigungen von bis zu 3 m/s^2 bei U-Bahn-Überfahrten gemessen³. Vertikale Beschleunigungen $> 2.50 \text{ m/s}^2$ werden aber als „nicht akzeptabel“ eingestuft und verursachen üblicherweise in weiterer Folge eine Sperre der Brücke. Will man die Bewegungen einer Brücke mit einem Beschleunigungssensor detektieren, so soll er über einen Messbereich von etwa $\pm 5 \text{ m/s}^2$ verfügen (Mistler und Heiland, 2008).

3.3 Notwendige Genauigkeit

Die Wegbestimmung über die Doppelintegration eines Beschleunigungssignals verliert mit der Zeit an Genauigkeit, da sich Fehler quadratisch auswirken. Deshalb soll abgeschätzt werden, welche Genauigkeit vom Beschleunigungssignal gefordert wird. Die Wegbestimmung erfolgt mit:

³ <http://www.reichsbruecke.net/ergebniss.php> (1.7.2010)

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (3.1)$$

s ... Weg
 a ... Beschleunigung

Die gemessene Beschleunigung kann aufgrund von Sensoreffekten (Rauschen, Nullpunktverschiebung, Driften) oder der endlichen Auflösung des Messsystems vom richtigen Wert abweichen (Tabatabaei, 2008, S. 36).

$$\delta_a = a_g - a_w \quad (3.2)$$

δ_a ... Beschleunigungsfehler
 a_g ... gemessene Beschleunigung
 a_w ... richtige Beschleunigung

Der Beschleunigungsfehler setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen:

$$\delta_a = \delta_{a_B} + \delta_{a_R} + \delta_{a_{RF}} \quad (3.3)$$

δ_{a_B} ... Nullpunktverschiebung
 δ_{a_R} ... Rauschen
 $\delta_{a_{RF}}$... Restfehler

3.3.1 Nullpunktverschiebung

Da die Wegbestimmung bei einer falschen Wahl des Nullpunkts sehr ungenau wird, wird abgeschätzt, mit welcher Genauigkeit der Nullpunkt bestimmt werden soll. Der zeitabhängige Positionsfehler δ_{s_B} infolge der Nullpunktverschiebung δ_{a_B} ergibt sich aus (Tabatabaei, 2008, S. 36):

$$\delta_{s_B} = \frac{\delta_{a_B}}{2} \cdot t^2 \quad (3.4)$$

δ_{s_B} ... Auswirkung der Nullpunktverschiebung auf den Weg

In Abbildung 6 ist exemplarisch für $0 \leq t \leq 60$ die Auswirkung dargestellt. Man kann gut erkennen, dass sich die Genauigkeit quadratisch verschlechtert. Die Berechnung wurde mit $\delta_{a_B} = 0.01 \text{ mm/s}^2$ durchgeführt. Dies entspricht der Herstellerangabe für die Genauigkeit des Beschleunigungssensors (Honeywell, 2005). Der Fehler der Positionsbestimmung hat sich nach 60 Sekunden auf 18 mm akkumuliert.

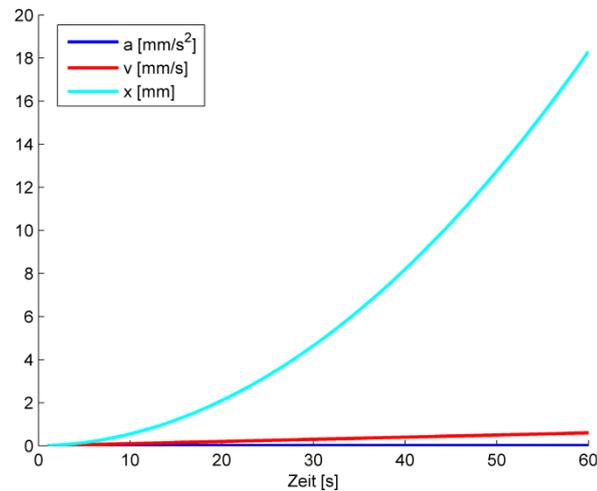


Abbildung 6: Auswirkung von $\delta_{ab} = 0.01 \text{ mm/s}^2$ auf Geschwindigkeit und Weg

Dies zeigt, dass die Wegbestimmung bei falsch geschätztem Nullpunkt, vor allem über längere Zeiträume, sehr ungenau wird. Daher soll die Wahl des Nullpunkts genauer beachtet werden, da dieser möglicherweise durch Driften des Beschleunigungssignals nicht konstant ist (siehe Abschnitt 8.2.3).

3.3.2 Messrauschen

Durch die Doppelintegration des Messrauschens entsteht ein „Random-Walk-Prozess“ zweiter Ordnung. Da das Messrauschen nicht eliminiert werden kann, entsteht dadurch eine Beeinflussung des gemessenen Wegs. Um diesen Fehlereinfluss abschätzen zu können, muss das Rauschen zweimal integriert werden. Da dieser Fehlereinfluss nicht konstant ist, wird durch die folgende Näherungsformel (Woodmann, 2003, S. 15f) der Einfluss des Messrauschens auf den Weg bestimmt:

$$\delta_s \approx \delta_{ab} \cdot t^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{\delta t}{3}} \quad (3.5)$$

- δ_s ... Genauigkeit der Wegbestimmung
- δ_{ab} ... Messrauschen
- t ... Messdauer
- δt ... Messfrequenz

In Abbildung 7 wird die Auswirkung des Rauschens grafisch dargestellt. Die Genauigkeit δ_s steigt durch Variation der Messdauer t bzw. des Messrauschens δ_{aR} .

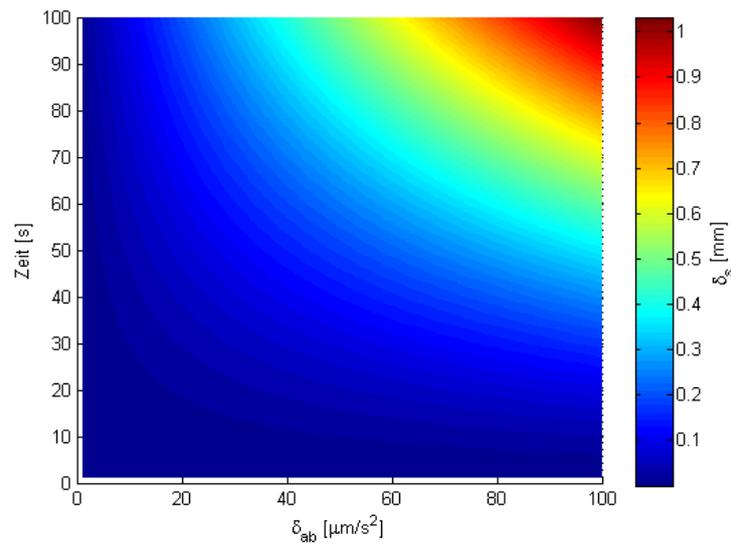


Abbildung 7: Auswirkung von δ_{ab} und der Messdauer t auf den Weg δ_s

Bei der erwarteten Messgenauigkeit von $70 \mu\text{m/s}^2$ (siehe Abschnitt 4.1.1) ist nach 100 s mit einem Offset der Position von 0.7 mm zu rechnen.

3.4 Position und Ausrichtung

Für die Berechnung der Korrekturwerte für die Coriolisbeschleunigung ist es notwendig, die Position und die Ausrichtung des Sensors im Raum zu kennen. Die Fehlereinflüsse der Eingangsgrößen auf die Genauigkeit der Coriolisbeschleunigung ist Anhang B zu entnehmen.

Die Varianzfortpflanzung wurde für mehrere Szenarien durchgerechnet. Als Aufstellungsort wurde das Geodäsiegebäude (Graz, Steyrergasse 30, $\varphi = 47^\circ 3' 51''$) gewählt. Die Parameter geographische Breite φ , Zenitdistanz Z und Azimut A sollen für diese Berechnungen nur grob bekannt sein. Die geographische Breite soll durch Ablesen einer Karte bzw. durch einen GPS-Empfänger bestimmt werden. Es wird angenommen, dass durch diese Methoden eine Genauigkeit von $\sigma_\varphi = 1''$ realistisch ist. Der Sensor wird auf einem Untersatz horizontaliert. Da über den genauen Aufbau des Sensors nichts bekannt ist, wird angenommen, dass die Messachse auf $\sigma_Z = 2^\circ$ genau bestimmbar ist. Für das Azimut soll die Bestimmung mit einem Kompass erfolgen. Auch dessen Genauigkeit wird mit $\sigma_A = 2^\circ$ angenommen. Die Geschwindigkeit v wird durch die Integration der Beschleunigung berechnet und wird mit einer Genauigkeit von $\sigma_v = 1 \text{ mm/s}$ angenommen. Die Grenzgeschwindigkeit der Bewegung wird beliebig mit 1 m/s angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Für Szenario 1 und 2 wurde eine horizontale Montage des Sensors mit einer Nord-Süd Ausrichtung gewählt. Für Szenario 3 und 4 eine Ost-West Ausrichtung. Bei den Szenarien 5 und 6 wurde eine vertikale Montage angenommen.

Tabelle 2: Einfluss von Position (φ), Orientierung (A, Z), Geschwindigkeit (v), sowie deren Genauigkeiten ($\sigma_\varphi, \sigma_A, \sigma_Z, \sigma_v$) auf die Coriolisbeschleunigung (a_c) und deren Genauigkeit (σ_{ac})

Szenario	1	2	3	4	5	6
Z [°]	90		90		0	
A [°]	0		90		0	
v [m/s]	0.1	1	0.1	1	0.1	1
a_c [m/s ²]	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}
σ_{ac} [m/s ²]	$2 \cdot 10^{-10}$	$5.3 \cdot 10^{-8}$	$5.3 \cdot 10^{-9}$	$5.3 \cdot 10^{-8}$	$3.9 \cdot 10^{-9}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$

Diese Extremfälle zeigen, dass es auf alle Fälle ausreichend ist, die externen Messgrößen mit oben angegebenen Genauigkeiten zu bestimmen, da die Genauigkeit des Sensors hundert mal schlechter ist, als der Einfluss der Coriolisbeschleunigung.

3.5 Resümee

Das Messsystem soll relativ niedrige Frequenzen bis 200 Hz aufzeichnen können und über einen Messbereich von $\pm 5 \text{ m/s}^2$ verfügen. Die geographische Breite kann aus einer Karte abgelesen oder durch GPS bestimmt werden ($\pm 30 \text{ m}$). Die Ausrichtung des Sensors ist auf $\pm 2^\circ$ zu erfolgen.

Die Nullpunktverschiebung und das Messrauschens haben großen Einfluss auf die Positionsbestimmung und sind im Folgenden genauer zu untersuchen.

4. Aufbau des Messsystems

In

Abbildung 8 ist der schematische Aufbau des Messsystems dargestellt. Für die Beschleunigungsmessung steht der Sensor Q-Flex QA 1400 der Firma Honeywell zur Verfügung. Dieser Sensor wurde von Herrn DI R. Presl in ein Gehäuse eingebaut, um die gleichmäßige Lagerung des Sensors zu gewährleisten und repräsentative Wiederholungsmessungen zu ermöglichen (siehe Abbildung 9). Das Signal vom Sensor wird über zwei Lastwiderstände von [mA] in [V] umgewandelt, um es mit einem 24bit A/D-Wandler der Firma National Instruments aufzeichnen zu können. Diese Daten werden mit der Software (siehe Abschnitt 4.2) erfasst und wahlweise in einer .txt-Datei oder direkt als Matlab-Datei gespeichert, welche große Vorteile beim Einlesen der Daten hat.

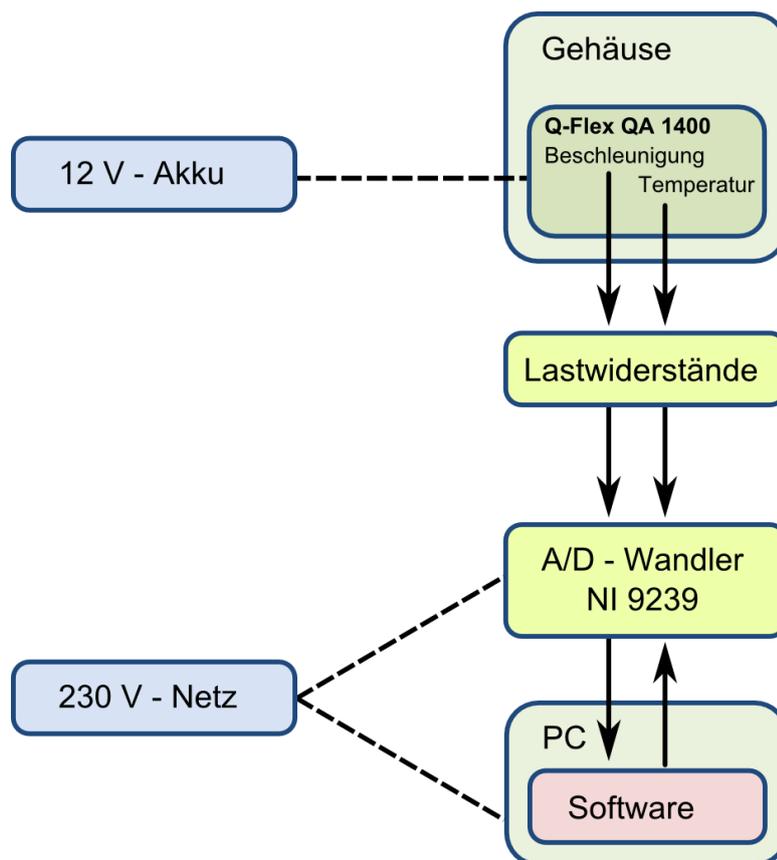


Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Messsystems

4.1 Hardware

4.1.1 Beschleunigungssensor Q-Flex QA 1400

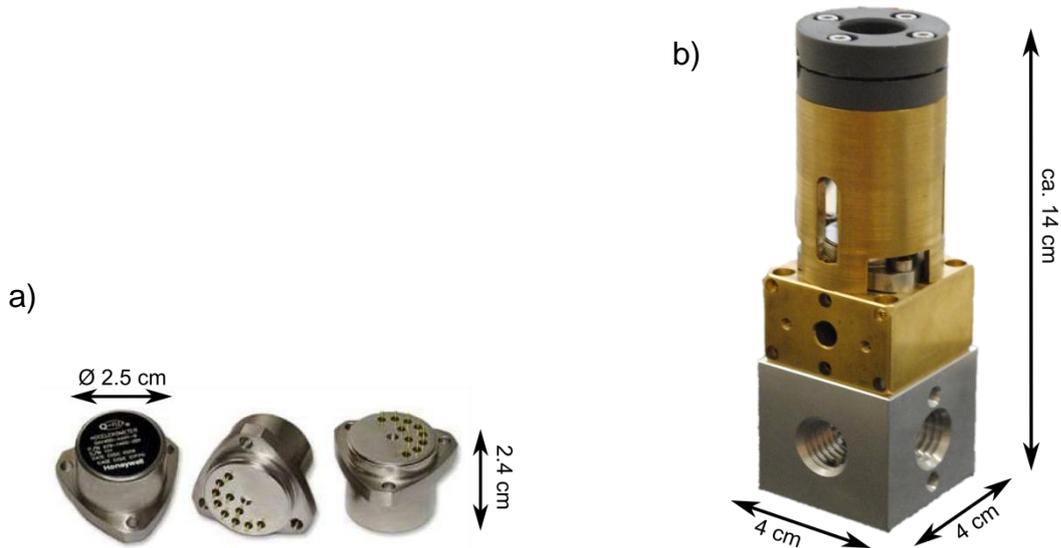


Abbildung 9: Q-Flex QA 1400 a) Systembild (Quelle: Honeywell), b) verbaut in Gehäuse mit Montageklotz

Dieser Beschleunigungssensor ist ein einachsiger Aufnehmer der Firma Honeywell. Er eignet sich nicht nur zum Messen von Beschleunigungen, sondern ist auch für die Doppelintegration der Messdaten, also der relativen Wegbestimmung einsetzbar. Die Quarz-Prüfmassenstruktur garantiert Langzeitstabilität der Berechnungsparameter (Honeywell, 2005).

Die Spezifikationen des Sensors variieren von Datenblatt zu Datenblatt (Presl, 2009). So wird dem Sensor laut Datenblatt (Honeywell, 2005 / Anhang G) ein Messbereich von $\pm 60 \text{ g}$ bescheinigt. Die Europavertretung MWS Sensorik (MWS 2003 / Anhang G) bescheinigt dem Sensor aber lediglich einen Messbereich von $\pm 25 \text{ g}$. Auch bei anderen Spezifikationen variieren die Angaben. Als Richtwerte werden die Sensorspezifikationen der Firma Honeywell in Tabelle 3 aufgelistet. Die Parameter werden im Zuge dieser Arbeit teilweise noch überprüft bzw. nicht bis zu den Maximalangaben ausgereizt. Da der Sensor selbst über keine geeignete Vorrichtung für eine stabile Montage verfügt, wurde im Vorfeld dieser Arbeit für den Sensor ein Gehäuse gebaut, welches gleichzeitig eine Zugentlastung für die Kabel des Sensors darstellt (siehe Abbildung 9b). Dieses Gehäuse ist auf einen Würfel montiert, der von allen Seiten auf eine Herzschraube befestigt werden kann.

Tabelle 3: Sensorspezifikationen (Honeywell, 2005)

Parameter	Werte
Messbereich	± 60 g
Bias	<5-10 mg
1-Jahr-Wiederholgenauigkeit	<1 mg
Temperaturempfindlichkeit	<0.09 mg/°C
Skalierungsfaktor	1.20-1.46 mA/g
Ausrichtungsfehler der Achse	<7 mrad
Rauschverhalten - STD:	
0-10Hz	<7 μ g
10-500Hz	<70 μ g
500-10000Hz	<1500 μ g
Arbeitstemperatur	-55 - +95 °C
Shock	250 g
Auflösung	<1 μ g

4.1.2 Umwandler

Da für die Digitalisierung das Signal in Volt vorliegen muss (siehe Abschnitt 4.1.3), ist es notwendig, eine Umwandlung des Signals von Ampere in Volt durchzuführen. Dafür wurde von Herrn Ing. Lummerstorfer eine Box gebaut (siehe Abbildung 10), in der Lastwiderstände (elektrische Bürden) der Firma Powertron eingebaut sind (Presl, 2009). Lastwiderstände sind ein wesentlicher Bestandteil des Messsystems, da die Umwandlung im Normalfall nicht linear ist. Hochwertige Bürden haben eine sehr geringe Toleranz und werden daher in diesem System verwendet. Weiters erfolgt über diese Box die 12V-Stromversorgung des Sensors.

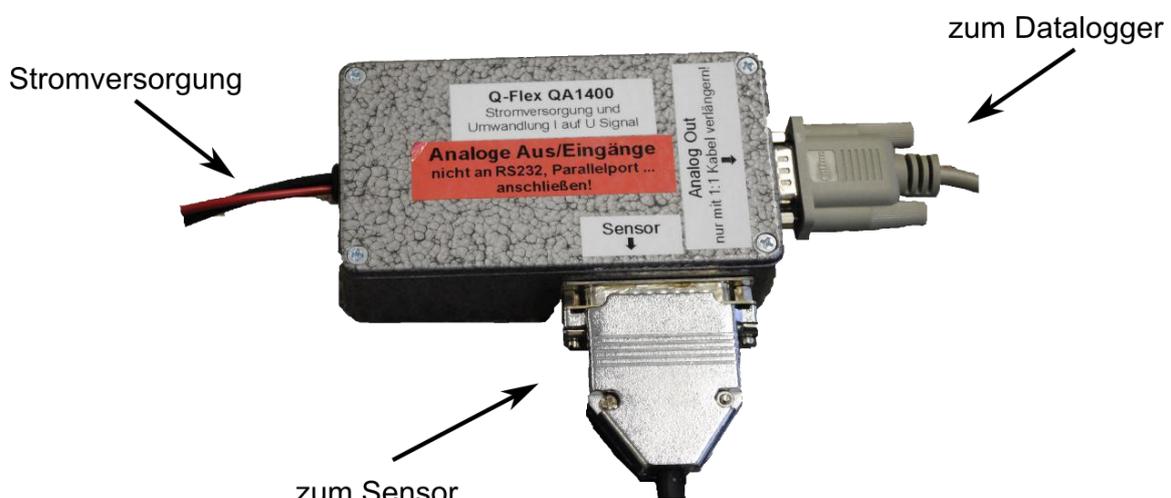


Abbildung 10: Umwandler in Gehäuse verbaut

4.1.3 A/D-Wandler NI9239



Abbildung 11: A/D-Wandler NI 9239 (Quelle: National Instruments)

Vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme wurde speziell für Messungen mit dem Q-Flex QA 1400 ein 24bit A/D-Wandler der Firma National Instruments angeschafft (siehe Tabelle 4). Der A/D-Wandler verfügt über vier simultane Kanäle, von denen ein Kanal mit der Beschleunigungsmessung und ein zweiter Kanal mit der Temperatureaufzeichnung des Sensors belegt ist. Die Aufzeichnungsrate des Sensors liegt zwischen 1612.9 Hz und 50 kHz (siehe Formel 4.1).

Tabelle 4: Sensorspezifikationen (National Instruments, 2010)

Parameter	Werte
Kanäle	4
Auflösung	24bit
Rauschverhalten - STD	70 μ V
Temperaturempfindlichkeit	± 5 ppm/ $^{\circ}$ C
Offset drift	$\pm 150 \mu$ V/ $^{\circ}$ C
Arbeitstemperatur	-40 - +70 $^{\circ}$ C

Da dieses Gerät zuvor noch nicht intensiv verwendet wurde und das Zusammenspiel mit der Software unbekannt war, wurden Systemtests (siehe Abschnitt 6.1) durchgeführt.

4.2 Software

Das in LABVIEW vorliegende Programm ermöglicht dem Benutzer die Visualisierung der Messdaten während der Messung sowie das Verspeichern der Werte. Details zu dieser Software können der Softwaredokumentaion (Presl, 2010) entnommen werden. In Abbildung 12 sieht man einen Screenshot des Programms (Startfenster).

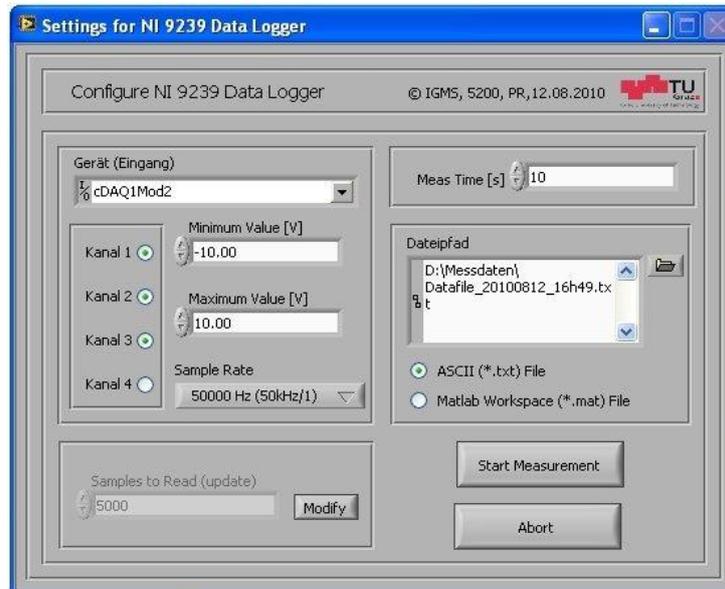


Abbildung 12: Screenshot Messsoftware (Presl,2010)

Der Benutzer kann hier folgende Aufzeichnungsparameter variieren:

- **Dateiformat:** Der Benutzer hat die Möglichkeit, zwischen ASCII-Datei und MATLAB-Datei zu wählen. Der Vorteil der MATLAB-Dateien besteht in seiner Einfachheit, da für den Datenimport keine Einleseroutine notwendig ist. Alle Parameter werden automatisch in Variablen abgelegt, in der ASCII-Datei in einem 9-zeiligen Header am Beginn des Messfiles. Durch ein spezielles Ver-
speicherungsverfahren ist es möglich, Messungen durchzuführen, deren Messdatengröße über den verfügbaren Arbeitsspeicher hinausgeht.
- **Sampling Rate:** Die Sampling Rate variiert von 1612.9 Hz(min.) bis 50 kHz (max.) und wird mit folgender Formel berechnet:

$$f_s = \frac{50 \text{ kS/s}}{n} \text{ mit } n = 1 \dots 31 \quad (4.1)$$

Daraus resultieren 31 mögliche Messfrequenzen. Allerdings wurden im Zuge der gesamten Arbeit lediglich drei verschiedene Frequenzen verwendet. Für die Messfrequenzen werden im Folgenden Kürzel verwendet (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5: Auflistung der Kürzel der verwendeten Messfrequenzen (f_s),
und der im folgenden verkürzten Bezeichnungen (Bez.)**

Kürzel	f_s [Hz]	Bez.
MF I	1612.9	1.6 kHz
MF II	3125.0	3.1 kHz
MF III	50000.0	50 kHz

- **Aufzeichnungsdauer:** Die Messdauer in Sekunden.
- **Samples to Read:** Hier kann man dem Programm vorgeben, wieviele Datensätze ein Datenpaket umfassen soll. Die Wahl des Datenpaketes ist wichtig, da man damit einerseits die Anzahl der Messwerte, die gleichzeitig während der Messung dargestellt werden können, und andererseits die Anzahl der ständig im Arbeitsspeicher verweilenden Datensätze variieren kann.
- **Kanäle:** Es können ein bis vier Kanäle des A/D-Wandlers simultan mit bis zu 50 kHz ausgelesen werden.

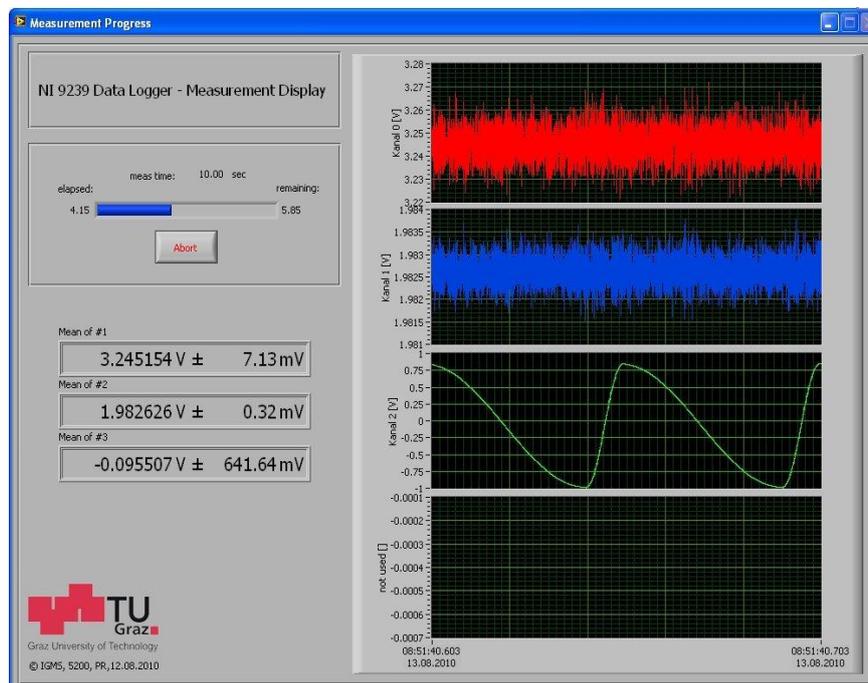


Abbildung 13: Screenshot während Messung (Presl,2010)

In Abbildung 13 sieht man einen Screenshot, der während einer Messung gemacht wurde. Neben der noch verbleibenden Messzeit werden auch die aktuellen Messwerte angezeigt. Die Anzahl der angezeigten Messwerte entsprechen den „Samples to Read“. Die Quickview-Werte auf der linken Seite sind ein Mittelwert mit Standardabweichung aus jeweils einem Datenpaket.

5. Datenprozessierung

5.1 Filterung

Da der Sensor ab ca. 500 Hz sehr starke Rauschamplituden aufweist (siehe Abschnitt 6.2.2), müssen diese Störsignale von den Nutzsignalen getrennt werden. Da Gebäudebewegungen im niederfrequenten Bereich erfolgen, wird ein Low-Pass-Filter mit einer Grenzfrequenz $F_{pass} = 300 \text{ Hz}$ und einem Übergangsbereich bis $F_{stop} = 330 \text{ Hz}$ verwendet (siehe Abbildung 14).

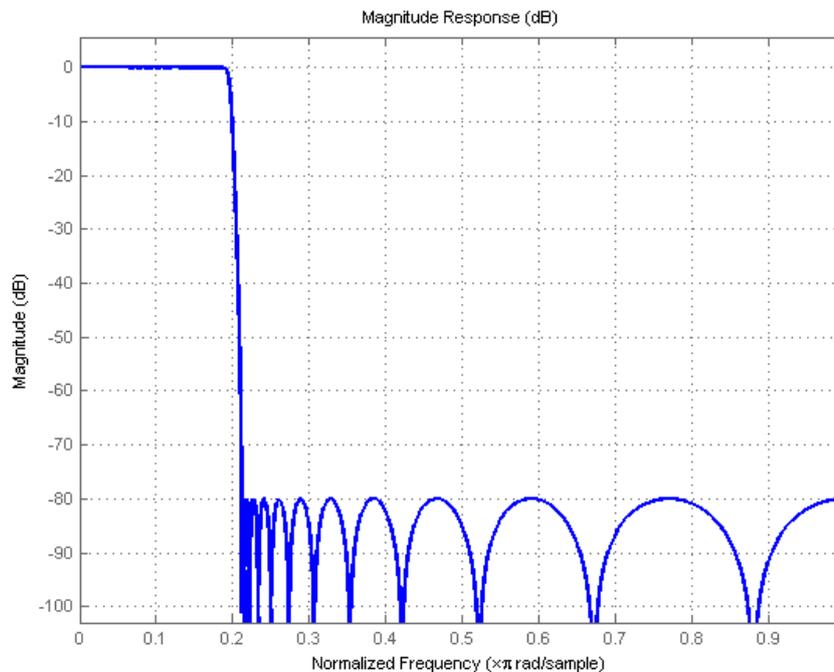


Abbildung 14; Chebyshev-II-Filter

Es wurde ein Chebyshev-II-Filter gewählt. Dieser erhält im Durchlassbereich die Daten beinahe unverfälscht $A_{pass} = 1 \text{ dB}$. Dies ermöglicht ein Betrachten der gewünschten Frequenzen bis 300 Hz. Die Dämpfung des Filters beträgt $A_{stop} = 80 \text{ dB}$, mit einer leichten Welligkeit im Sperrbereich.

5.2 Wegbestimmung durch Doppelintegration

Der zurückgelegte Weg wird durch eine zweifache Integration der Beschleunigungswerte bestimmt. Wie bei jeder Integration müssen auch hier Anfangswertprobleme (Integrationskonstante) gelöst werden. Liegt zum Start der Messung neben einer Beschleunigung auch eine Geschwindigkeit vor, muss diese berücksichtigt werden, da sie sich wie ein Nullpunktfehler auf das Ergebnis auswirkt (siehe Abschnitt 3.3.1).

Die Berechnung erfolgt über diskrete Messwerte. Wenn es nicht möglich ist ein Integral geschlossen zu lösen bzw. wenn diskrete Messwerte vorliegen, kommen die Verfahren der Numerischen Integration (Bartsch, 2001, S. 423ff) in Verwendung. Die Genauigkeit dieser Verfahren ist abhängig von der Anzahl der Stützstellen und somit von der Abtastrate dt . Da mit einer Frequenz von 3.1 kHz aufgezeichnet wird, erhält man eine Abtastrate von $dt = 1/3125$. Diese Abtastrate geht bereits bei der Trapezformel mit der dritten Potenz in den Restfehler δI ein. Es kann also bereits bei der Trapezregel eine hohe Genauigkeit mit gleichzeitig geringem Rechenaufwand erzielt werden.

In Abbildung 15 sieht man die zweifache Anwendung der Trapezformel. Dabei wird die Beschleunigung mit einer Grenzfrequenz von 300 Hz rot, die Geschwindigkeit die nach einfacher Integration bestimmt wird grün und der zurückgelegte Weg blau dargestellt.

Hierbei soll die Funktionsweise des Algorithmus, bei dem keine Stützungsverfahren angewendet wurden, veranschaulicht werden. Es handelt sich hier um Messungen mit dem Vertikalkomparator.

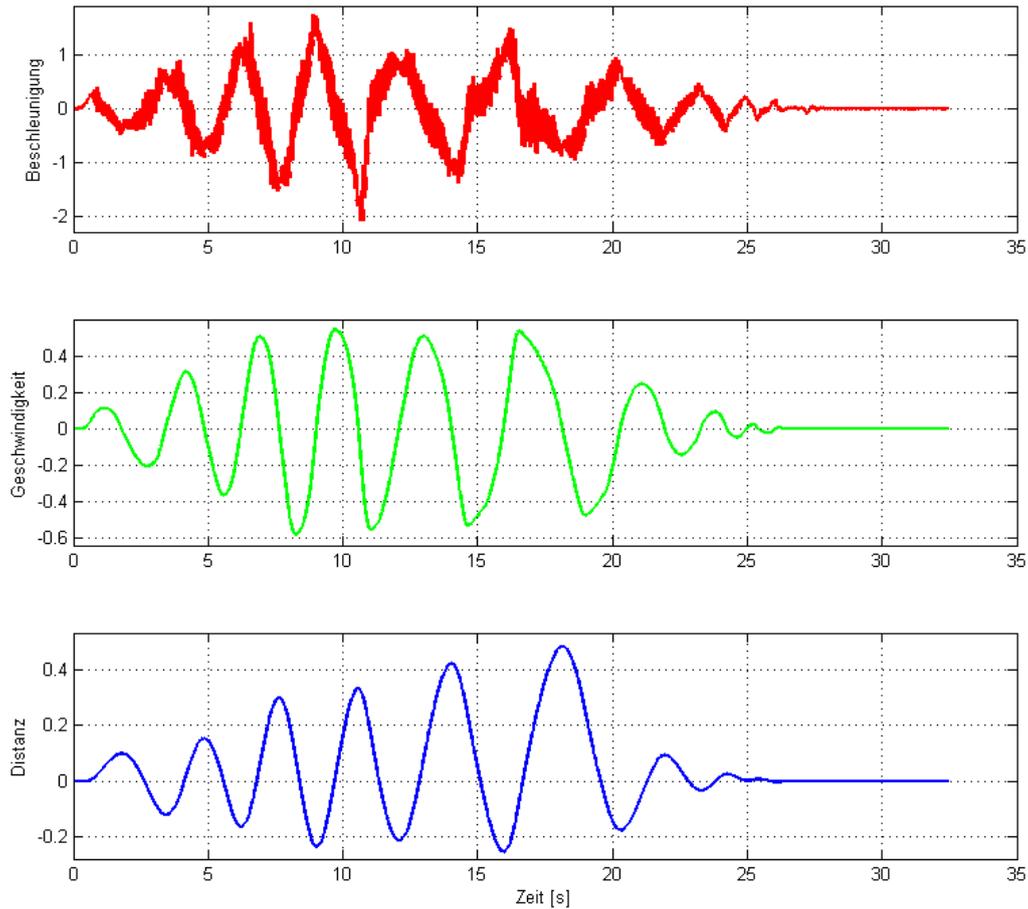


Abbildung 15: Doppelintegration der Beschleunigungsdaten, anhand von Beispieldaten a) Beschleunigung [m/s^2] b) Geschwindigkeit [m/s] c) Weg [m]

5.3 Datenfluss

Hier soll gezeigt werden, welche Schritte nötig sind, um vom gemessenen Signal auf den zurückgelegten Weg schließen zu können. Der Datenfluss ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt.

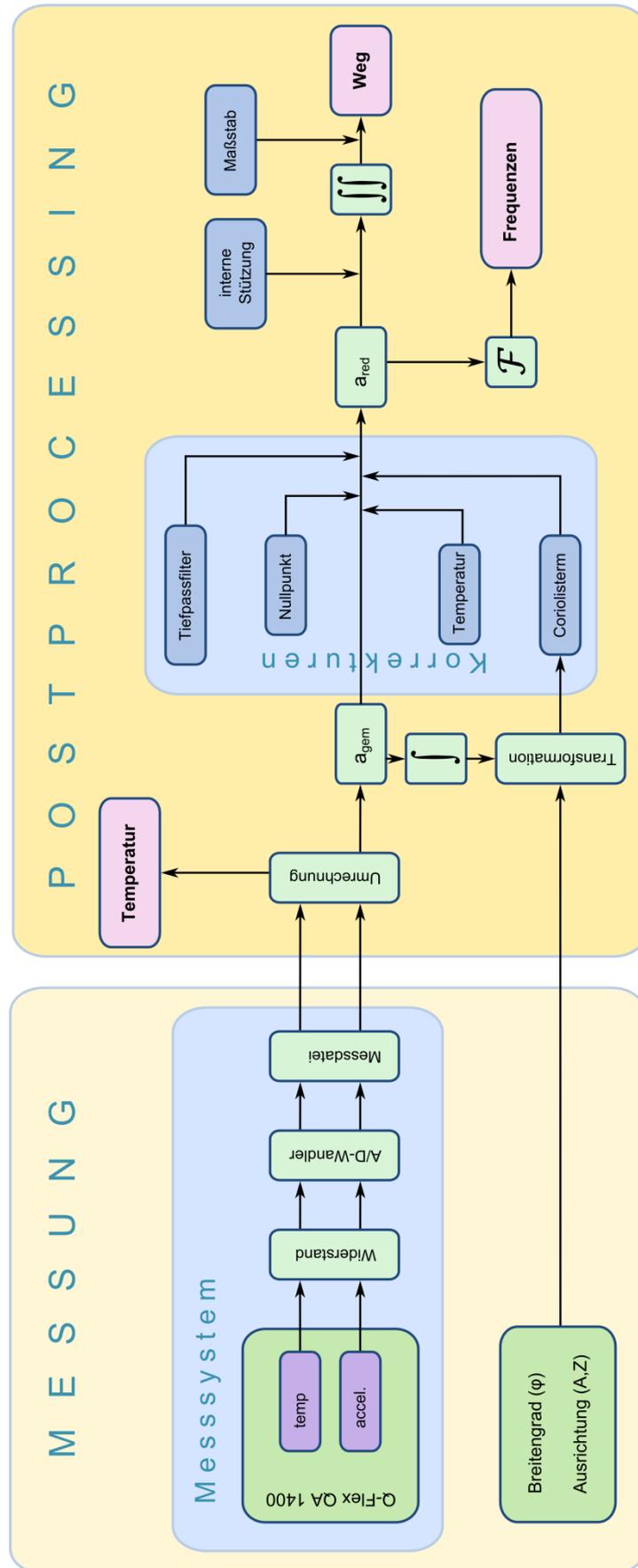


Abbildung 16: Datenfluss Q-Flex QA 1400 – Temperatur / Weg / Eigenfrequenz

Die Beschleunigung und die Temperatur, gemessen von Q-Flex QA 1400, werden vom A/D-Wandler mit der gewünschten Messfrequenz abgetastet und von der Software gespeichert. Die Auswertung der Daten passiert im postprocessing. Position und Ausrichtung müssen extern bestimmt werden (siehe Abschnitt 3.4).

Die Signale des Beschleunigungssensors werden in Ampere [A] ausgegeben und müssen für den A/D-Wandler in Volt [V] umgewandelt werden. Dies erfolgt mit elektrischen Bürden. Da die gemessenen Größen allerdings bei den weiteren Berechnungen in Ampere eingeführt werden, erfolgt die Rückrechnung mit folgenden Gleichungen:

$$a_V = a_A / 2500 \quad (5.1)$$

a_V ... Beschleunigung [V]
 a_A ... Beschleunigung [A]

$$T_V = T_A / 6800 \quad (5.2)$$

T_V ... Temperatur [V]
 T_A ... Temperatur [A]

Die folgenden Formeln vom Hersteller (Q-Flex Specification Sheet, 1999, S.13) dienen der Umrechnung des Signals in [m/s²] bzw. [°C]. Danach wird ein temperaturabhängiger „Scale Factor“ und „Bias“ bestimmt:

$$SF = c_0 + c_1 \cdot T_A + c_2 \cdot T_A^2 + c_3 \cdot T_A^3 + c_4 \cdot T_A^4 \quad (5.3)$$

SF ... Scale Factor

$$B = b_0 + b_1 \cdot T_A + b_2 \cdot T_A^2 + b_3 \cdot T_A^3 + b_4 \cdot T_A^4 \quad (5.4)$$

B ... Bias

Die Koeffizienten für diese Berechnungen sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Koeffizienten [K] für die Umrechnung des Messsignals (MWS, 2003, S. 6)

K	Wert	K	Wert
c ₀	1.303694	b ₀	-1838
c ₁	66.17·10 ⁻⁶	b ₁	1.48
c ₂	671.7·10 ⁻⁹	b ₂	4.9·10 ⁻⁶
c ₃	-2834·10 ⁻¹²	b ₃	20·10 ⁻⁶
c ₄	712·10 ⁻¹⁴	b ₄	232·10 ⁻⁸

In der Umrechnung erfolgt bereits eine Temperaturanpassung. Mit dem „Scale Factor“ und dem „Bias“ kann nun die Beschleunigung mit folgender Formel berechnet werden:

$$g_b = \frac{a_A}{SF} + \text{BIAS} \cdot 10^{-6} \quad (5.5)$$

g_b ... berechnete Beschleunigung in [g]

Man erhält die Beschleunigung als Vielfaches der Beschleunigungskonstanten von Redmond, USA (g_{RED}) und muss durch diese Konstante dividieren, um die gemessene Beschleunigung (g_{gem}) in [m/s^2] zu erhalten:

$$a_{\text{ber}} = \frac{g_b}{g_{\text{RED}}} \quad (5.6)$$

a_{ber} ... berechnete Beschleunigung [m/s^2]
g_{RED} ... 9.80708 m/s² (Q-Flex SpecificationSheet, 1999, S. 10)

Weiters muss das Signal um Nullpunkt- und Temperaturfaktor korrigiert werden (Abschnitt 6.2.6). Danach müssen die Daten gefiltert werden, um das Nutzsignal vom Störsignal zu trennen (Abschnitt 5.1). Für die Korrektur der Coriolisbeschleunigung (Abschnitt 2.5) muss das Signal in das erdfeste Koordinatensystem transformiert werden (Abschnitt 2.4.2). Um eventuell auftretende Driften vom Signal zu entfernen, wird ein Hochpassfilter mit sehr geringer Grenzfrequenz (Abschnitt 8.2.3) eingesetzt.

Die nun vorliegenden Beschleunigungssignale wurden reduziert und von Fehlereinflüssen befreit. Nun wird die Analyse im Frequenzbereich, also die Bestimmung der Grundfrequenzen (Anhang A) durchgeführt. Nach der Doppelintegration der Messdaten wird der zurückgelegte Weg [m] des Sensors berechnet, der noch um einen Maßstabsfaktor (siehe Abschnitt 7.2) korrigiert werden muss.

6. Untersuchungen des Messsystems

6.1 Untersuchung des A/D-Wandlers NI 9239

Da bei früheren Messungen mit dem Beschleunigungssensor Q-Flex QA 1400 am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme festgestellt wurde, dass für präzise Messungen der vorhandene A/D-Wandler keine zufriedenstellende Auflösung bietet (Presl, 2005), wurde ein 24bit A/D-Wandler angeschafft. Da damit kaum Erfahrungen vorliegen, wird er im Zuge dieser Arbeit genauer untersucht. Es war unbekannt, ob auch dieser A/D-Wandler (ähnlich wie Spider8) die Daten bei unterschiedlichen Messfrequenzen vormittelt und daher ein Zugriff auf die reinen Rohdaten nicht möglich ist. Außerdem wird das Zusammenspiel der für diese Masterarbeit entwickelten Messsoftware (Presl, 2010) und des A/D-Wandlers untersucht.

Die folgenden Experimente wurden im Labor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme durchgeführt. Der Aufbau des Messsystems wurde während der Experimente nicht verändert und wird in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

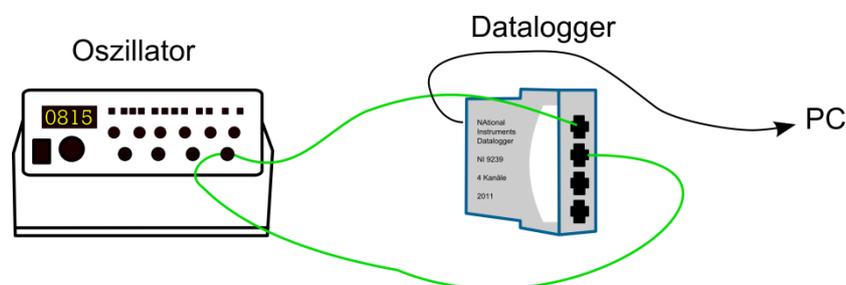


Abbildung 17: Schematischer Aufbau des Messsystems während der Untersuchung des A/D-Wandlers NI9239

6.1.1 Rauschmessungen

Für alle verfügbaren Frequenzen wird eine Rauschmessung mit einer Dauer von 40 Sekunden durchgeführt. Die genauen Parameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Messparameter Rauschmessung 2010/08/02

Messparameter	Rauschmessungen
Einschalten des Messsystem	2010/08/01 ca 18h00
Messbeginn	2010/08/02 06h17
Messfrequenz	1-31
Messdauer	je 40 s
Kanal 1	Oszillator angesteckt und ausgeschaltet
Kanal 2	Oszillator angesteckt und ausgeschaltet
Kanal 3	N/A
Kanal 4	N/A

Abbildung 18 zeigt, dass die Genauigkeit der Messungen stark von der gewählten Messfrequenz abhängt. Bei den für dieses Projekt verwendeten Frequenzen (1.6 kHz und 3.1 kHz, siehe Tabelle 5) kann keine Veränderung der Genauigkeit des Messsignals festgestellt werden. Aber auch die größte Standardabweichung bei MF III (50 kHz) liegt noch unter der Herstellerangabe von 70 μV .

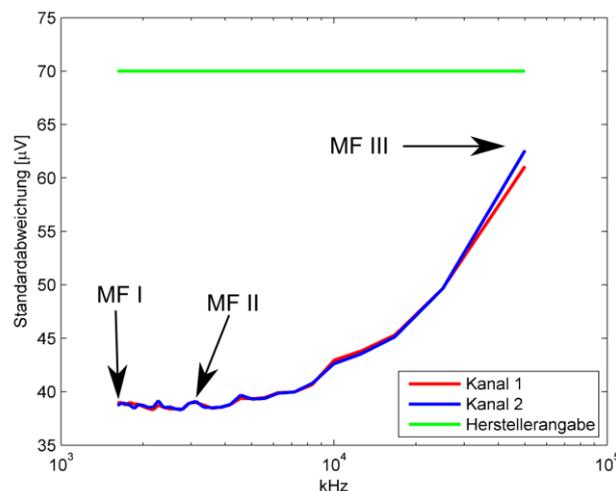


Abbildung 18: Rauschmessung bei allen 31 verfügbaren Messfrequenzen (siehe Gleichung 4.1)

Die Tests haben ergeben, dass die Messgenauigkeit fast doppelt so gut wie die Herstellerangabe ist. Es muss hier allerdings angemerkt werden, dass die Versuche unter konstanten Laborbedingungen durchgeführt wurden.

6.1.2 Mögliches Auftreten von Phasensprüngen

Wegen vermuteter „Zeitlöcher“ bei der Speicherung der Messdaten werden die Daten des A/D-Wandlers auf Phasensprünge untersucht. Da diese im Rauschen der Messdaten unter Umständen nicht erkennbar sind, wird diese Untersuchung mit ei-

nem bekannten Sinussignal durchgeführt. Dieses wird mit dem Oszillator generiert und über den A/D-Wandler aufgezeichnet. Beim ersten Test werden die „Samples to Read“ variiert, da ein Zusammenhang zwischen der Menge der gleichzeitig gespeicherten Werte und etwaiger Datenlücken vermutet wird. Die Parameter des Tests sind in Tabelle 8 aufgelistet. Das Messsystem wurde während der Messungen nicht verändert.

Tabelle 8: Messparameter der Tests zu Phasensprünge

Messparameter	Test 1	Test 2
Einschalten Messsystem	2010/07/19 ca 09h13	2010/07/26 ca 06h00
Messbeginn	2010/07/19 11h04	2010/07/26 10h38
Messfrequenz	25 kHz	25 kHz
Samples to Read	100.000 / 50.000 / 25.000 / 1.000 / 240	1.000
Messdauer	je 180 s	180 s
Kanal 1	Oszillator Sinus 104 Hz	Oszillator Sinus (6 ±1 Hz)
Kanal 2	Oszillator Sinus 104 Hz	N/A
Kanal 3	N/A	N/A
Kanal 4	N/A	N/A

Bei der Auswertung werden die Nulldurchgänge des Sinussignals erfasst und die Abstände (in Datenpunkten) gespeichert. Um dieses Resultat besser analysieren zu können, wird die Differenz der aufeinanderfolgenden Nulldurchgänge gebildet, also die Dauer einer Sinusperiode bestimmt. Weicht eine Periodendauer von der mittleren Periodendauer ab, wird angenommen, dass an dieser Stelle eine Datenlücke produziert wurde.

Tabelle 9: Ergebnis Test 1, Anzahl der Phasensprünge [PS], mit variierenden "Samples to read" [StR]

Messbeginn	StR	PS Kanal 1	PS Kanal 2
11h04	100.000	0	0
11h09	50.000	0	0
11h15	25.000	0	0
11h20	1.000	0	0
11h27	240	0	0

Da nun vermutet wird, dass womöglich ganze Sinusperioden vom A/D-Wandler verschluckt werden, und daher bei Test 1 entstandene Datenlücken nicht entdeckt werden, wird ein zweiter Test durchgeführt, bei dem die Periodenlängen des Sinussignals variiert werden. Es werden wieder die Nulldurchgänge gesucht und die Differenzen zwischen den Nulldurchgängen gebildet. Als Ergebnis erhält man ein „Sinussignal“, welche das „Sweepen“ des Eingangssignals darstellt. Wiederholt man den vor-

herigen Schritt (die Differenzbildung der Nulldurchgänge), sollten nun Ausreißer detektiert werden können. Da dies nicht der Fall ist, wird angenommen, dass die vom A/D-Wandler aufgezeichneten Messdaten keinen Phasensprüngen unterliegen und somit keine Messdaten verloren gehen.

6.1.3 Mögliche Mittelung

Es sind keine Angaben vorhanden, ob der A/D-Wandler bei einer geringeren Aufzeichnungsrate als der Maximalfrequenz die Daten vorprozessiert und somit eine Mittelwertbildung stattfindet. Dies ist über die Glättung des Signals erkennbar, da die Standardabweichung kleiner wird. Daher wird ein weiteres Experiment durchgeführt. Hierfür wird eine konstante Datenmenge gemessen, erreicht über einen konstanten Wert von Messfrequenz * Messdauer. Die Parameter des Tests sind in Tabelle 10 aufgelistet. Das Messsystem wird während der Messungen nicht verändert.

Tabelle 10: Messparameter, Experiment Mittelwertbildung

Messung Nr	1	2	3	4	5	6	7
Einschalten Messsystem	2010/07/23 ca. 06h00						
Messbeginn	07h56	07h58	07h59	08h00	08h01	08h02	08h04
Messfrequenz [kHz]	2	2.5	5	10	12.5	25	50
Samples to Read	1.000						
Messdauer [s]	75	60	30	15	12	6	3
Kanal 1	Oszillator eingeschaltet / keine Anregung						
Kanal 2	Oszillator eingeschaltet / keine Anregung						
Kanal 3	N/A						
Kanal 4	N/A						

Über die Standardabweichung der Messreihen ist nun erkennbar, ob die Daten vorprozessiert oder das Signal zu den konkreten Zeitpunkten abgetastet wird. In Abbildung 19 ist das Ergebnis dargestellt. Die erhöhten Werte zwischen 2,5 und 10 kHz sind vermutlich auf die Qualität des Oszillators zurückzuführen. Es kann auch hier angenommen werden, dass keine Vorprozessierung der Daten vom A/D-Wandler vorgenommen werden und die tatsächlichen Einzelmesswerte aufgezeichnet werden.

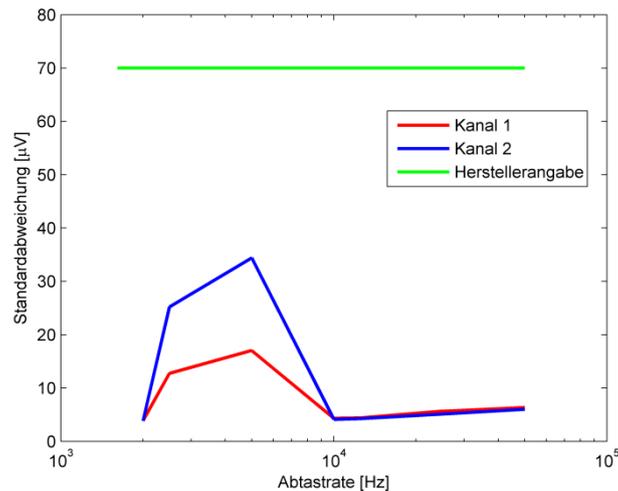


Abbildung 19: Standardabweichung des Messrauschens mit variierender Messdauer

6.1.4 Resümee

Der A/D-Wandler zeichnet sich vor allem durch seine Übermittlung der rohen Messdaten aus. Es konnte keine Beeinträchtigung des Messbereichs sowie keine Abhängigkeit der Genauigkeit von der Paketgröße festgestellt werden. Weiters ergaben die Untersuchungen, dass der A/D-Wandler keine Datenlücken produziert.

6.2 Untersuchung des Q-Flex QA 1400

Ausschlaggebend für die Anschaffung des Beschleunigungssensors Q-Flex QA 1400 war das geringe Driftverhalten, welche eine Doppelintegration der Messdaten erst ermöglicht. Dieses Driftverhalten soll nun neben anderen Fehlereinflüssen wie Sensorrauschen, Nullpunktsfehler, Maßstab und Temperaturverhalten (Neuhierl, 2003, S. 43) Teil der Untersuchungen sein. Während den Untersuchungsmessungen hat es fünf verschiedene Aufbauten des Messsystems gegeben, die in Abbildung 20 dargestellt sind und im Folgenden als Aufbau A-E bezeichnet werden.

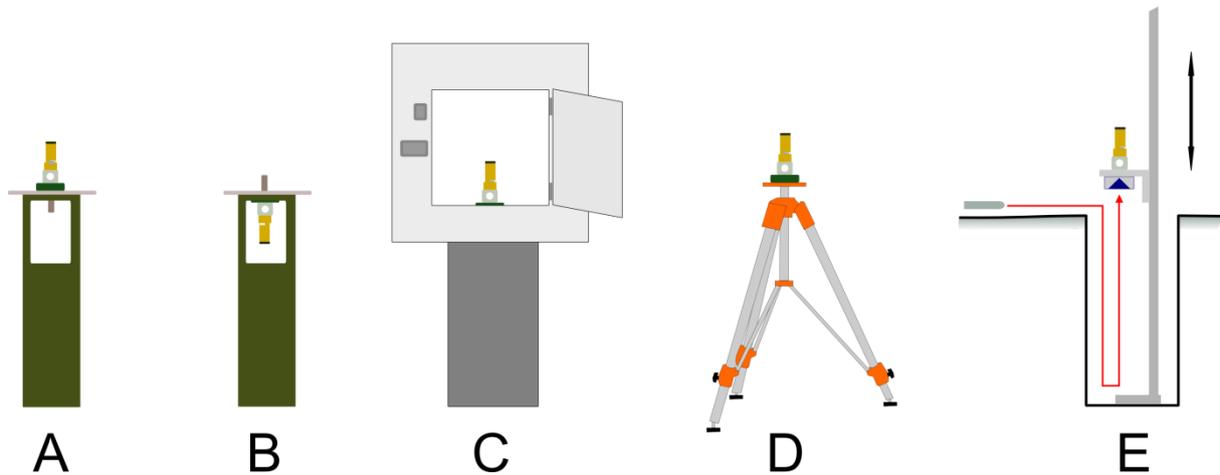


Abbildung 20: Verwendete Messaufbauten des Sensor

Der Sensor wird bei allen Messaufbauten auf einem Untersatz montiert. Bei Aufbau A wird der Sensor auf einem Messpfeiler im Labor montiert. Die Messung erfolgt entlang der Lotlinie. Bei Aufbau B wird der Sensor von unten am Messpfeiler angeschraubt, sonst analog zu Aufbau A. Aufbau C wird bei Versuchen in der Klimakammer verwendet. Der Sensor befindet sich im Untersatz, welcher auf die Herzschraube der Klimakammer geschraubt wird. Bei der Feldmessung und einigen Laborversuchen wird der Sensor auf dem Industriestativ montiert (Aufbau D). Bei den Fahrten mit dem Vertikalkomparator wird der Sensor oberhalb des Reflektors auf der beweglichen Schiene montiert, damit die Messachse mit der Bewegungsrichtung der Schiene zusammenfällt.

6.2.1 Optimierung des Messsystems

Bei ersten Rauschmessungen (siehe Tabelle 11) hat sich herausgestellt, dass das Signal von einigen Störfrequenzen beeinflusst wird.

Tabelle 11: Messparameter der Tests zu „Phasensprünge“

Messparameter	Messung 1	Messung 2
Messbeginn	2010/07/29 07h17	2010/08/05 10h55
Messfrequenz	50 kHz	50 kHz
Aufbau	Tisch, Raum A 207	A
Messdauer	30 s	30 s
Kanal 1	Beschleunigung	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur	Temperatur
Kanal 3	N/A	N/A
Kanal 4	N/A	N/A

In Abbildung 21a sind die Netzfrequenz bei 50 Hz (Bereich A), sowie eine sehr dominante Frequenz bei 600 Hz (Bereich B) gut zu erkennen.

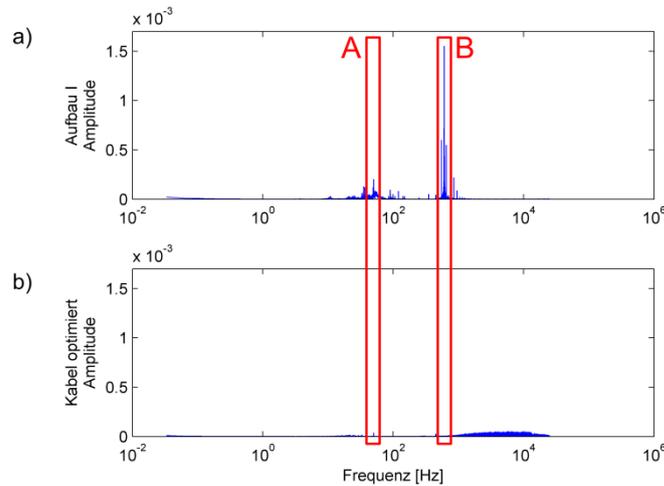


Abbildung 21: Amplitudenspektren, Rauschmessung, a) Aufbau 1, b) Kabel optimiert

Erste Vermutungen ergaben ein elektromagnetisches Verträglichkeitsproblem im Messlabor, das aber durch Anschluss an einen anderen Stromkreis (2.Stock, A207, Steyrergasse 30) ausgeschlossen wurde. Auch eine verbesserte Schirmung des Kabels erbrachte keine zufriedenstellende Lösung. Daher wurde der Sensor mit einem Twisted-Pair-Kabel der Kategorie 6 angeschlossen. „Die in diesen Kabeln verdrehten Adernpaare bieten Schutz gegen den störenden Einfluss von äußeren magnetischen Wechselfeldern, da sich durch das Verdrehen der Adernpaare diese gegenseitig aufheben“ (Wikipedia, 2010). Durch den Anschluss dieses Kabels werden die Störsignale deutlich minimiert (siehe Abbildung 21b).

6.2.2 Untersuchung der Eignung des Sensors

Da bei Rauschmessungen mit hohen Samplingraten sehr große Amplituden bei Frequenzen über 500 Hz auftreten (siehe Abschnitt 6.2.3), ist es nun von Interesse, ob diese Anteile vom Beschleunigungssensor oder vom A/D-Wandler verursacht werden. Um diese Effekte genauer zu untersuchen, werden nun Messungen im Labor durchgeführt (siehe Tabelle 12). Der Sensor wird dabei auf einem Messpfeiler montiert, um danach statische Messungen mit den Messfrequenzen 1.6, 3.1 und 50 kHz durchführen zu können. Das Messsystem wird während den Messungen nicht verändert.

Tabelle 12: Messparameter der Test zu „Eignung des Sensors“

Messparameter	Test 1	Test 2	Test 3
Einschalten Messsystem	2010/09/02 8h00		
Messbeginn	2010/09/02 11h21	2010/09/02 11h26	2010/09/02 11h27
Messfrequenz	1.6 kHz	3.1 kHz	50 kHz
Aufbau	A		
Messdauer	je 30 s		
Kanal 1	Beschleunigung		
Kanal 2	Temperatur		
Messreihe 1	Q-Flex eingeschaltet		
Messreihe 2	Q-Flex ausgeschaltet		
Messreihe 3	Q-Flex ausgesteckt (Rauschmessung A/D-Wandler)		
Messreihe 4	Wiederholung Messreihe 1		

Bei der ersten Messung wird mit eingeschaltetem Beschleunigungssensor gemessen – es ist also eine Rauschmessung. Nach der ersten Messreihe wird mit ausgeschaltetem Sensor gemessen. Bei Messreihe 3 werden zusätzlich die Kabel des Beschleunigungssensors beim A/D-Wandler ausgesteckt, um ein reines Rauschen des A/D-Wandlers zu erhalten. Bei der letzten Messreihe wird mit den Konfigurationen der ersten Messreihe gemessen, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. In Abbildung 22 werden die Amplitudenspektren der Versuche exemplarisch für die Messungen mit 50 kHz dargestellt. Die Ergebnisse der beiden anderen Messreihen sind in Anhang E abgelegt. Sehr deutlich erkennbar ist die Unterdrückung der hochfrequenten Anteile bei ausgeschaltetem bzw. ausgestecktem Sensor. Bei ausgeschaltetem Sensor sind niederfrequente Amplituden erkennbar. Dies ist wahrscheinlich auf einen Aufwärmeeffekt des A/D-Wandlers zurückzuführen. Dieser Versuch zeigt, dass hochfrequente Anteile des Messrauschens eindeutig vom Beschleunigungssensor stammen. Der Sensor unterliegt bis zu seiner maximal angegebenen Messfrequenz von 300 Hz kaum ersichtlichen systematischen Einflüssen. Die Frequenzen im Bereich A werden Gebäudebewegungen zugeordnet (siehe Abschnitt 6.2.3) und sind nicht durch eine Störung des Sensors verursacht. Unter der Berücksichtigung, dass Signale über 300 Hz (rot hinterlegt) gefiltert werden, kann dieses Messsystem für die gewählten Anforderungen verwendet werden.

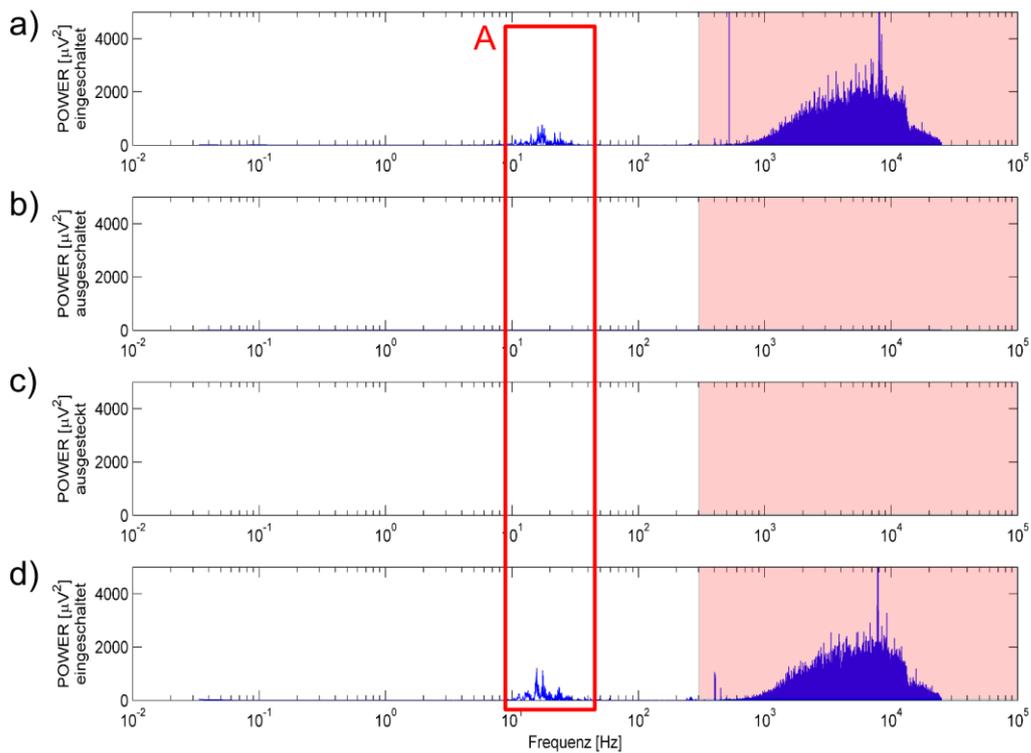


Abbildung 22: Zuordnung der hochfrequenten Anteile – 50 kHz a) Sensor eingeschaltet b) Sensor ausgeschaltet c) Sensor ausgesteckt d) Sensor eingeschaltet (wie a)

6.2.3 Analyse der auftretenden Frequenzen

Da mehrere Frequenzen im Signal auftreten, ist es von Interesse, diese für etwaige Filterungen genau zuzuordnen zu können. Das Signal wird stark „oversampled“ aufgezeichnet, daher wird untersucht ob der angegebene Messbereich auch überschritten werden kann. Um die auftretenden Frequenzen analysieren zu können, werden im Messlabor zwei Rauschmessungen (siehe Tabelle 13) durchgeführt.

Tabelle 13: Messparameter der Tests zu „Phasensprünge“

Messparameter	Messung 1	Messung 2
Einschalten Messsystem	2010/08/06 07h20	
Messbeginn	2010/08/06 07h27	2010/08/06 08h03
Messfrequenz	50 kHz	50 kHz
Aufbau	A	A
Messdauer	30 s	30 s
Kanal 1	Beschleunigung	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur	Temperatur

In Abbildung 23 werden die Spektren dieser Messungen dargestellt. Im Bereich von 10-30 Hz (Bereich A) sind deutlich Amplituden ersichtlich, die aus den Eigenbewegungen des Gebäudes resultieren (Heim, 2010, S. 54). Im gewünschten Messbereich bis 300 Hz ist vor allem die Netzfrequenz mit 50Hz (Bereich B) ersichtlich. Diese kann allerdings bei isolierter Anordnung der Sensorkabel sehr stark minimiert werden, wie es in der unteren Messung gemacht wurde. Die Frequenzen > 300 Hz sind rot hinterlegt. Eine weitere sehr dominante Frequenz bei ca. 450 Hz (Bereich C) wurde bei weiteren Versuchen als die Eigenfrequenz des Messpfeilers identifiziert (Anhang A). Ab ca. 500 Hz (Bereich D) beginnt das sehr starke „Eigenleben“ des Sensors.

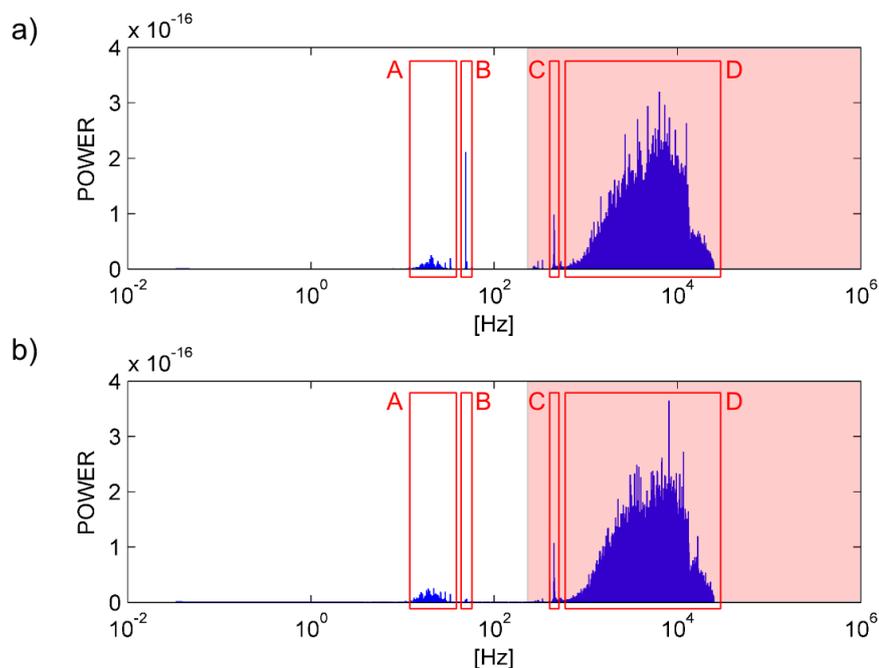


Abbildung 23: Powerspektren a) Kabel gekreuzt b) Kabel isoliert verlegt

Es wird gezeigt, dass der Tiefpassfilter so konzipiert werden soll, dass Frequenzen > 300 Hz im Signal unterdrückt werden. Allerdings kann es auch im Bereich < 300 Hz

zu Störsignalen kommen, die mit einem Bandpassfilter herausgefiltert werden müssen.

Um die Phasentreue des gefilterten Signals zu gewährleisten, wird das Signal mit der Matlab-Funktion ‚filtfilt‘ gefiltert. Dies entspricht einer Vorwärts- und Rückwärtsfilterung. Dabei wird nach der Vorwärtsfilterung das Signal gespiegelt, um es danach erneut zu filtern und letztendlich wieder zurückzuspiegeln. Dieses zweimal gefilterte Signal ist nun frei von Phasenverschiebungen (Oppenheim, 1989, S. 284f.).

6.2.4 60-Stunden- Messung

Um das Driftverhalten sowie den Aufwärmeeffekt des Sensors zu untersuchen, wird eine 60-Stunden-Messung im Messlabor durchgeführt. Weiters wird untersucht, ob mit diesem System Messungen über mehrere Stunden durchgeführt werden können, da es hier zu einem großen Datenvolumen kommen kann. Die Messparameter dieser Messung sind in Tabelle 14 angeführt.

Tabelle 14: Messparameter der 60h-Messung

Messparameter	60h-Messung
Einschalten Messsystem	2010/09/03 14h06
Messbeginn	2010/09/03 14h07
Messfrequenz	1.6 kHz
Aufbau	A
Messdauer	5.184.000 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Die Messung wird an einem Freitagnachmittag gestartet und übers Wochenende durchgeführt, da sich zu dieser Zeit keine Personen im Messlabor befinden, die das Signal beeinflussen könnten. Es werden dabei ca. 700 Mio. Datensätzen erzeugt. Dies entspricht einem Datenvolumen von ca. 12.5 GB. Da aufgrund der enormen Datenmengen die üblichen Einleseverfahren hier nicht mehr greifen, wird die Datei in kleinere Dateien aufgesplittet („HJSplit 2.4“ der Firma „Freebyte.com“). Die Größe der erzeugten Dateien wird dabei mit 500 MB festgesetzt. Nun können die Daten mit einem eigens erstellen Einlesefile „langzeit.m“ eingelesen werden. In diesem Programm erfolgt eine Mittelung der Messwerte auf einen Datensatz pro Sekunde. Dies bedeutet eine Glättung des Signals, das allerdings für die Auswertung sehr langfristiger Prozesse wie Aufwärm- und Driftverhalten ausreichend ist.

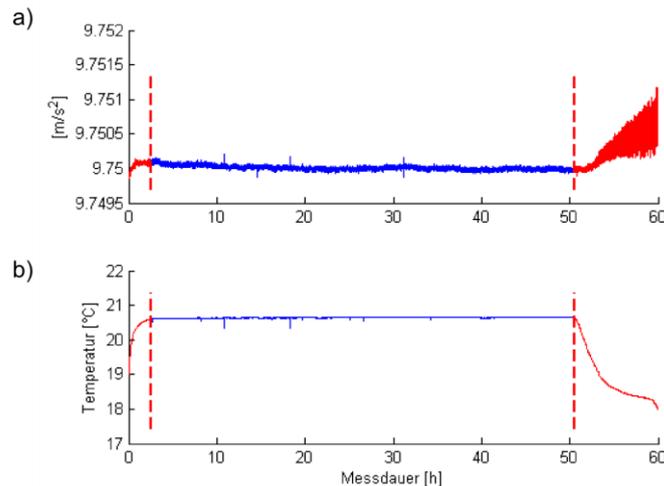


Abbildung 24: 1-s-Messwerte der 60-Stunden-Messung a) Beschleunigung b) Temperatur

In Abbildung 24 sind die 1-s-Messwerte dargestellt. Ungefähr 51 Stunden nach Messbeginn fällt die Spannung der externen Stromversorgung stark ab und die danach folgenden Messwerte sind für eine weitere Analyse unbrauchbar. Daher wird für die Berechnung des Driftverhaltens nur der Bereich nach der Aufwärmphase (2.5 Stunden) bis kurz vor dem Spannungsabfall (50.5 Stunden) verwendet. Dieser Bereich ist in der Abbildung blau hervorgehoben. Damit wird der Auswertebereich von 60 Stunden auf 48 Stunden reduziert.

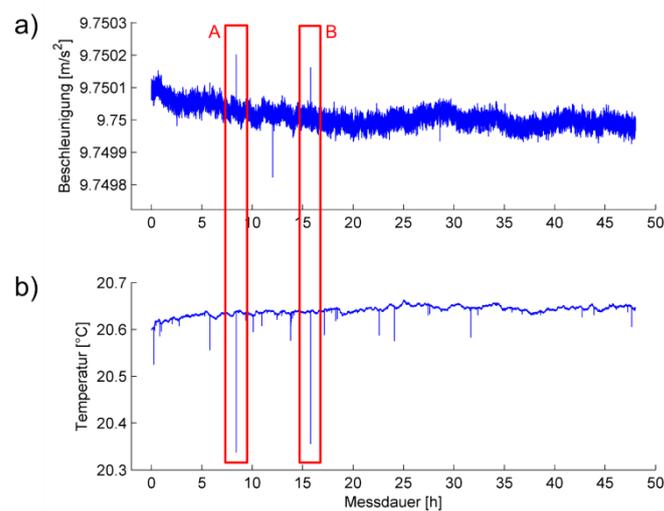


Abbildung 25: 1-s-Messwerte Auswertebereich für Drift

Im Signal sind visuell mehrere Ausreißer erkennbar. Die zwei größten Ausreißer (Bereich A und B) werden genauer analysiert. Vor allem in den Temperaturdaten (siehe Abbildung 26b) sind die Ausreißer gut ersichtlich. Aus ungeklärter Ursache passieren Temperatursprünge von bis zu 1°C . Das Signal driftet danach ab um dann wieder zu den ursprünglichen Temperaturwerten zurückzukehren. Da dieses Phänomen bei Messungen über einen kürzeren Zeitraum nicht aufgetreten ist, wird die Ursache

nicht weiter untersucht. In den Beschleunigungsdaten sind ebenfalls Ausreißer ersichtlich, die man in den Originaldaten allerdings nicht mehr erkennen kann.

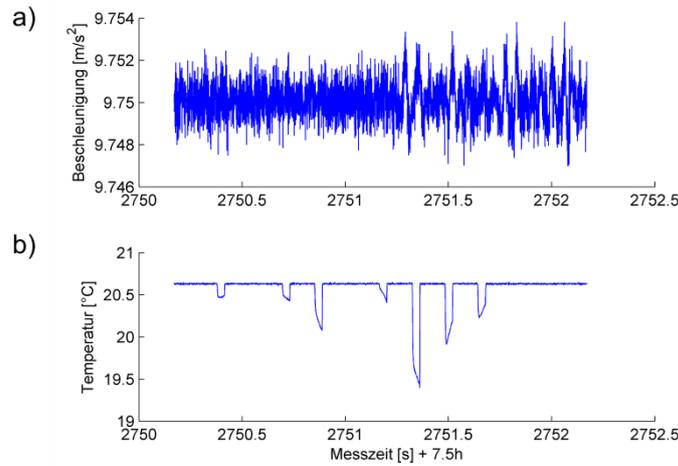


Abbildung 26: Detailbereich A, Originaldaten, a) Beschleunigung, b) Temperatur

Weiters wurde für den 48-Stunden-Auswertebereich ebenfalls die Standardabweichung der 1-s-Mittelwerte sowie die Range berechnet (siehe Abbildung 27).

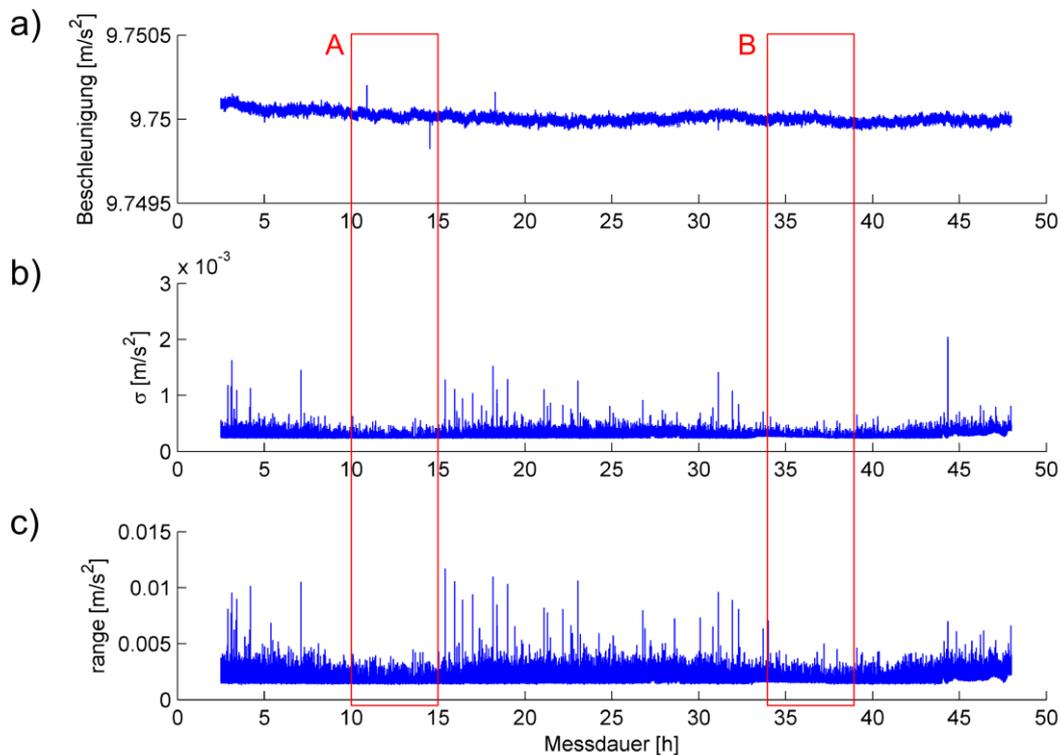


Abbildung 27: a) 1-s-Messwerte Auswertebereich für Drift, b) Standardabweichung c) Range

In den roten Teilbereichen A und B sind jeweils die Zeiten zwischen Mitternacht und 5 Uhr morgens hervorgehoben. Zu diesen Zeiten weisen die Standardabweichung,

sowie die Range des Messsignals deutlich kleinere Werte auf. Es kann hier die These von Heim (2010, S. 54) bestätigt werden, dass das Messsignal durch den Verkehr neben dem Messlabor beeinflusst wird.

6.2.5 Rauschen

Für die Berechnung der empirischen Standardabweichung ist es notwendig ein Signal zu verwenden, das möglichst frei von Störungen aufgezeichnet wird. Daher wird dafür ein Messabschnitt verwendet, der in der Nacht gemessen wurde, da in dieser Zeit die Beeinflussung durch Verkehr oder Bewegungen im Labor am geringsten ist. Die Daten werden gefiltert, um sie von den störenden Frequenzen (>300 Hz) zu befreien. Die Standardabweichung für 1-s Messung beträgt:

$$s_a = 29.7 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

6.2.6 Drift

Für die Berechnung der linearen Drift wird eine Regressionsanalyse mit Ausreißererkennung durchgeführt. Die Trendbestimmung erfolgt iterativ.

Die Iterationen werden solange durchgeführt, bis die empirische Standardabweichung der theoretischen Standardabweichung entspricht. Es ist ein einseitiger Test mit einem Signifikanzniveau von 95 % (siehe Anhang D). Die Berechnung der empirischen Standardabweichung ist in Abschnitt 6.2.5 beschrieben. Die Drift des Beschleunigungssensors pro Tag beträgt:

$$d_a = -20.08 \pm 0.54 \cdot 10^{-6} \frac{m/s^2}{Tag}$$

Die Drift des Sensors über einen Tag ist geringer als die Genauigkeit, und wird daher für Messungen von kurzer Dauer (Minutenbereich) nicht berücksichtigt.

6.2.7 Aufheizeffekte

Jegliches Messgerät unterliegt verschiedenen Aufwärmeeffekten, die bei der Messung hervorgerufen werden. Es ist zwischen inneren und äußeren Effekten zu unterscheiden. Die inneren Effekte (Aufheizeffekte) treten durch die Erwärmung der Bauteile während der Messung auf. Die externen Einflüsse (Aufwärmeeffekte) treten durch die Änderung der Umgebungstemperatur auf (Oberzaucher, 2003, S. 46). Aufgrund die-

ser Effekte kann eine Änderung des Nullpunktes auftreten. Die Daten unterliegen also einer Drift, die berechnet wird.

Für die Berechnung des inneren Aufwärmeffektes durch Selbsterwärmung des Messsystems wird die Aufwärmphase der 60-Stunden-Messung (siehe Abschnitt 6.2.4) herangezogen.

Das Verhalten des Systems kann nun mit einem Messsystem erster Ordnung modelliert werden (Brunner, 2008, S. 13). Normalerweise gilt diese Formel nur für eine sprunghafte Änderung der Temperatur und nicht für eine konstante Erwärmung der Komponenten. Es wird aber versucht, über Formel 6.1 einen Richtwert für die Aufwärmphase zu finden.

$$T = T_u + C \cdot e^{-t/\tau} \quad (6.1)$$

T ... Sensortemperatur
 T_u ... Umgebungstemperatur
 C ... Temperatursprung
 t ... Zeit
 τ ... Zeitkonstante

Die Modellierung des Messsystems erster Ordnung (Abbildung 28) ergibt eine Zeitkonstante von $t_{0,90} = 43.6$ Minuten. Die absolute Beschleunigungsänderung innerhalb der Aufwärmphase beträgt ca. $3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ und ist für Absolutmessungen auf keinen Fall zu vernachlässigen. Die Auswirkung dieser Änderung ist in Abbildung 7 dargestellt.

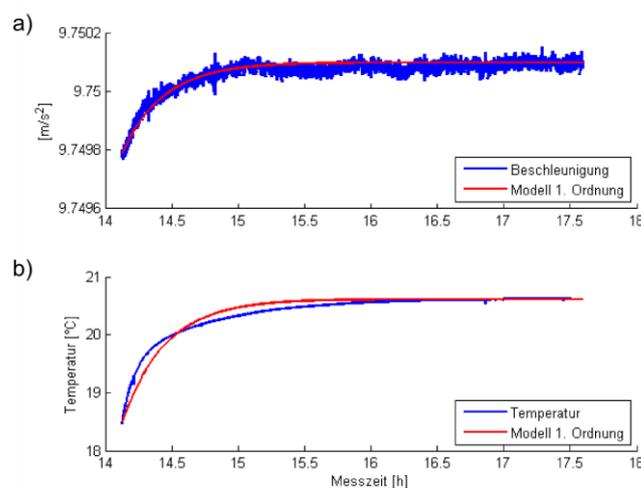


Abbildung 28: Aufwärmphase mit Modell erster Ordnung

Es muss hier allerdings angemerkt werden, dass dieses Aufwärmverhalten unter konstanter äußerer Temperatur bestimmt wurde.

6.2.8 Aufwärmefekte

Nun soll abgeschätzt werden, wie sich eine verändernde Umgebungstemperatur auf die Messwerte auswirkt. Dazu wird der Sensor in der Klimabox von ca. 20°C Labor-temperatur auf 35°C aufgeheizt. Die genauen Messparameter sind Tabelle 15 zu entnehmen:

Tabelle 15: Messung Aufwärmeeffekt

Messparameter	Aufwärmeeffekt
Einschalten Messsystem	2011/03/01 09h18
Messbeginn	2011/03/01 12h26
Messfrequenz	1.6 kHz
Aufbau	C / A
Messdauer	10.800 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Aufgrund der großen Datenmenge und der Bestimmung eines sehr langfristigen Effektes werden die Daten auf 1-s-Werte gemittelt. 20 Sekunden nach Messbeginn wird der Sensor aus der Klimabox genommen, und auf einen Messpfeiler in vertikaler Stellung montiert. Dieser Vorgang dauert ca. 40 Sekunden. Diese Daten werden aus den Beschleunigungswerten herausgeschnitten. Das Messsystem erster Ordnung (Formel 6.1) kann nun angewendet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 29 dargestellt:

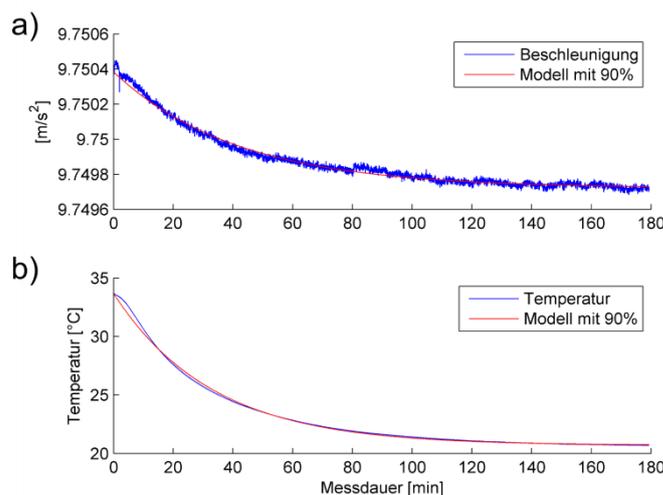


Abbildung 29: Aufwärmeeffekt Q-Flex mit Messsystem erster Ordnung

Es ergibt eine Zeitkonstante von $t_{0,90} = 90.1$ Minuten. Die absolute Beschleunigungsänderung innerhalb der Aufwärmphase beträgt ca. $5.6 \cdot 10^{-4} m/s^2$.

6.2.9 Nullpunktstabilität statisch

Bei den folgenden Messungen wird untersucht, ob die Biasstabilität innerhalb der Genauigkeit des Messsystems liegt oder ob sie eventuell Auswirkung auf das Ergebnis hat. Seitens des Herstellers wird keine genaue Angabe zur Schwankung des Nullpunkts gemacht. Es wird lediglich angegeben, dass der Bias $< 5 \text{ mg}$ ($5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$) ist und sich nach einem Jahr maximal um 1 mg ($1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$) verändern kann.

Daher werden 12 Rauschmessungen über je zwei Minuten durchgeführt, denen jeweils ein Kaltstart des Messsystems vorausgeht, um den Nullpunkt des Systems direkt nach dem Einschalten bestimmen zu können. Die Messungen werden über einen Zeitraum von einer Woche durchgeführt (siehe Tabelle 16). Der Sensor ist während dieser Zeit auf einem Messpfeiler montiert. Am Messsystem wird zwischen den Messungen keine Änderung vorgenommen. Der Sensor ist vor jeder Messung mindestens drei Stunden ausgeschaltet, um gleichbleibende Bedingungen gewährleisten zu können.

Tabelle 16: Messparameter Nullpunktstabilität I

Messparameter	Nullpunktstabilität I
Anzahl der Messungen	12
Einschalten Messsystem	je 1 min vor Messbeginn
Messbeginn	zw. 2010/10/07 14h22 und 2010/10/14 13h10
Messfrequenz	3.1 kHz
Aufbau	A
Messdauer	je 120 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Es wird vermutet, dass die Biasstabilität abhängig von der Tageszeit ist, daher werden die Messungen zu unterschiedlichen Uhrzeiten gemacht. Dieser Verdacht kann aber nicht bestätigt werden. In Abbildung 30 ist das Ergebnis der Untersuchung dargestellt. Für den Vergleich wird der Mittelwert der Zeitreihen berechnet. Damit ein guter Vergleich möglich ist, wird der Mittelwert der 12 Messungen (\approx Erdbeschleunigung) abgezogen, um die tatsächlichen Differenzen anschaulicher darzustellen. Die maximale Differenz zweier Messungen beträgt ca. $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$. Da alle Messungen unter konstanten Laborbedingungen durchgeführt werden ist nicht abzuschätzen, wie sich eine verändernde Umgebungstemperatur auf den Bias auswirkt.

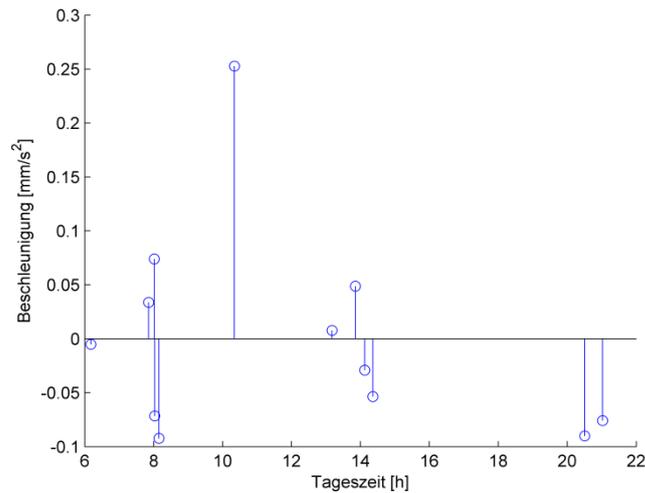


Abbildung 30: Nullpunktstabilität statisch über Zeit

6.2.10 Nullpunktstabilität dynamisch

Da während dieser Messungen der Sensor nie bewegt wird, ist es in Hinblick auf den praktischen Einsatz von Interesse, wie sich der Bias verändert, wenn der Sensor aufgewärmt ist und bewegt wird.

Daher wird eine weitere Untersuchung zur Nullpunktstabilität gestartet (siehe Tabelle 17). Den in direkter Abfolge stattfindenden Messungen geht eine Aufwärmphase von ca. 19 Stunden voraus. Dies garantiert, dass der Sensor aufgewärmt ist, und der Bias nicht durch den Aufwärmeffekt beeinflusst ist. Es werden 15 Messreihen zu je 3 Messungen durchgeführt. Zuerst wird der Sensor auf dem Pfeiler montiert (Aufbau A), danach horizontal gespiegelt (Aufbau B) und zuletzt wieder in die Ausgangsposition gebracht. Zwischen den Messungen wird der Sensor ausgeschaltet, um bei der Montage nicht beschädigt zu werden.

Tabelle 17: Messparameter Nullpunktstabilität II

Messparameter	Nullpunktstabilität II
Anzahl der Messungen	15 x 3
Einschalten Messsystem	2010/10/15 ca. 18h00
Messbeginn	2010/10/16 13h12
Messfrequenz	3.1 kHz
Aufbau	A / B / A
Messdauer	je 10 s
Zeit zwischen Umbau	ca. 30 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Für die Analyse werden die Mittelwerte der Zeitreihen bestimmt. In Abbildung 31a sind die Mittelwerte von Messung 1 und 3 dargestellt. In Abbildung 31b ist die Differenz dieser beiden Messungen ersichtlich. Es ist keine Systematik der Nullpunktstabilität erkennbar. Die Veränderung des Nullpunkts zwischen Messung 1 und Messung 3 liegt im Bereich von $\pm 3 \cdot 10^{-5} m/s^2$. Vollständigkeitshalber sind auch die Mittelwerte der zweiten Messung (siehe Abbildung 31c) dargestellt. Hier ist ähnlich wie in Abbildung 31a ein leichter Anstieg der Mittelwerte erkennbar, darum werden die Temperaturwerte dieser Messungen genauer betrachtet.

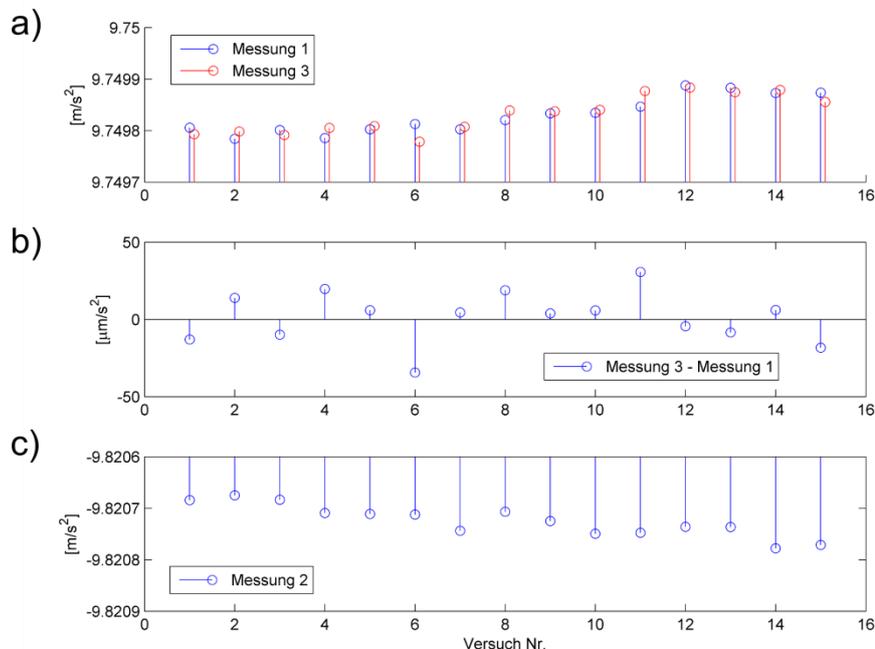


Abbildung 31: Nullpunktstabilität II a) Messung 1+3 b) Differenz dieser Messungen c) Messung 2

In Abbildung 32 sind Temperatur und Beschleunigungswerte dargestellt. Die Beschleunigungswerte sind der Mittelwert aus Messung 1 und 3. Die Erhöhung des

Signals mit fortschreitender Messdauer, ist auf einen Temperatureffekt zurückzuführen. Offensichtlich wurde das Messsystem während der Messungen und dem Hantieren dazwischen um 2°C erwärmt. Die Nullpunktstabilität zwischen Messung 1 und Messung 3 wird durch diesen Effekt allerdings nicht beeinflusst.

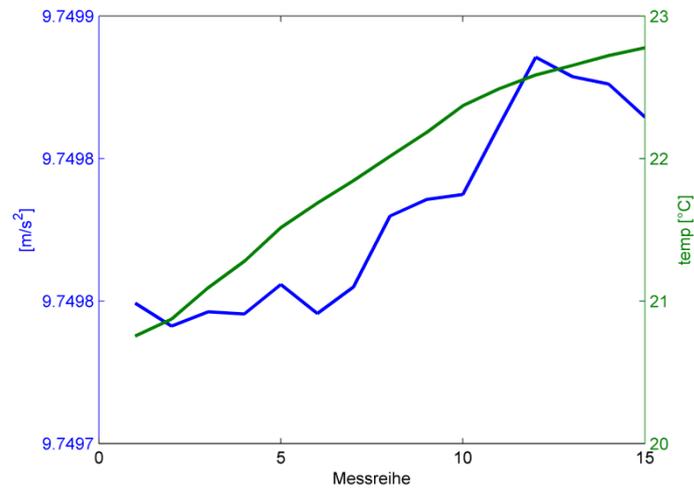


Abbildung 32: Messsignal und Temperatur während Nullpunktstabilität II

Diese Messungen werden nach der Kalibrierung und der Feldmessung wiederholt, um sicherzustellen, dass der Sensor nicht durch systematische Einflüsse verfälscht wird. Dies ist nicht der Fall. Das Ergebnis ist in Anhang F dargestellt.

7. Kalibrierung des Messsystems

7.1 Temperaturabhängigkeit des Messsystem

Da die Temperaturabhängigkeit des Messsystems genauer untersucht wird, ist es notwendig, die gesamte Hardware des Messsystems in die laboreigene Klimabox zu übersiedeln. Diese Box hat ein Volumen von ca. 1m^3 und einen Temperaturbereich von -10°C bis $+40^\circ\text{C}$ (Woschitz, 2009, S. 468). Dieser Bereich kann allerdings nicht ganz ausgeschöpft werden, da das Chassis „NI cDAQ-9172“ einen minimalen Einsatzbereich von 0°C hat. Es werden sieben Messungen in 5°C -Schritten zw. $+5^\circ\text{C}$ und 35°C durchgeführt (siehe Tabelle 18). Die Temperatur wurde mit einem PT100 Temperatursensor gemessen, der über den A/D-Wandler Spider8 der Firma HBM ausgelesen wurde.

Tabelle 18: Messparameter Klimabox gesamt

Messparameter	Klimabox gesamt
Anzahl der Messungen	7
Einschalten Messsystem	2010/10/26 08h24
Messbeginn	2010/10/26 08h25
Messfrequenz	3.1 kHz
Aufbau	C
Messdauer	je 30 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Der Temperatursensor befindet sich während der gesamten Messdauer auf der Höhe des Beschleunigungssensors. Nach Erreichen der gewünschten Temperatur wird dem Messsystem ca. eine Stunde Akklimationszeit eingeräumt (siehe Abschnitt 6.2.7). Die Temperaturabhängigkeit wird durch eine Polynomannpassung ersten Grades bestimmt (siehe Abbildung 33). Dies ergibt eine Korrektur von $62\text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

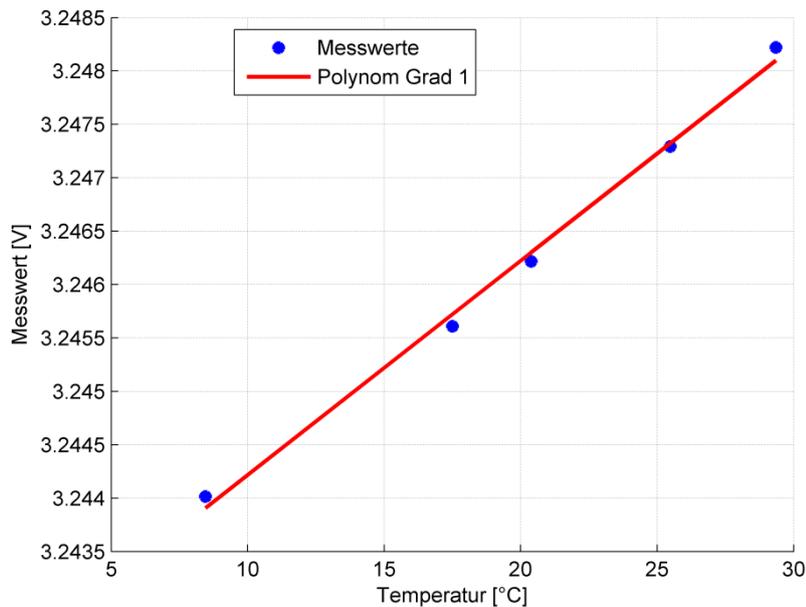


Abbildung 33: Temperaturabhängigkeit des Messsystems

Werden die Temperaturkoeffizienten der einzelnen Bestandteile des Messsystems laut deren Datenblättern aufsummiert, so erhält man eine Korrektur von bis zu 190 ppm/°C (siehe Tabelle 19). Um die genaue Ursache für den starken Temperaturkoeffizienten lokalisieren zu können, müssen weitere Versuche mit der Klimabox durchgeführt werden, bei denen einzelne Komponenten des Messsystems isoliert betrachtet werden können (siehe Anhang H). Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Die elektronischen Bürden werden nicht genauer betrachtet. Das Ergebnis erscheint realistisch, wenn man bedenkt, dass die Temperaturabhängigkeit der Bürden auch negativ sein kann (Powertron, 2005, S. 2).

Tabelle 19: Temperaturkoeffizienten (TK) des Messsystems

	TK	Messung
Q-Flex QA 1400	< 180 ppm/°C	57 ppm/°C
NI 9239	5 ppm/°C	6 ppm/°C
elektronische Bürden	±5 ppm/°C	N/A
gesamt	< 190 ppm/°C	62 ppm/°C

7.2 Maßstabsbestimmung

Da apriori über die Lage des Sensors im Gehäuse bzw. über die Messachse im Sensor nichts bekannt ist, wird versucht, die Verkippung β zu bestimmen, die im direkten

Zusammenhang mit dem Maßstab steht. Im Detail der Abbildung 34 ist diese Verkipfung schematisch dargestellt.

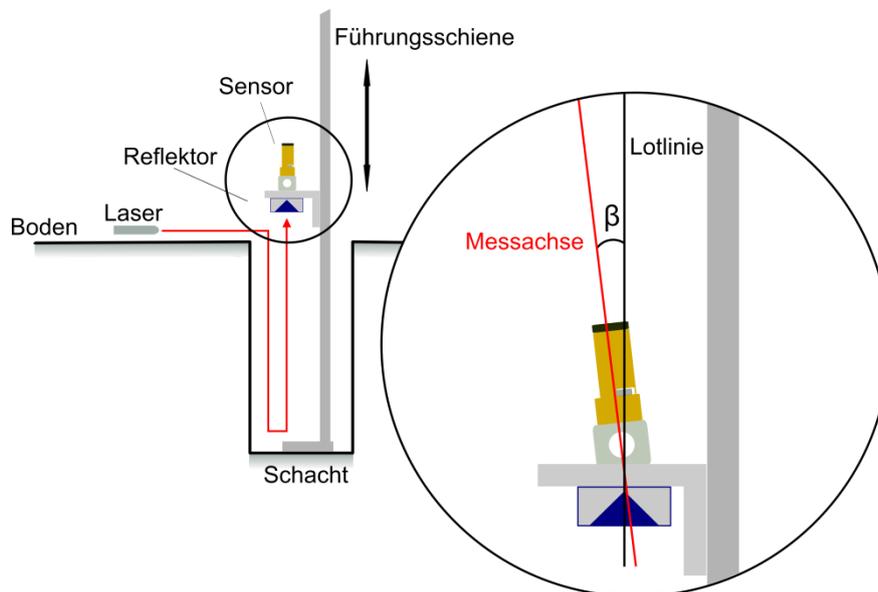


Abbildung 34: Skizze Messung Vertikalkomparator

Weiters wird vermutet, dass ein etwaiger Spannungsabfall in der Widerstandsbox bzw. in den Kabeln zu einer Verringerung des eigentlichen Messsignals führt. Eine Trennung dieser Anteile ist allerdings nicht möglich, daher wird der Maßstab im gesamten berechnet:

$$m = \frac{a}{\cos \beta} + SV \quad (7.1)$$

m ... Maßstab
 β ... Verkipfung
SV ... Zuschlag durch Spannungsverlust

Die Durchführung der Maßstabsbestimmung erfolgt im Messlabor des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, in dem konstante klimatische Bedingungen herrschen. Es befindet sich neben einer ca. 30 m langen Horizontalkomparatorbank auch ein ca. 3 m langer Vertikalkomparator (Woschitz, 2003, S. 93ff). Für die Bestimmung des Maßstabs eignet sich der Vertikalkomparator hervorragend, da hier bestimmte Distanzen mit Solldistanzen verglichen werden können (siehe auch Anhang C). Für die Messungen wird der Sensor oberhalb des Reflektors auf die bewegliche Schiene montiert (siehe Abbildung 35 / Tabelle 20).

Tabelle 20: Messparameter Maßstabsbestimmung

Messparameter	Klimabox gesamt
Anzahl der Messungen	10
Einschalten Messsystem	2010/11/25 08h00
Messbeginn	2010/11/25 10h02
Messfrequenz	3.1 kHz
Aufbau	E
Messdauer	je ca. 30 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Für Fahrten mit dem Vertikalkomparator steht ein Motor bereit, der die Schiene mit Geschwindigkeiten bis zu ± 0.5 m/s bewegt. Das Problem ist allerdings, dass die maximal gemessene Beschleunigung lediglich 0.1 m/s² beträgt. Da dies für die Kalibrierung eines Sensors mit ca. ± 30 m/s² nicht unbedingt zufriedenstellend ist, wird der Motor abgekoppelt, und die Schiene manuell bewegt (Abbildung 35).

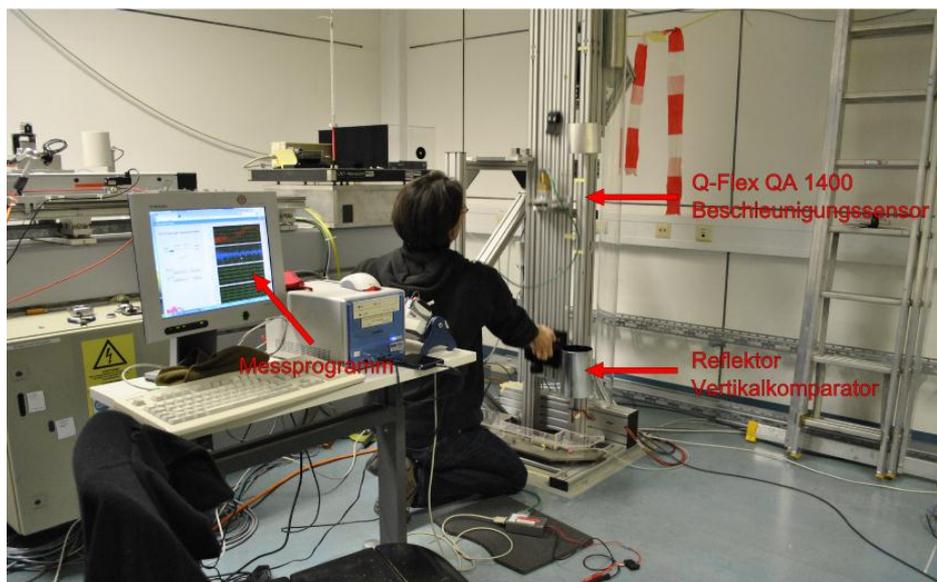


Abbildung 35: Manueller Betrieb des Vertikalkomparators

Die maximale Geschwindigkeit des Komparators ist mit 0.5 m/s bekannt, nicht jedoch die maximale Beschleunigung. Daher wird das Messprogramm mit unterschiedlichen Beschleunigungen durchgeführt. Durch ruckartige Bewegungen kommt es mehrmals zu LBI (LaserBeamInterrupts), die zur Folge haben, dass der Teil der Messung nach dem LBI nicht mehr verwendet werden kann, weil das Verhalten nicht abschätzbar bzw. modellierbar ist. Es sind insgesamt acht verwertbare Messfahrten entstanden.

Der Vorteil dieses Messsystems ist die extrem hohe Genauigkeit von wenigen $\mu\text{m}(!)$. Allerdings ist leider nicht genau bekannt, zu welchem Zeitpunkt innerhalb einer ms

diese Daten gemessen werden. Für die meisten Anwendungen ist dies vollkommen ausreichend. Die relativen Distanzänderungen des Vertikalkomparators werden nicht in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet und bedürfen daher einer besonderen Bearbeitung. Neben der relativ gemessenen Distanz in mm wird die Messzeit in ms gespeichert. Das Messprogramm des Vertikalkomparators versucht stets die maximale Aufzeichnungsrate zu verwenden. Das heißt, die Aufzeichnungsrate variiert und kann mitunter sogar größere Datenlücken (mehrere ms) aufweisen, wenn der Prozessor des PCs kurzfristig anderweitig verwendet wird.

Daher wurde eine eigene Matlab-Routine erstellt die den Komparatordaten den ehest richtigen Zeitstempel aufsetzt. Da die Zeitpunkte nur in ganzen ms angegeben werden, wird die Anzahl der Daten pro ms gesucht und in regelmäßigen Abständen auf eine ms verteilt. Es sind also nun die Komparatordaten in einem unregelmäßigen Raster vorhanden. In Abbildung 36 (blau) ist exemplarisch dargestellt, wie dies im Fall von großen Datenlücken aussieht.

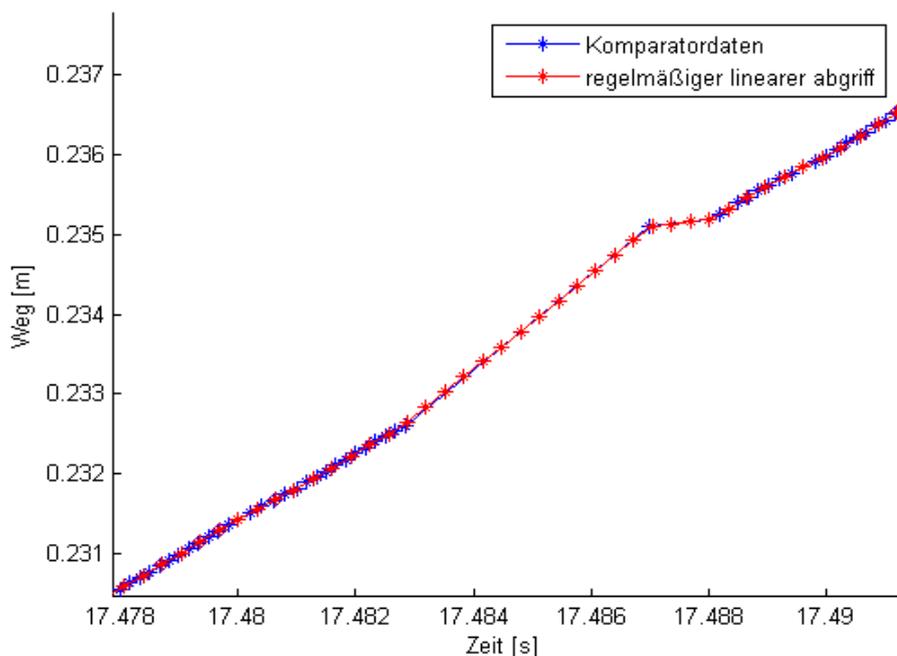


Abbildung 36: Linearer Abgriff der Komparatordaten

Um nun einen Vergleich der Daten anstellen zu können, müssen beide Zeitreihen auf die gleiche Frequenz gebracht werden. In der Matlab-Routine werden in einem weiteren Berechnungsschritt die Komparatordaten mit dem regelmäßigen Zeitstempel der Q-Flex-Datenmittels linearer Interpolation zwischen den benachbarten Werten downsampled (Abbildung 36 – rot).

Die Kreuzkorrelation wird in der Beschleunigungsebene durchgeführt (siehe Abbildung 37). Werden die relativen Distanzen zweimal differenziert, erhält man die Be-

schleunigungen des Vertikalkomparators. Danach ist es möglich, diese zwei Beschleunigungszeitreihen mittels Kreuzkorrelation zueinander zu verschieben. Dadurch können auch die Distanzen miteinander verglichen werden.

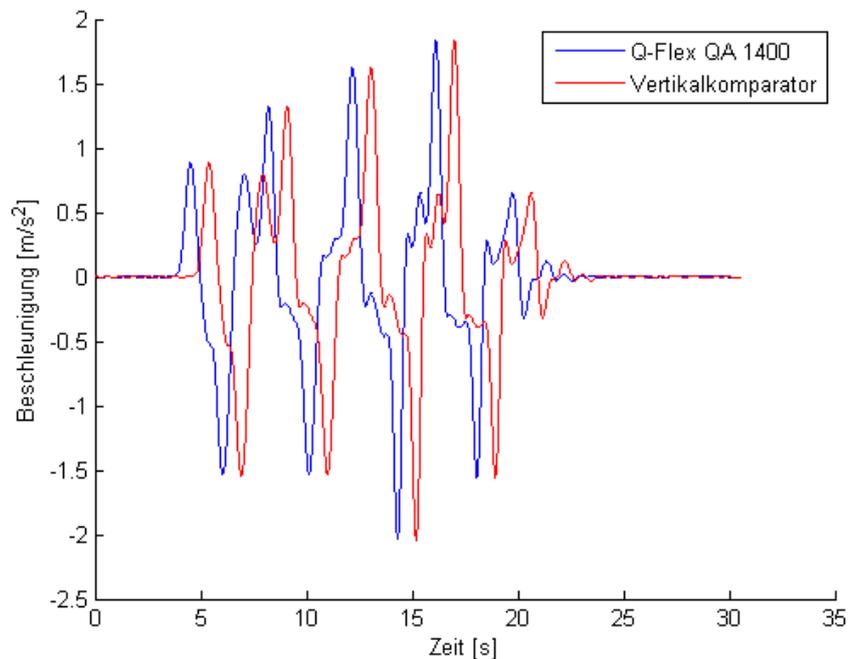


Abbildung 37: Kreuzkorrelation Beschleunigung Q-Flex QA 1400 / Vertikalkomparator

Nachdem die Daten zueinander in Verbindung gebracht wurden, können die Beschleunigungssignale zweimal integriert werden (siehe Abschnitt 5.2), um die Distanzen miteinander vergleichen zu können. Diese Distanz (s_Q) wird nun mit der Solldistanz (s_K) verglichen. Dies erfolgt über einen iterativen Ausgleich mit Näherungswerten (zB. Niemeier, 2002, S. 108ff).

$$s_K = s_Q \cdot m \quad (7.2)$$

s_K ... Distanz Vertikalkomparator
 s_Q ... Beschleunigung Q-Flex
 m ... Maßstab

Der funktionale Zusammenhang sieht wie folgt aus:

$$\begin{pmatrix} s_{K_1} \\ \vdots \\ s_{K_n} \end{pmatrix}_I = \begin{pmatrix} s_{Q_1} \\ \vdots \\ s_{Q_n} \end{pmatrix}_A \cdot (m)_x \quad (7.3)$$

Bereits nach der zweiten Iteration ändern sich die Parameter nicht mehr und die Berechnung wird abgebrochen. In Abbildung 38 ist in rot die Differenz zwischen Soll- und Istwerten mit Maßstab dargestellt.

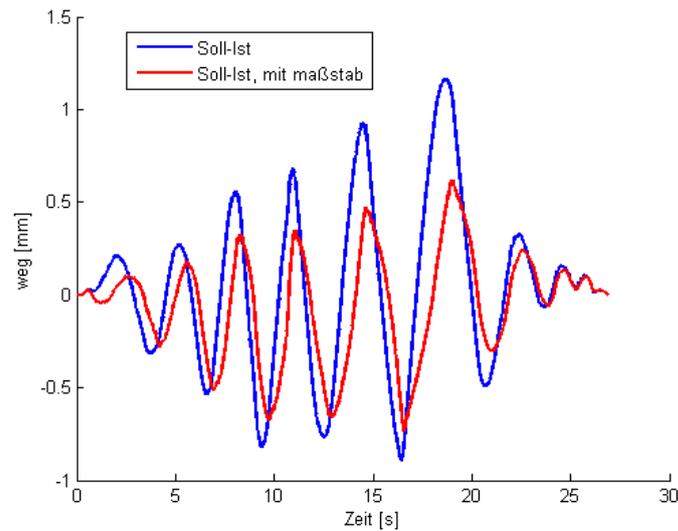


Abbildung 38: Differenz Soll-Ist mit (rot) und ohne (blau) Maßstab

Diese Berechnungen werden für alle Messungen durchgeführt. In Abbildung 39 sind alle berechneten Maßstäbe dargestellt. Es werden die berechneten Maßstäbe der einzelnen Messungen gegen die Gesamtauswertezeit der Messungen dargestellt.

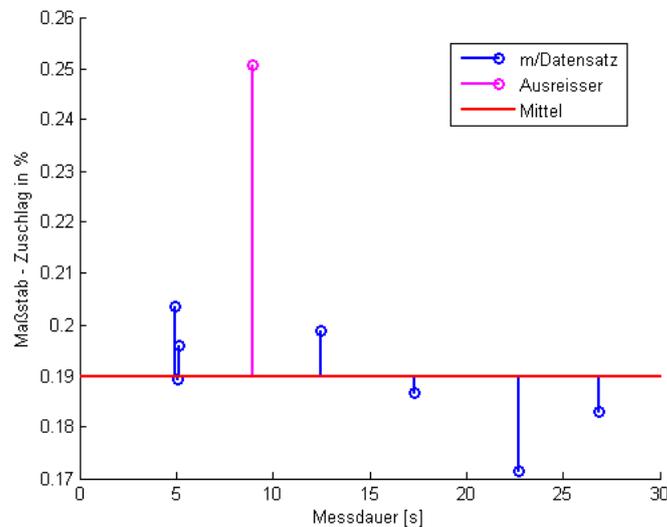


Abbildung 39: Berechnete Maßstäbe je Messung dargestellt nach Messdauer

Für die Berechnung des mittleren Maßstabes wird eine Messung mit der Methode der robusten Schätzer (Brunner, 2009, S. 2-19) eliminiert.

$$m = 1.001898$$

Dieser Maßstab für die Wegbestimmung wird bei allen weiteren Berechnungen berücksichtigt.

8. Praxistests

Um die unter Laborbedingungen gewonnenen Erkenntnisse auf deren Praxistauglichkeit zu überprüfen, werden mehrere Praxistests durchgeführt.

8.1 Praxistest Temperaturkalibrierung

Um den bestimmten Temperaturkoeffizienten zu überprüfen, wird der Sensor in der Klimabox montiert und von 20°C auf 35°C erwärmt. Während dieser Erwärmung wird 3 Stunden gemessen (siehe Tabelle 21). Falls der Temperaturkoeffizient richtig bestimmt wurde, sollten die Daten bis auf die Drift des Messsignals (siehe Abschnitt 6.2.6) lediglich das Messrauschen aufweisen.

Tabelle 21: Messung Praxistest Temperaturkoeffizient (PT)

Messparameter	PT
Einschalten Messsystem	2011/03/01 09h18
Messbeginn	2011/03/01 09h19
Messbereich Klimabox	20°C – 35 °C
Messfrequenz	1.6 kHz
Aufbau	C
Messdauer	10.800 s
Kanal 1	Beschleunigung
Kanal 2	Temperatur

Auf Grund der enormen Datenmenge werden die Daten auf 1-s-Mittelwerte zusammen gefasst. In Abbildung 41 sind in blau diese unkorrigierten Daten dargestellt. In grün ist die Temperatur aufgetragen. Man kann eindeutig eine Veränderung des Signals durch die sich veränderende Temperatur erkennen.

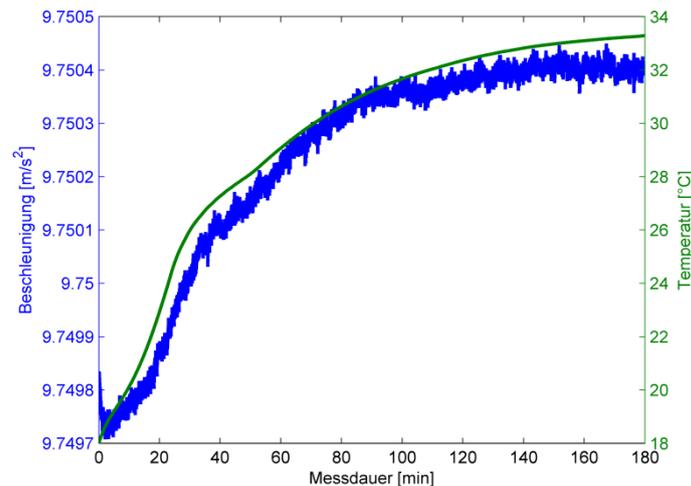


Abbildung 40: Beschleunigung und Temperatur, Messung Praxistest Temperaturkoeffizient

In Abbildung 40 ist in rot das Signal nach der angebrachten Korrektur dargestellt. Es sind offensichtlich Resteffekte vorhanden. Hier muss erwähnt werden, dass der Korrekturterm linear, und durch unabhängige Messungen in 5°C-Schritten berechnet wurde. Die starke Veränderung des Messsignals in den ersten 100 Minuten ist auch nach der Korrektur, allerdings in abgeschwächter Form erkennbar.

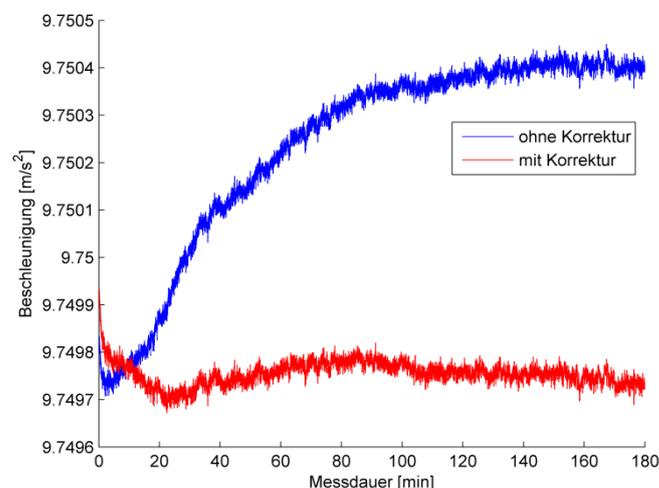


Abbildung 41: Beschleunigungssignal nach Temperaturkorrektur

8.2 Feldmessung Krugwehrbrücke

Die Krugwehrbrücke befindet sich im Naherholungsgebiet der Stadt Steyr, der Himmlitzer Au. Es ist eine reine Fußgängerbrücke mit einer Länge von ca. 87 Metern und führt über die Steyr (Abbildung 42). Die Brücke hat 5 Stützen die aus 2 Betonstehern, jeweils links und rechts des Brückendecks, besteht. Eine der Stützen ist an

Land, während die anderen Stützen in der ca. ein Meter tiefen Steyr stehen. Diese Steher sind durch Stahlträger verbunden, auf denen das eigentliche Holzbrückendeck liegt. Die Messungen werden direkt auf dem Deck gemacht.

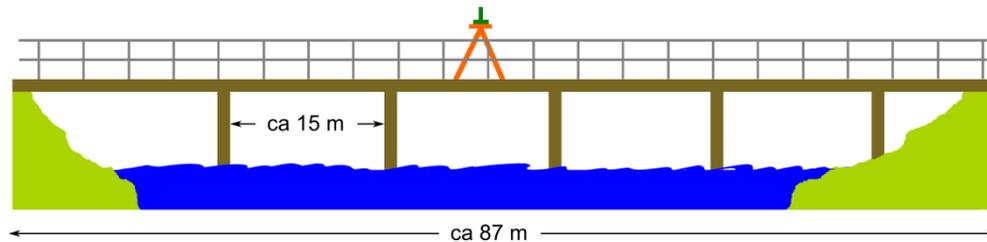


Abbildung 42: Skizze Krugwehr

Der Sensor wird in der Mitte der Brücke auf einem Industriestativ (siehe Abbildung 43) montiert. Der Sensor wurde wegen des schlechten Wetters mit einem Plastiksack geschützt. Die temperaturempfindlichen Komponenten des Messsystems werden in einer speziellen Messbox untergebracht. Diese Kiste ist aus Aluminium und für eine bessere Dämmung mit Styroporplatten ausgelegt. Außerdem wurde die Messbox mit Warmwasserkanistern warm gehalten. Die Temperatur in der Messbox wird mit Thermometern gemessen, während für den Sensor die interne Sensortemperatur verwendet wird.



Abbildung 43: Messung Brücke

8.2.1 Durchführung

Insgesamt werden 9 Messungen auf der Brücke durchgeführt. Während der Messungen wird versucht, die Brücke zum Schwingen anzuregen (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Messung Praxistest Krugwehrbrücke

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Einschalten Messsystem	2010/12/11 ca. 23h00								
Messbeginn	09h58	10h04	10h06	10h18	10h22	10h24	10h31	10h34	10h37
Messfrequenz	1.6 kHz								
Aufbau	D auf Brücke								
Messdauer [s]	100	35	100						
Kanal 1	Beschleunigung								
Kanal 2	Temperatur								
Gehen	x			x		x	x		x
Laufen			x		x			x	
Hüpfen / Hämmern				x		x	x		
sonstige		Wind				EF			

EF...Eigenfrequenz

Wie sich die einzelnen Anregungsarten in der Bewegung der Brücke zeigen, wird im Folgenden dargestellt.

8.2.2 Grundfrequenz der Brücke

Für eine genaue Interpretation der Messdaten ist es notwendig, die Grundfrequenz der Brücke zu kennen. Für die Bestimmung wurde die Brücke durch Hüpfen (siehe Abbildung 44a) in Schwingung versetzt. Die Brücke wurde am Rand des Brückendecks, also in ca. 40 m Entfernung, sechs mal mit je zwei Sekunden Abstand angeregt. Da die Einzelnen Blöcke des Hüpfens schwer zu trennen sind, wird das Spektrum für die gesamte Dauer berechnet. Die Auswertung der Messdaten ergibt Grundfrequenzen von 5.28 Hz und 7.81 Hz, wie in Abbildung 44b dargestellt ist.

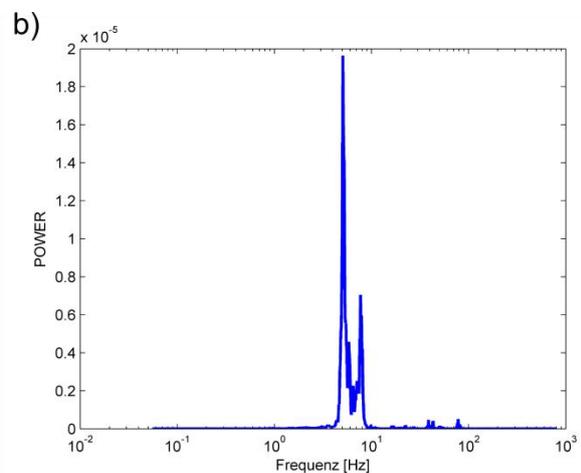


Abbildung 44: Eigenfrequenzen Brücke a) Anregung durch Hüpfen b) Powerspektrum

8.2.3 Hochpassfilter

Da die Messungen durch niederfrequente Anteile, also nicht linearen Driften, verfälscht sind, müssen diese herausgefiltert werden. Dies erfolgt durch einen Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz $F_{stop} = 0.8 \text{ Hz}$ und einer Durchlassfrequenz $F_{pass} = 1 \text{ Hz}$. Die restlichen Parameter des Filters sind Abschnitt 5.1 zu entnehmen. In Abbildung 44b sieht man, dass die Wahl dieser Koeffizienten legitim ist, da keine nennenswerten Frequenzen in diesem Bereich auftreten. In Abbildung 45 sieht man die Wegbestimmung vor und in Abbildung 46 nach dieser Filterung. Während sich vor dieser Filterung die Bewegung der Brücke bis auf vermeintliche 90 mm aufsummiert, erkennt man nach der Filterung eindeutig nur noch die Bewegungen der Brücke mit maximalen Amplituden von 0.4 mm. Es ist also für eine Analyse der Brückenbewegung unabdinglich, die niederfrequenten Anteile zu eliminieren.

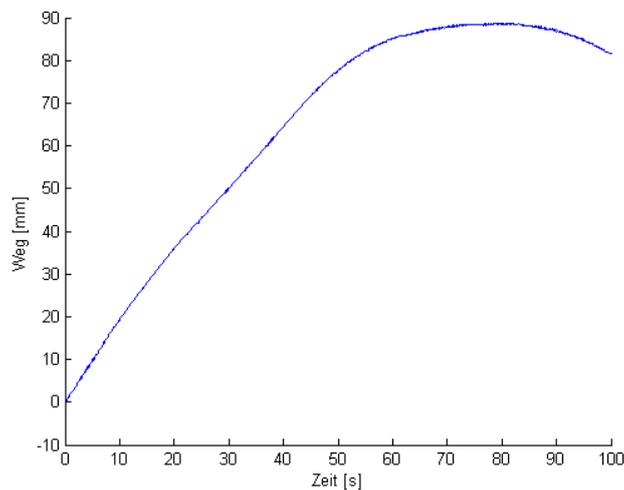


Abbildung 45: Messung 9, Wegbestimmung ohne Hochpassfilterung

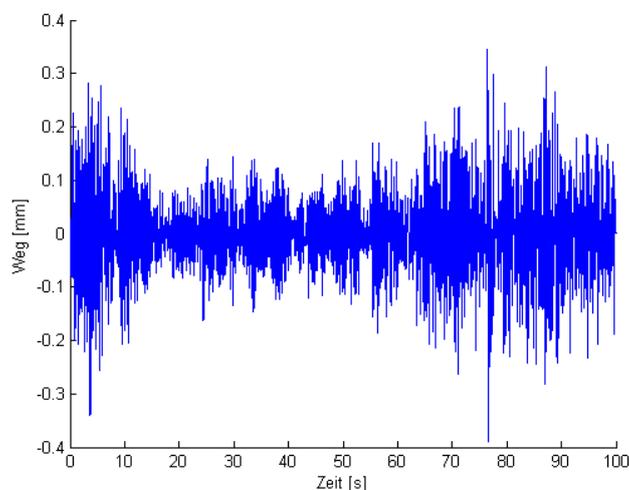


Abbildung 46: Messung 9, Wegbestimmung nach Hochpassfilterung

8.2.4 Bandstopfilter

Während der Messung 2 treten sehr hohe Amplituden auf, die womöglich nicht von der Brückenbewegung stammen, und eventuell gefiltert werden müssen. Während dieser Messung ist niemand auf der Brücke. Zu Beginn der Messung ist es windstill, bis nach ca. elf Sekunden der Wind sehr stark aufkommt. Da für die Erfassung des Windes kein Zusatzinstrumentarium verfügbar ist, wird vermutet, dass die Windrichtung der Flussrichtung entspricht, und der Wind orthogonal auf das Brückendeck trifft. Die gemessenen Beschleunigungen während der Windböen sieht man in Abbildung 47a (blau). Im Amplitudenspektrum (Abbildung 47b) sind ab ca. 25 Hz sehr hohe Amplituden zu erkennen, die wahrscheinlich nicht von den Brückenbewegungen stammen. Es wird vermutet, dass diese Signalanteile auf die Bewegung des Industriestativ zurückzuführen sind. Deshalb wird im Labor die Eigenfrequenz des Stativs bestimmt. Die Details für diese Messungen sind dem Anhang A zu entnehmen. Es hat sich herausgestellt, dass Frequenzen zwischen 25 und 80 Hz tatsächlich auf Bewegungen des Industriestativs zurückzuführen sind. Daher müssen diese Störbeschleunigungen herausgefiltert werden. Dies wird mit einem Bandstopfilter (siehe Tabelle 23) realisiert.

Tabelle 23: Parameter [FP] und Koeffizienten [Wert] Chebyshev-II-Bandstopfilter

FP	Wert
F_{stop1}	25 Hz
F_{pass1}	30 Hz
F_{pass2}	75 Hz
F_{stop2}	80 Hz
A_{stop1}	80 dB
A_{pass1}	1 dB
A_{stop2}	80 dB

Die Auswirkung des Filters kann man im Amplitudenspektrum erkennen. Die Amplituden nach der Filterung sind rot, während die Amplituden vor der Filterung blau dargestellt sind. In Abbildung 47d sieht man in der Wegbestimmung ein wesentlich realistischeres Ergebnis.

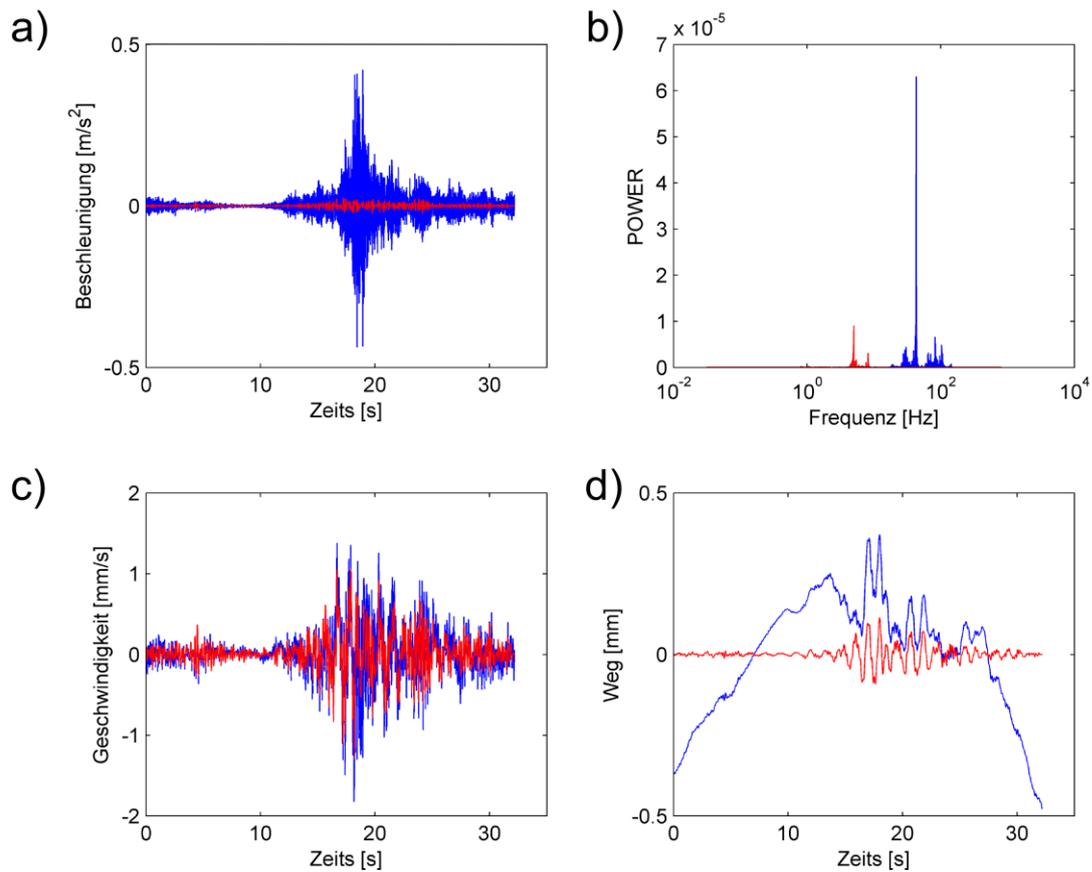


Abbildung 47: Beschleunigung und Spektrum bei Wind

Alle weiteren Messungen werden von den niederfrequenten Anteilen und den Stativbewegungen befreit.

8.2.5 Bewegung der Brücke durch Laufen

Bei der Messung 3 wird ca. 4 Sekunden nach Messbeginn vom Sensor Richtung Brückenrand gelaufen, um dort umzudrehen und zur anderen Seite der Brücke zurückzulaufen (siehe Abbildung 48).

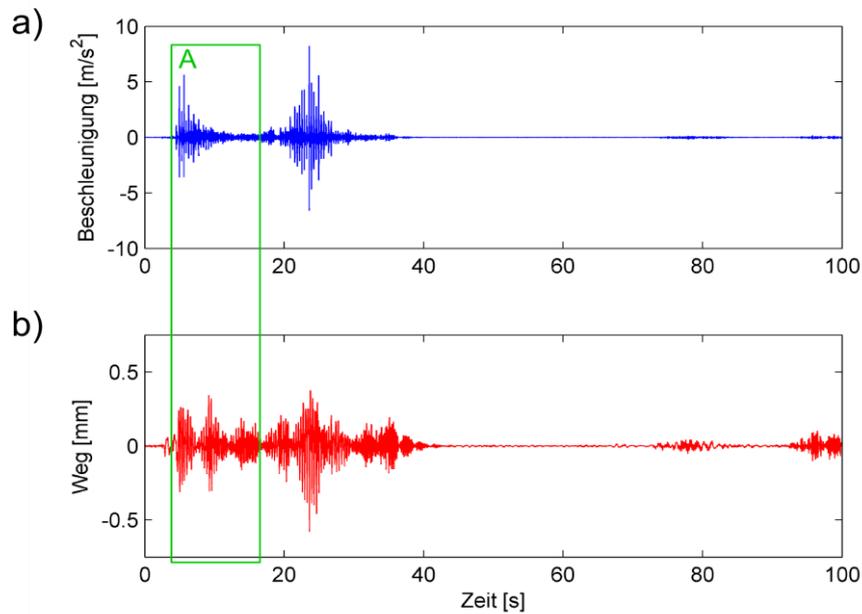


Abbildung 48: Messung 3 a) Beschleunigung b) Weg

Nach ca. 40 Sekunden wird die Brücke nicht mehr angeregt, nach ca. 70 Sekunden betritt eine Fußgängergruppe die Brücke. Durch das Laufen wird eine Maximalauslenkung der Brücke von 0.57 mm erreicht. In der Detailansicht (Abbildung 49) kann man die einzelnen Tritte (Schrittfrequenz ca. 3 Hz) gut erkennen. In Abbildung 49c sieht man, dass die Brücke zusätzlich in der Grundfrequenz (5.3 Hz) schwingt.

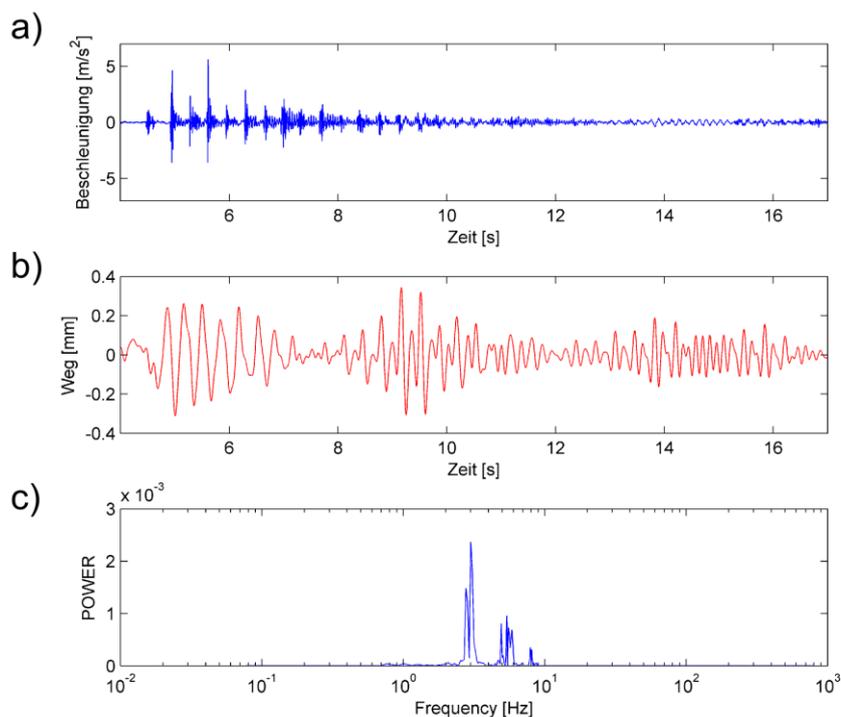


Abbildung 49: Messung 3 Detailansicht a) Beschleunigung b) Weg c) Powerspektrum

8.2.6 Anregung der Brücke durch Hüpfen

Bei dieser Anregung (Abbildung 50) wird zuerst am Brückenrand synchron von mehreren Personen gehüpft (Messung 7). Dies bewirkt in 40 m Entfernung immer noch eine Auslenkung von 0.63 mm, bei einer maximalen Beschleunigung von 0.84 m/s^2 . Nach 25 Sekunden wird unregelmäßig gesprungen. Dies bewirkt, dass die Amplituden sowohl in der Beschleunigung, vor allem aber in der Bewegung nicht mehr so hoch sind. Es wird eine maximale Amplitude von 0.18 mm festgestellt. In der Detailansicht (Abbildung 51) kann man gut erkennen, dass die Brücke nur noch in der Eigenfrequenz schwingt. Durch die große Dämpfung der Brücke wird die Amplitude allerdings sofort wieder abgeschwächt, ansonsten könnte sich die Bewegung durch diese Anregungsform aufschaukeln und die Brücke womöglich zerstört werden.

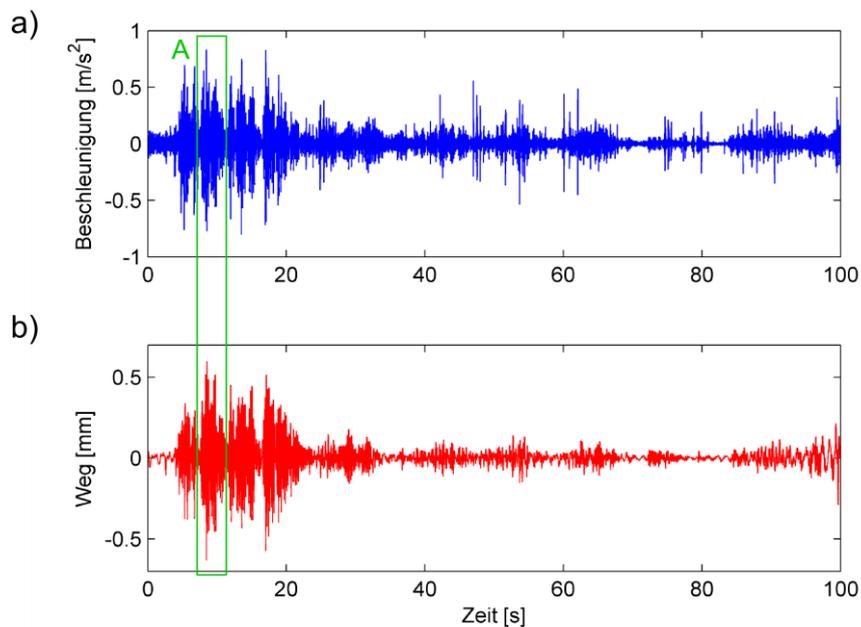


Abbildung 50: Messung 7 a) Beschleunigung b) Weg

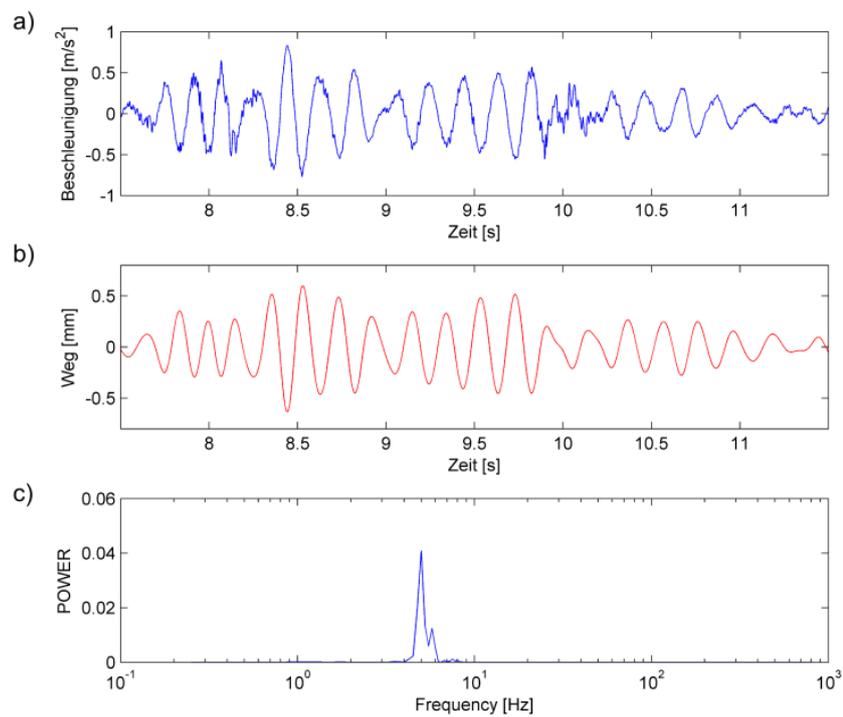


Abbildung 51: Messung 7 Detailansicht a) Beschleunigung b) Weg c) Powerpektrum

8.2.7 Bewegung der Brücke durch Gehen

Während der Messung 1 befinden sich mehrere Personengruppen auf der Brücke, maximal jedoch 8 Personen (siehe Abbildung 52).



Abbildung 52: Verkehr auf der Brücke

Es kann hier gezeigt werden, dass ohne mutwillige Anregung nur sehr geringe Beschleunigungen auftreten (Abbildung 52 Bereich A). Die maximale Amplitude liegt bei 0.04 mm.

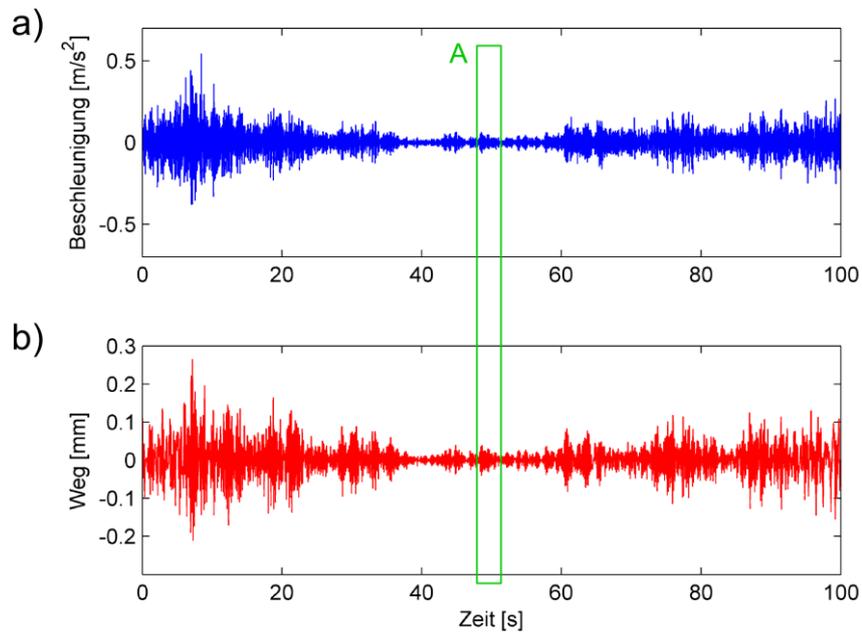


Abbildung 53: Messung 1 a) Beschleunigung b) Weg

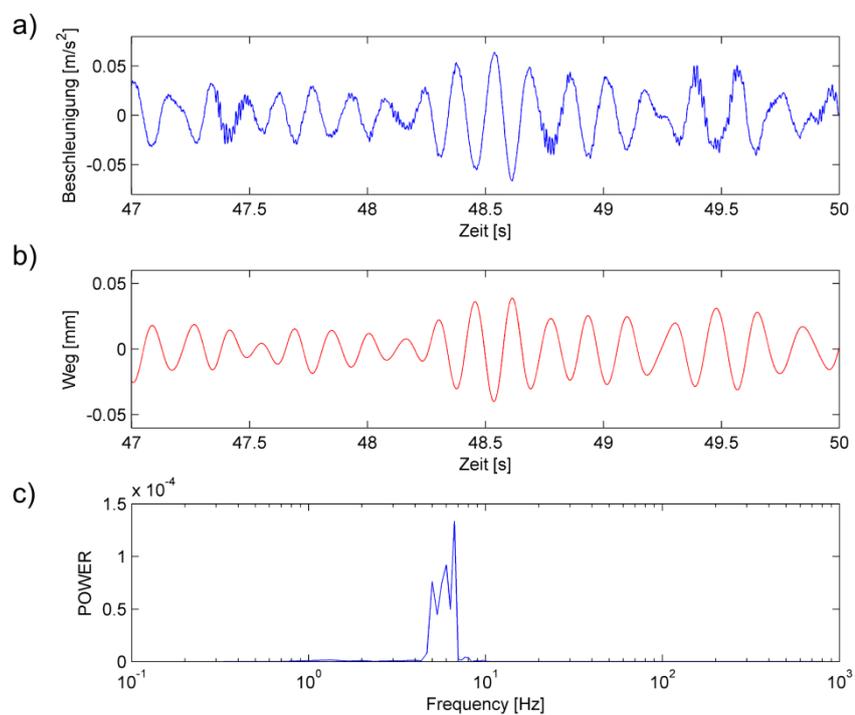


Abbildung 54: Messung 1 a) Beschleunigung b) Weg c) Powerspektrum

In der Detailansicht (Abbildung 54) wird ein Abschnitt mit sehr geringen Beschleunigungen ($\pm 0.05 \text{ m/s}^2$) gewählt. Man sieht, dass durch die geringe Anregung die Brücke in der zweiten Eigenfrequenz schwingt. Die Fußgänger gehen an dieser Stelle mit ca. 2 bis 3 Hz Schrittfrequenz über die Brücke. Dies ist allerdings nicht in den Messdaten erkennbar. Die Auslenkung erlangt nur noch 0.04 mm. Damit ist gezeigt, dass der Sensor auch sehr kleine Bewegungen noch wahrnehmen kann.

8.2.8 Zusammenfassen der Ergebnisse

Es werden von allen Messungen die Amplituden und die Frequenzen der Bewegungen bestimmt und in Gruppen zusammengefasst. Alle Messungen, die in diesem Kapitel noch nicht dargestellt sind, wurden in Anhang I abgelegt. Aus diesen Gruppen werden Ellipsen bestimmt, die in Abbildung 55 eingezeichnet wurden.

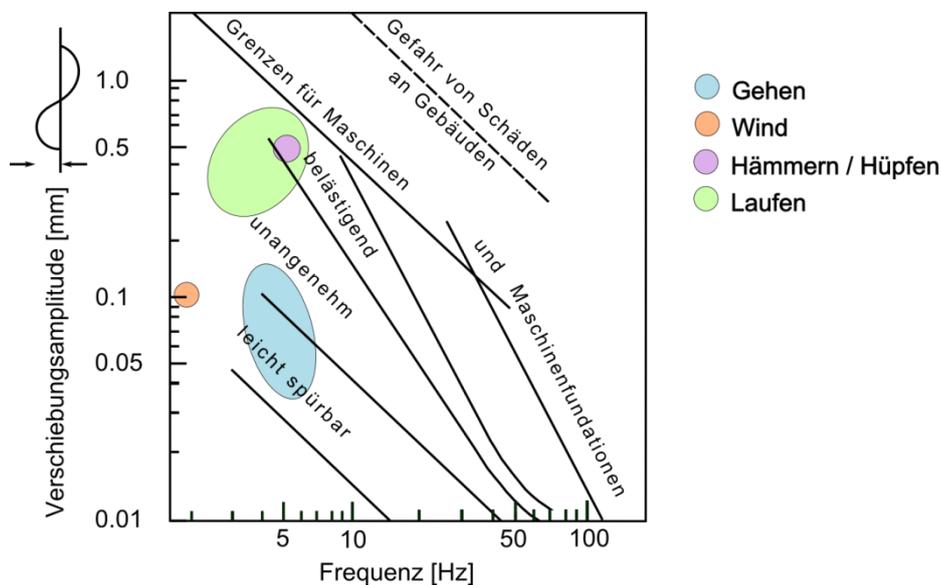


Abbildung 55: Auswirkung der Brückenbewegung

Normales Gehen auf der Brücke kann bereits spürbar sein bzw. sogar zu unangenehmen Vibrationen führen. Sogar ein Windstoß kann die Brücke so sehr in Schwingung versetzen, dass es für Menschen spürbar ist, allerdings ist die Frequenz so gering, dass es nicht als störend empfunden wird. Wird allerdings über die Brücke gelaufen oder gestampft, können die Schwingungen unangenehme bis belästigende Ausmaße annehmen. Bei den hier durchgeführten Messungen werden keine Bewegungen festgestellt die für das Bauwerk schädigende Ausmaße annehmen.

8.3 Praxistest Horizontalkomparator

Bei diesem Praxistest sollen die gewonnenen Erkenntnisse rund um die Korrektur des Messsignals einer fixen Referenz gegenübergestellt werden.

Dazu wird der Sensor auf dem Horizontalkomparator montiert, und über eine Strecke von ca. 20 m bewegt. Während dieser Fahrten wird neben den Beschleunigungen des Sensors die zurückgelegte Distanz auf der Komparatorbank vom Interferometer gemessen. Nach der Doppelintegration der Beschleunigungsdaten kann der zurückgelegte Weg mit den Interferometerdaten verglichen werden. Da die Daten des Horizontalkomparators über dieselbe Schnittstelle wie die Daten des Vertikalkomparators ausgelesen werden, ist die Auswertung analog zu Abschnitt 7.2.

8.3.1 Aufbau Messsystem

Bei den folgenden Versuchen wird das komplette Messsystem auf einem manuell beweglichen Messwagen montiert (siehe Abbildung 56). Die Stromversorgung erfolgte über zwei 12V-Batterien.

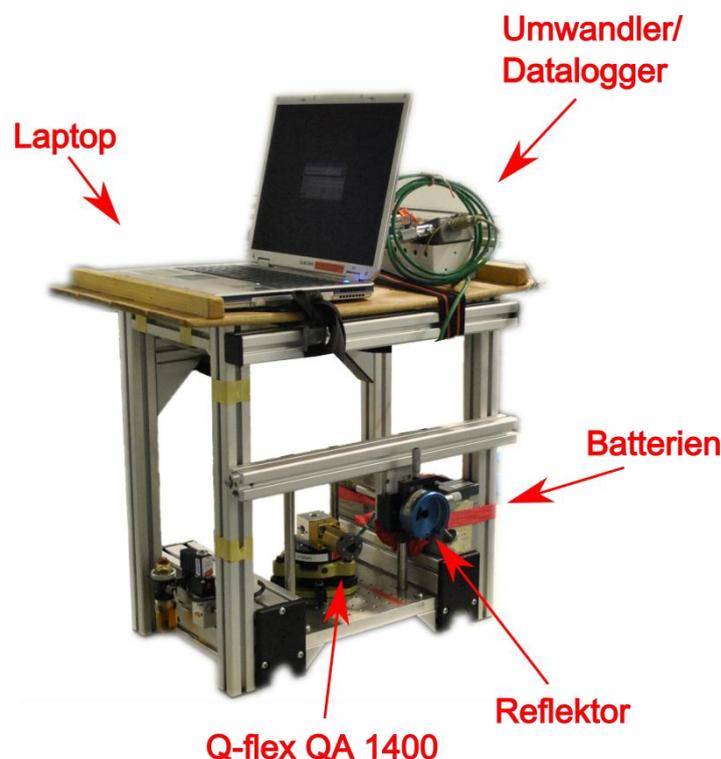


Abbildung 56: Aufbau Messsystem Horizontalkomparator

8.3.2 Ausrichten des Sensors

Da die Messachse des Sensors mit der Messachse des Horizontalkomparators zusammenfallen sollte, ist es notwendig, den Sensor möglichst in dieser Achse auszurichten, da ansonsten nicht die Beschleunigungen in der Fortbewegungsrichtung detektiert werden können. Die Horizontalausrichtung erfolgt mit einem Präzisionsreflektorträger. Die Ausrichtung in die Fortbewegungsrichtung wird mittels Kollimation erzeugt (siehe Abbildung 57). Dazu wurde ein Laserstrahl von einem Theodoliten auf einen Reflektor projiziert. Die orthogonale Ausrichtung des Laserstrahls zur Komparatorbank erfolgte durch Hrn. Dr. H. Woschitz. Der Reflektor wird auf den Beschleunigungssensor gehalten, um eine parallele Fläche zu erzeugen. Nun wird der Sensor so lange gedreht, bis die Laserstrahlen in der selben vertikalen Ebene sind. Dies wird an der Ablesevorrichtung an der Wand kontrolliert. Es wird geschätzt, dass durch dieses Verfahren der Sensor auf 1° genau, bedingt durch die Produktionsgenauigkeit des Gehäuses, ausgerichtet werden kann.

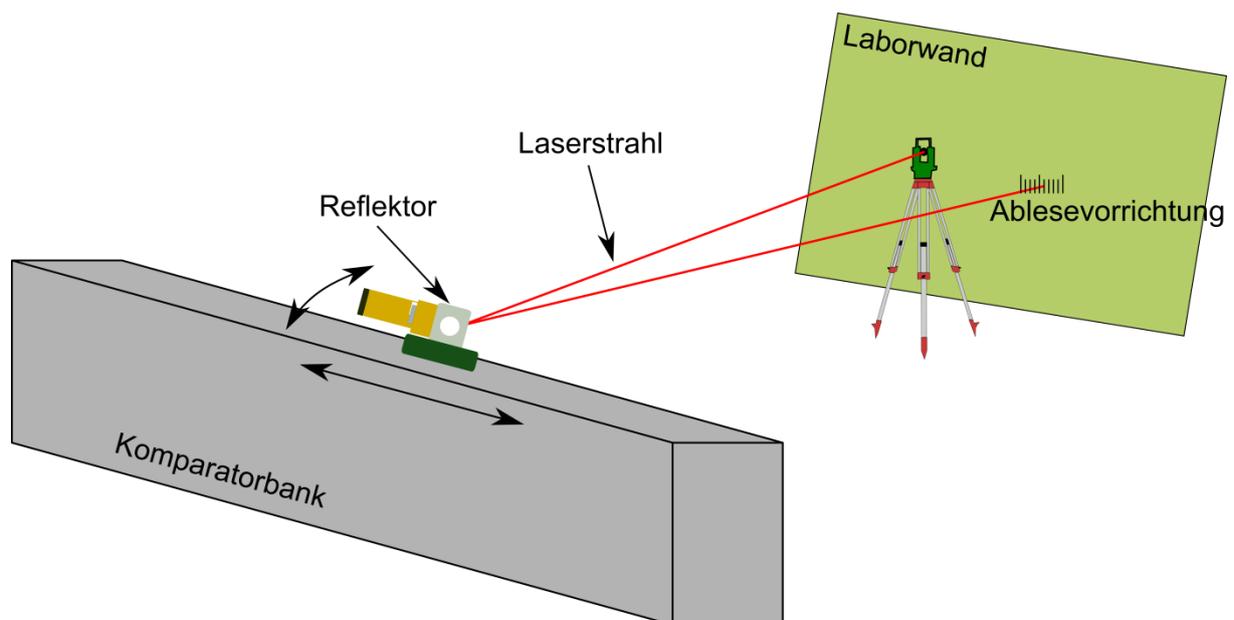


Abbildung 57: Ausrichten des Sensors entlang der Komparatorachse

Nach der Ausrichtung des Sensors werden die Messungen durchgeführt (siehe Tabelle 24). Der Sensor wird während der Messung auf der Komparatorbank bewegt, und kehrt vor dem Messende wieder in die Ausgangsposition zurück. Messung 1 und 2 werden sehr langsam über die ganze Strecke (ca. 21 m) durchgeführt. Bei den restlichen Messungen wird der Sensor in Schrittempo (ca. 0.6 m/s) bewegt. Dies führte bei Messung 4 und 5 zu einem LaserBeamInterrupt. Diese Messungen werden nicht für die Auswertung verwendet.

Tabelle 24: Messung Praxistest Horizontalkomparator

Messung	1	2	3	4	5	6
Einschalten Messsystem	2011/03/0907h53					
Messbeginn	11h15	11h18	11h31	11h37	11h40	11h44
Messfrequenz	3.1 kHz					
Messdauer [s]	163	142	89	53	55	49
Kanal 1	Beschleunigung					
Kanal 2	Temperatur					
LBI				x	x	

da im Zuge dieser Messungen der Einfluss der Coriolisbeschleunigung beobachtet wird, ist es notwendig für die Berechnung die Ausrichtung des Sensors im globalen Koordinatensystem zu kennen. Da die GK-Koordinaten der Messpfeiler des Labors bekannt sind (Moser, Pöchinger, 2007, S. 57) wird eine Einmessung der Komparatorbank im Labor durchgeführt. Durch das Einmessen der koordinativ bekannten Messpfeiler wird die Orientierung des Theodoliten zum GK-System bestimmt. Dies erfolgt durch Messungen zu den Pfeilern 2, 8, 10 und 11. Die Orientierungen werden entfernungsabhängig gewichtet in die Mittelwertberechnung eingeführt. Somit konnten die zwei Punkte (S1, S2) auf der Komparatorbank eingemessen werden, und über die zweite Hauptaufgabe die Ausrichtung der Komparatorbank bestimmt werden.

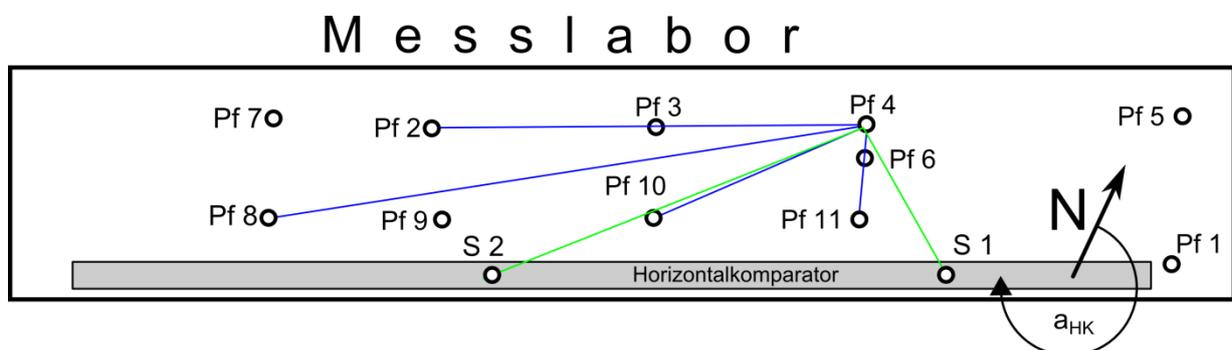


Abbildung 58: Skizze Einmessung der Komparatorbank im Messlabor

Die Berechnung der Ausrichtung wurde in MATLAB durchgeführt und ergibt:

$$a_{hk} = 245.31^\circ$$

Damit wird die auftretende Coriolisbeschleunigung berechnet und korrigiert (siehe Abschnitt 2.5).

Der horizontalisierte Sensor sollte nun lediglich das Messrauschen aufweisen, allerdings ist ein kleiner Offset (-0.0581 m/s^2) in den Messdaten vorhanden. Durch folgende Beziehung wird die Verkipfung des Sensors abgeschätzt:

$$\beta = \text{asin}\left(\frac{-0.0581}{NP}\right) = -0.3415^\circ \quad (8.1)$$

NP... Sensor vertikal ausgerichtet (9.7497 m/s^2)

Diese Verkipfung erscheint ob der Fertigungsgenauigkeit des Gehäuses als realistisch. Daher werden die Beschleunigungsdaten um den Offset korrigiert, um keine Genauigkeitseinbußen in der Wegbestimmung durch einen Offset in Kauf nehmen zu müssen (siehe Abschnitt 3.3.1).

Die Ergebnisse der Fahrten sind exemplarisch in Abbildung 59 für eine langsame Fahrt (ca. 0.3 m/s) und in Abbildung 60 für eine schnelle Fahrt (ca. 0.6 m/s) dargestellt. Es wird erkannt, dass die horizontale Wegbestimmung durch die getroffenen Kalibrierungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse bringt. Es müssen Fehler bis zu 20 cm nach einer Minute in Kauf genommen werden. Die Corioliskorrektur kann auf Grund der großen Differenzen nicht genauer untersucht werden.

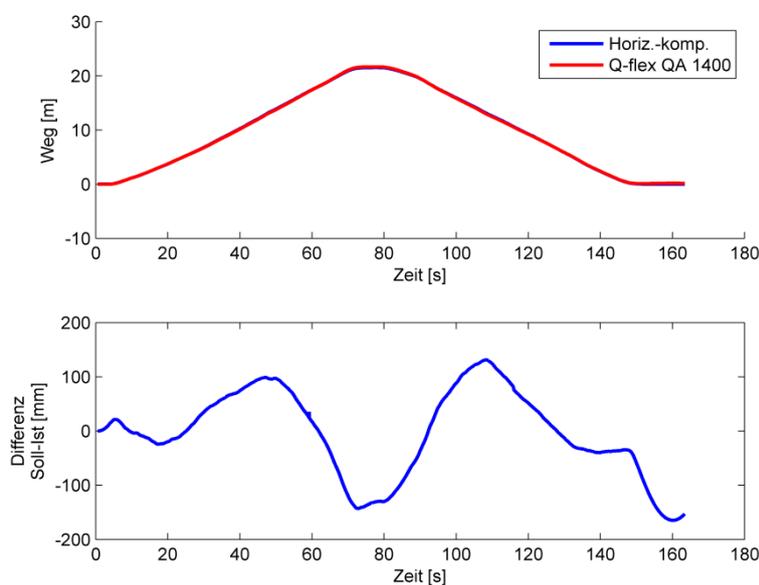


Abbildung 59: Messung 1; a) Wegbestimmung mit Q-Flex/Horizontalkomplkomparator b) Differenz

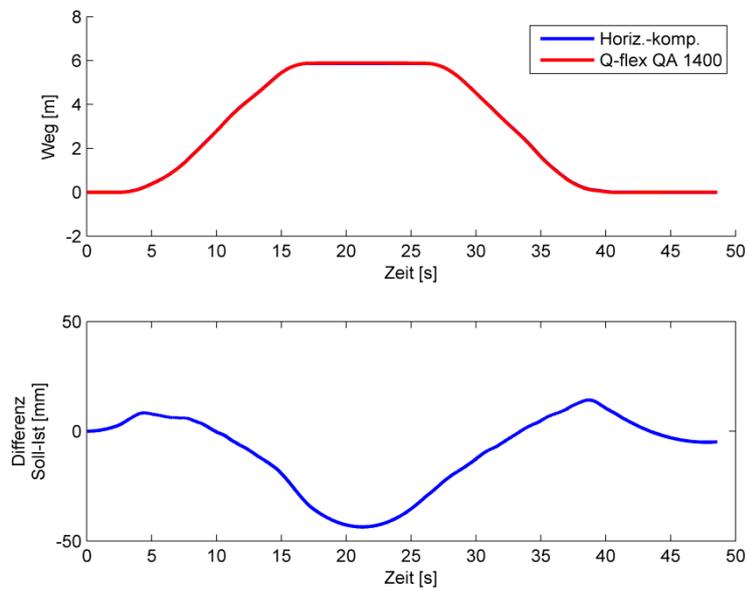


Abbildung 60: Messung 2; a) Wegbestimmung mit Q-Flex/Horizontalkomplkomparator b) Differenz

Da im Zuge dieser Arbeit alle Untersuchungen des Messsystems lediglich in vertikalem Aufbau erfolgten, kann der Störeinfluss bei der horizontalen Messung nicht abgeschätzt werden. Dies würde weitere Untersuchungen erfordern.

9. Schlussbetrachtung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde untersucht, ob es möglich ist, mit dem entworfenen Messsystem rund um den Beschleunigungssensor Q-Flex QA 1400 die Bewegung von Bauwerken zu detektieren. Eine zentrale Aufgabe war, die möglichen Fehlereinflüsse zu untersuchen und gegebenenfalls zu modellieren. Da es sich um einen einachsigen Sensor handelt, wurden nur die vertikalen Bewegungen von Brücken gemessen.

Es wurde ein Messsystem entworfen, welches die Wegbestimmung durch Beschleunigungsmessungen ermöglicht. Neben dem Beschleunigungssignal müssen für eine exakte Bestimmung auch die Ausrichtung des Sensors sowie der Breitengrad auf dem das Messsystem bedient wird, bestimmt werden. Der Sensor wurde entlang der lokalen Lotlinie ausgerichtet. Die Temperatur während der Messung wird sensorintern bestimmt, und für temperaturabhängige Korrekturen verwendet.

Der A/D-Wandler sowie sein Zusammenspiel mit der Messsoftware wurden im Labor untersucht, um eine fehlerfreie Übertragung des Signals zu gewährleisten. Der A/D-Wandler ist nicht nur auf Grund seiner hohen Messauflösung für dieses Projekt sehr gut geeignet, sondern auch wegen der Möglichkeit der direkten Übermittlung der rohen Messdaten. Dies wird von Konkurrenzprodukten oft nicht gewährleistet. Der Beschleunigungssensor wurde ebenfalls mehreren Untersuchungen im Labor unterzogen. Der Sensor zeigte sich anfänglich sehr sensibel auf etwaige Störfrequenzen, die bis zu einer totalen Zerstörung des Signals führten. Daher musste eine besondere Kabelschirmung angebracht werden, die es ermöglichte, „störungsfreie“ Signale zu generieren. Danach wurde der Sensor auf Driften, Nullpunktstabilität sowie Aufwärmeeffekte und Rauschen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass es eine signifikante Drift gibt, die berücksichtigt werden muss. Der Aufwärmeeffekt ist ebenfalls signifikant, daher sollte die ermittelte Aufwärmzeit eingehalten werden. Die Nullpunktstabilität variiert innerhalb des Sensorrauschens und kann daher vernachlässigt werden. Bei Vergleichen mit dem Vertikalkomparator stellte sich heraus, dass ein Maßstabsfaktor an das Signal angebracht werden muss. Alle diese Messungen wurden unter konstanten klimatischen Bedingungen im Labor durchgeführt. Vor allem für die Feldmessung war eine Bestimmung der Temperaturabhängigkeit notwendig. Diese Korrekturen wurden bei allen Berechnungen berücksichtigt.

Um aus den gemessenen Beschleunigungen auf den zurückgelegten Weg rückzuschließen zu können, war es nötig, verschiedene Auswerteschritte zu setzen. Da die Signale nur sehr hochfrequent aufgezeichnet werden konnten (mindestens

1612.9 Hz), wurden die Signale tiefpassgefiltert. Die Grenzfrequenz wurde bei Untersuchungen im Labor ermittelt. Es zeigte sich allerdings bald, dass diese Korrektur nicht ausreichend war, da die Wegbestimmung sehr großen Driften unterlag.

Da das Sensorsignal, wahrscheinlich wegen andauernder Aufheizungseffekte, weiterhin abdriftete, wurde zusätzlich eine Hochpassfilterung durchgeführt, welche die niederfrequenten Anteile (Drift) herausfilterte. Es konnte gezeigt werden, dass der Sensor durch die geeignete Wahl der Filter über eine Messdauer von 100 s keine Driften in der Wegbestimmung aufweist.

Bei der Feldmessung konnte gezeigt werden, dass der Sensor sehr geringe Bewegungen (μm -Bereich) mit stark variierenden Beschleunigungen der Brücke detektieren konnte.

Die gesamte Auswertung der Messdaten erfolgte im postprocessing und wurde mit dem Programm MATLAB durchgeführt.

Folgende Maßnahmen könnten eine Steigerung der Genauigkeit noch ermöglichen und sollten als Denkanstoß für weitere Projekte dienen:

- Der Versuch horizontale Messungen durchzuführen, erbrachte keine zufriedenstellende Ergebnisse. Hier könnten genauere Untersuchungen angestellt werden.
- Innerhalb dieser Arbeit wurden keinerlei Untersuchungen bezüglich Quereinflüssen gemacht. Das heißt, es kann nicht abgeschätzt werden, welche Signalteile wirklich entlang der Messachse aufgetretenen Beschleunigungen entsprechen.
- Der Sensor wurde lediglich für sehr geringe Bewegungen verwendet. Daher wäre es sinnvoll, Untersuchungen über größere Distanzen mit längeren Messzeiten durchzuführen.
- Die Wahl der Filtermethoden, durch die das Nutzsignal vom Störsignal getrennt wird, hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Genauigkeit. In dieser Masterarbeit wurde lediglich ein Filter verwendet.
- Die Montage des Sensors während der Feldmessung sollte im Vorhinein genauer untersucht werden, da ein Bauwerk unterschiedlich gedämpft ist und verschiedene Amplituden gemessen werden können.

Mit dieser Masterarbeit konnte gezeigt werden, dass mit relativ geringem Aufwand Bauwerke überwacht werden können. Ich hoffe, dass meine Arbeiten Anregung zu weiteren Projekten ist, die sich mit diesem Themengebiet beschäftigen. Letztlich würde ich mich freuen, wenn durch die gezielte Überwachung von Bauwerken effiziente Sanierung ermöglicht werden kann.

Referenzen

Literaturquellen

- BARTSCH H.-J. (2001) *Taschenbuch Mathematischer Formeln*, Carl Hanser Verlag, Leipzig, Germany.
- BREUER H. (1992) *dtv-Atlas zur Physik, Tafeln und Texte*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, Germany.
- BRUNNER F. K. (2008) *Skriptum zur Lehrveranstaltung Messtechnik 2008*, unpubliziertes Skriptum an der Technischen Universität Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme.
- BRUNNER F. K. (2009) *Skriptum zur Lehrveranstaltung Ingenieurgeodäsie 2009*, unpubliziertes Skriptum an der Technischen Universität Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme.
- BRUNNER F. K., LIENHART W. (2004) *Monitoring einer Brücke mit geodätischen Methoden und faseroptischen Sensoren*. In Ingensand H. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2004*, ETH Zürich Inst. f. Geodäsie u. Photogrammetrie, Switzerland, (81-92).
- GABRIEL M., STANGL C. (2008) *Ingenieurgeodäsie Projektstudien*, unpublizierter Technischer Bericht der Lehrveranstaltung IG-Projektstudien WS 2008/09, am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz.
- GERNOT B. (2008) *Vortrag an TU Graz, ASFINAG Brückenmanagement*, Alumni TU GRAZ, abgerufen am 18. September 2010 von http://alumni.tugraz.at/tug2/alumniTalks011_brandtner.pdf.
- HEIM M. O. (2010) *Untersuchung des faseroptischen Messsystems „SOFO Dynamic“*, unpublizierte Diplomarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Austria.
- HOFMANN-WELLENHOFF B., LEGAT K., WIESER M. (2003) *Navigation – principles of positioning and guidance*, Springer Verlag, Wien, Austria.
- MISTLER M., HEILAND D. (2007) *Lock-in-Effekt bei Brücken infolge Fußgängeranregung – Schwingungstest der weltlängsten Fußgänger- und Velobrücke*, unpublizierter Bericht, abgerufen am 30. Juli 2010 von <http://www.baudynamik.de>.

- MOSER F., PÖCHINGER M. (2007) *Präzisionsvermessung des Pfeilernetzes im Messlabor*, unpublizierte Bakkalaureatsarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, Austria.
- NEUHIERL T. (2005) *Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation*, Dissertation an der Technischen Universität München, Germany.
- NIEMEIER W. (2002) *Ausgleichsrechnung*, deGruyter Verlag, Berlin, Germany.
- OBERZAUCHER M. (2003) *Kontinuierliche Neigungsmessung entlang einer Bahntrasse*, unpublizierte Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme.
- OPPENHEIM A.V., SCHAFFER R.W. (1989) *Discrete-Time Signal Processing*, PrenticeHall International, London, Great Britain.
- PRESL R. (2005) *Beschleunigungsmessungen mit Q-Flex QA 1400*, unpublizierter Technischer Bericht, Ref.Nr. IGMS_2005_05, am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz.
- PRESL R. (2009) *Bestimmung der zulässigen elektrischen Bürde des Q-Flex QA 1400 Beschleunigungssensor*, unpublizierter Technischer Bericht, Ref.Nr.IGMS_2009_08, am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz.
- PRESL R. (2010) *Softwaredokumentation für NI9239 24bit ADC-Modul*, unpublizierter Technischer Bericht, Ref.Nr. IGMS_2010_13, am Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der Technischen Universität Graz.
- RICHART F.E., HALL J.R., WOODS R.D. (1970) *Vibrations of soil and foundations*, Prentice Hall International, London, Great Britain.
- STUDER J.A., KOLLER M.G., LAUE J. (1997) *Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*, Springer Verlag, Berlin, Germany.
- TABATABAEI N.M. (2008) *Zur inertialen Bahnvermessung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Bahnrobotern*, kassel university press, Kassel, Germany.
- WIESER A., BRUNNER F. K. (2004) *Deformationsmessung einer Schrägkabelbrücke*, In Schwarz W. (Hrsg.): *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen – Weimar 2004*, Wißner Verlag, DVW Schriftenreihe 46 (177-187).
- WITTE B., SCHMIDT H. (2000) *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, Germany

WOODMAN O.J. (2003) *An introduction to inertial navigation*, unpublizierter Technischer Bericht, Ref.Nr. UCAM-CL-TR-696, Institute Computer Laboratory, University of Cambridge.

WOSCHITZ H. (2009) *Untersuchung statischer Eigenschaften von Neigungssensoren*, Technisches Messen, Oldenburg Wissenschaftsverlag, Germany, Heft 76, 465-473.

WOSCHITZ H. (2003) *System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results*, Shaker Verlag, Aachen.

WUNDERLICH T., STEMPFHUBER W., WASMEIER P. (2004) *Bestimmung der Geometrie der Führungsschiene des Drehrestaurant am Münchner Olympiaturm und kinematische Prüfung der Rundlaufqualität*, In Ingensand H. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2004, ETH Zürich Inst. f. Geodäsie u. Photogrammetrie, Switzerland (307-312).

WUNDERLICH T. (2006) *Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit*, in Vermessung & Geoinformation, 94. Jahrgang, Heft 1+2 (50-62).

Manuels des Messsystems

HONEYWELL (2005) *Q-Flex-QA 1400 Accelerometer*, abgerufen am 6.Juli 2009 von <http://www.honeywell.com>, Version vom 25.August 2005.

MWS (2003) *Q-Flex MODEL DATA SHEET*, erhalten per Fax am 17. Februar 2003

NATIONAL INSTRUMENTS (2010) *4-Channel 24-Bit Analog Input Modules*, abgerufen am 27. Juli 2010 von <http://www.ni.com>, Version vom 9.März 2010.

POWERTRON (2010) *Elektronische Bürde USR 2-1410*, abgerufen am 22. Jänner 2010 von http://www.vishaypg.com/docs/64221/usr_unr.pdf, Version vom 20. September 2010.

Internetquellen

BLICK (2011) abgerufen von <http://www.blick.ch/news/ausland/die-gefaehrlichste-bruecke-der-welt-147429> am 22. Jänner 2011

CORNELSEN (2010) abgerufen von <http://www.cornelsen.de/physikextra/htdocs/-Resonanz.html> am 4. August 2010

REICHSTRUECKE.NET (2010) abgerufen von <http://www.reichstruecke.net/ergebnisse.php> am 1. Juli 2010.

WIKIPEDIA (2010) abgerufen von <http://de.wikipedia.org/wiki/Twisted-Pair-Kabel> am 5. August 2010

WIKIPEDIA (2011) abgerufen von <http://de.wikipedia.org/wiki/Tacoma-Narrows-Brücke> am 14. Jänner 2011

Anhang A - Ermittlung der Eigenfrequenzen

Eigenfrequenz des Messpfeilers

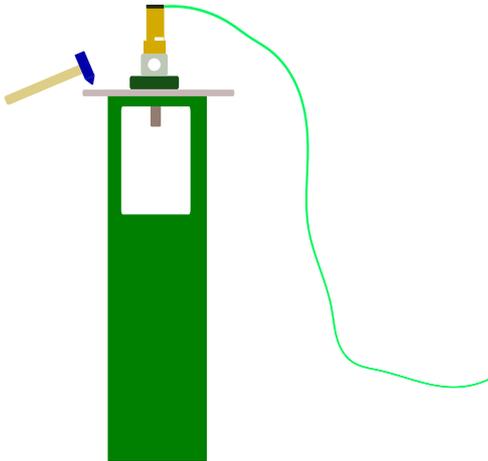


Abbildung 61: Ermittlung der Eigenfrequenz

Um den sehr dominanten Störsignalen ihren Ursachen zuordnen zu können, werden mehrere Versuche gemacht, in denen die Eigenfrequenz des Messpfeilers bestimmt wird. Um die Eigenfrequenz ermitteln zu können, ist es notwendig, den Messpfeiler (auf dem der Sensor montiert ist) durch Impulse zum Schwingen anzuregen. Diese Impulse werden durch Klopfen mit einem Hammer auf den Messpfeiler erzeugt. Die Schwingungen werden mit dem Beschleunigungssensor gemessen. Da sofort der Sättigungsbereich des Sensors

erreicht wird, ist ein zweiter Versuch mit einem gedämpften Erreger notwendig. Beide Versuche werden für die Frequenzanalyse verwendet (siehe Tabelle 25). Für die Frequenzanalyse werden die rohen Beschleunigungswerte in Volt [V] herangezogen, da die Transformation in Beschleunigung [m/s^2] bzw. eine Trendelimination keine Vorteile bringen würde.

Tabelle 25: Messparameter der Tests zu „Eigenfrequenz Messpfeiler“

Messparameter	Messung 1	Messung 2
Einschalten Messsystem	2010/08/06 08h08	
Messbeginn	2010/10/11 08h11	2010/10/11 08h13
Messfrequenz	3.1 kHz	
Aufbau	A	
Messdauer	30 s	
Kanal 1	Beschleunigung	
Kanal 2	Temperatur	

Die genaue Bestimmung der Eigenfrequenz ist nicht notwendig, da lediglich Frequenzteile im Amplitudenspektrum zugeordnet werden sollen, werden lediglich die einzelnen Impulse ausgeschnitten (Abbildung 62) und mittels Kreuzkorrelation zur Deckung gebracht. Danach werden die deckungsgleichen Anteile der Signale aufsummiert. Dies bewirkt eine Verstärkung von systematischen sowie einer Unterdrü-

ckung von zufälligen (Rauschen) Signalanteilen (Gabriel und Stangl, 2008). Legitimiert wird diese Vorgehensweise auf Grund der Tatsache, dass dieses Verfahren eine Verstärkung der Amplituden bewirkt und keinerlei Einfluss auf die auftretenden Frequenzen hat.

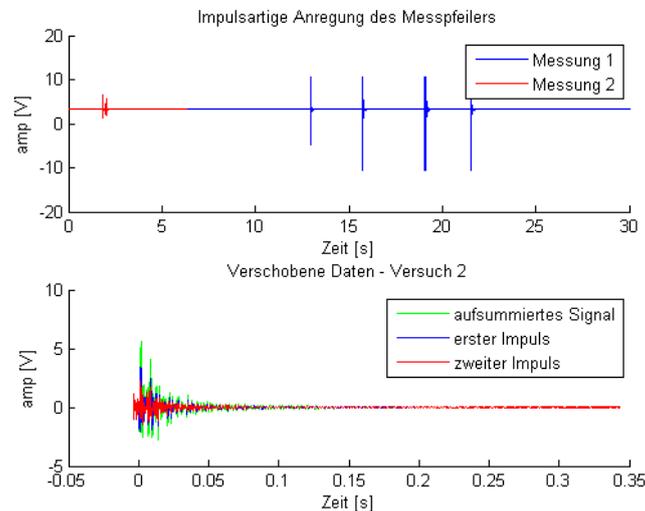


Abbildung 62: Impulsartige Anregung des Messpieilers

Die Frequenzanalyse (Abbildung 63) der beiden Versuche ergibt, dass der Messpieiler sehr starken Schwingungen > 300 Hz unterliegt. Die maximale Amplitude tritt im Versuch 1 bei 439 Hz und im Versuch 2 bei 448 Hz auf. Es muss darauf hingewiesen werden, dass beide Spektren eine Frequenzauflösung von ca. 5 Hz haben, daher wird die Eigenfrequenz mit ca. 440 Hz angenommen. Die erste Oberschwingung liegt bei ca. 720 Hz. Diese Frequenzen müssen bei Rauschmessungen auf jeden Fall unterdrückt werden, damit die Schwingungen des Messpieilers das Signal nicht beeinflussen.

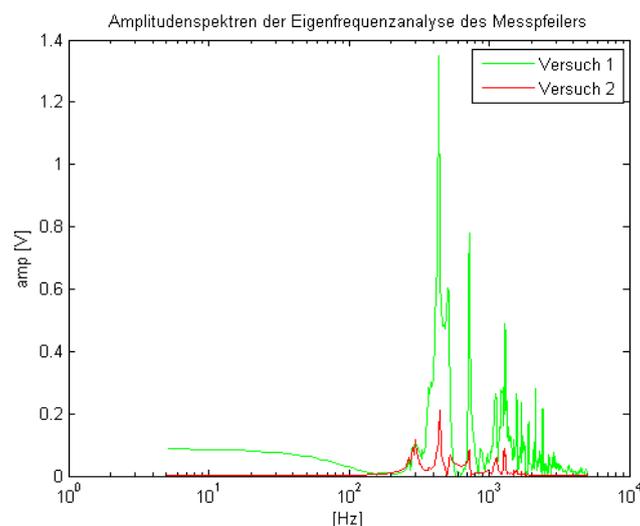


Abbildung 63: Amplitudenspektren Impulsanregungen

Bestimmung der Eigenfrequenz – Industriestativ

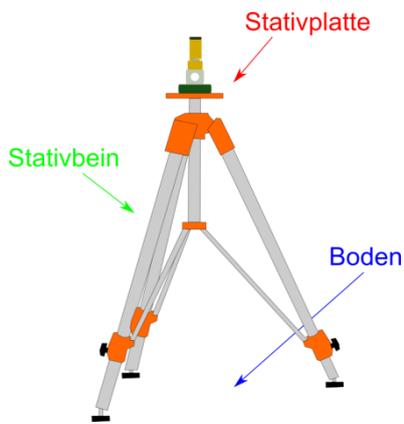


Abbildung 64: Industriestativ

Da sich bei der Auswertung der Feldmessung Unschlüssigkeiten bezüglich auftretender Frequenzen an den Beschleunigungsdaten ergaben, wird im Messlabor die Eigenfrequenz des Industriestatives bestimmt. Dies erfolgte durch drei Versuchsreihen mit je zehn Anregungen (siehe Tabelle 26). Beim ersten Versuch (Abbildung 64 blau) wurde neben dem Stativ auf dem Boden fest aufgetreten, beim zweiten Versuch wird die Stativplatte, auf der der Sensor aufgeschraubt ist, durch leichtes Klopfen in Schwingung gebracht und beim dritten Versuch werden die Stativbeine durch Klopfen in Schwingung versetzt. Alle drei Anregungsarten ergeben

in unterschiedlichen Amplituden Maximalfrequenzen von 50 Hz (siehe Abbildung 65).

Tabelle 26: Messparameter der Tests zu „Eigenfrequenz Industriestativ“

Messparameter	Messung 1	Messung 2	Messung 3
Einschalten Messsystem	20111/01/10 08h55		
Messbeginn	20111/01/10 08h59	20111/01/10 09h00	20111/01/10 09h03
Anregung	Stativplatte	Stativbein	Boden
Messfrequenz	3.1 kHz		
Aufbau	A		
Messdauer	30 s		
Kanal 1	Beschleunigung		
Kanal 2	Temperatur		

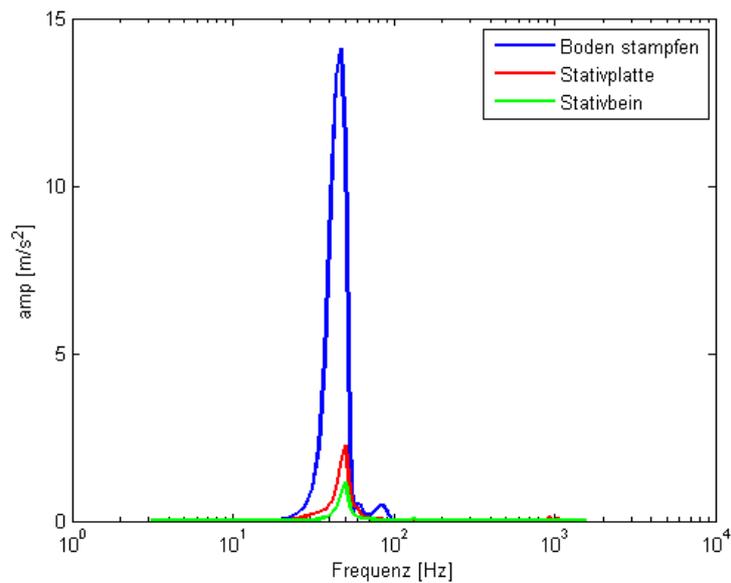


Abbildung 65: Eigenfrequenzen - Industriestativ

Um diese ungewünschten Bewegungen bei der Auswertung herauszufiltern, wird ein Bandstoppfilter erstellt. Dies wird durch den Matlab-Befehl ‚fdatool‘ realisiert. Es handelt sich um einen Chebychev-II-Bandstopp-Filter, mit einer Bandsperre von 25 bis 80 Hz.

Anhang B - Herleitung der Varianzfortpflanzung der Coriolisbeschleunigung

Um die Auswirkung der Eingangsgrößen auf die Coriolisbeschleunigung abschätzen zu können, wird im ersten Schritt die Geschwindigkeit des Sensors in Nord- (v_n), Ost- (v_e) und Zenitrichtung (v_u) aufgeteilt:

$$\begin{pmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{pmatrix} = |v| \cdot \begin{pmatrix} \cos A \sin Z \\ \sin A \sin Z \\ \cos Z \end{pmatrix} \quad (B.1)$$

$|v|$... Geschwindigkeit
 A ... Azimut
 Z ... Zenitdistanz

Die Coriolisbeschleunigung als Vektorschreibweise (abgeleitet von Formel 2.5):

$$a_c = 2 \cdot \omega \cdot \begin{pmatrix} v_n \sin \varphi - v_u \cos \varphi \\ -v_e \sin \varphi \\ v_e \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (B.2)$$

φ ... geographische Breite
 ω ... Erddrehrate

Da mit dem vorliegenden System nur in einer Achse gemessen werden kann, wird von Formel B.2 die Norm gebildet:

$$|a_c| = 2 \cdot \omega \cdot \sqrt{v_n^2 \sin^2 \varphi - v_n v_u \sin 2\varphi + v_u^2 \cos^2 \varphi + v_e^2} \quad (B.3)$$

Durch Einsetzen der Geschwindigkeitskomponenten (B.1) erhält man:

$$|a_c| = 2\omega \cdot |v| \cdot \sqrt{\cos^2 A \sin^2 Z \sin^2 \varphi - \cos A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \cos^2 Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A \sin^2 Z} \quad (B.4)$$

Nun kann nach den Eingangsgrößen ($|v|$, A , Z , φ) differenziert werden:

$$\frac{\partial |a_c|}{\partial |v|} = 2\omega \cdot \sqrt{\cos^2 A \sin^2 Z \sin^2 \varphi - \cos A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \cos^2 Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A \sin^2 Z} \quad (B.5)$$

$$\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial \varphi} = 2\omega \cdot |v| \cdot \frac{\cos^2 A \sin^2 Z \sin 2\varphi - \cos A \sin Z \cos Z 2\cos 2\varphi - \cos^2 Z \sin \varphi}{\sqrt{\cos^2 A \sin^2 Z \sin^2 \varphi - \cos A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \cos^2 Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A \sin^2 Z}} \quad (B.6)$$

$$\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial A} = 2\omega \cdot |v| \cdot \frac{-\sin 2A \sin^2 Z \sin^2 \varphi + \sin A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \sin 2A \sin^2 Z}{\sqrt{\cos^2 A \sin^2 Z \sin^2 \varphi - \cos A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \cos^2 Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A \sin^2 Z}} \quad (B.7)$$

$$\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial Z} = 2\omega \cdot |v| \cdot \frac{\cos^2 A \sin 2Z \sin^2 \varphi + \cos A 2\cos Z \sin 2\varphi - 2\sin Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A 2 \sin 2Z}{\sqrt{\cos^2 A \sin^2 Z \sin^2 \varphi - \cos A \sin Z \cos Z \sin 2\varphi + \cos^2 Z \cos^2 \varphi + \sin^2 A \sin^2 Z}} \quad (B.8)$$

$$d|a_{cl}| = \frac{\partial |a_{cl}|}{\partial |v|} \cdot d|v| + \frac{\partial |a_{cl}|}{\partial \varphi} \cdot d\varphi + \frac{\partial |a_{cl}|}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial |a_{cl}|}{\partial Z} \cdot dZ \quad (B.9)$$

Nun werden die Differentiale durch die Standardabweichungen ersetzt und quadriert. Da die Messgrößen unabhängig bestimmt werden, sind die Kovarianzen $\sigma_{xx} = 0$ und es bleibt die Summe der Einzelquadrate.

$$\sigma_{ac}^2 = \left(\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial |v|}\right)^2 \cdot \sigma_{|v|}^2 + \left(\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial \varphi}\right)^2 \cdot \sigma_{\varphi}^2 + \left(\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial A}\right)^2 \cdot \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial |a_{cl}|}{\partial Z}\right)^2 \cdot \sigma_Z^2 \quad (B.10)$$

- σ_{ac}^2 ... Varianz Coriolisbeschleunigung
- σ_v^2 ... Varianz Geschwindigkeit
- σ_{φ}^2 ... Varianz geographische Breite
- σ_A^2 ... Varianz Azimut
- σ_Z^2 ... Varianz Zenitdistanz

Die Berechnungen wurden mit der eigens erstellten MATLAB-Funktion ‚corred‘ durchgeführt.

Anhang C – Eignung des Horizontalkomparators für Kalibriermessfahrten

Da das Messsystem (siehe Kapitel 4) über einen sehr niedrigen Messbereich (ca. ± 3 g) verfügt, stößt der Sensor sehr schnell an seine Grenzen, und das Messsignal beharrt im Maximalzustand, da solche Beschleunigungen impulsartig sehr leicht verursacht werden können. Deswegen muss nun überprüft werden, ob sich der Sensor dazu eignet, mittels Messfahrten auf dem Horizontal- oder Vertikalkomparator untersucht oder gar kalibriert werden kann. Die maximale Geschwindigkeit bei manueller Verschiebung ist mit etwa 2 m/s bekannt, allerdings nicht die auftretenden Beschleunigungen auf der Messbank. Daher werden existierende Messdaten analysiert, um Informationen über die maximal auftretenden Beschleunigungen zu erhalten. Es wurden sieben Messfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. In Abbildung 66 sind die zwei Messfahrten mit der höchsten bzw. der geringsten Geschwindigkeit sowie Beschleunigung dargestellt. Es ist also mit Beschleunigungen zu rechnen, die deutlich unterhalb des maximalen Messbereichs liegen.

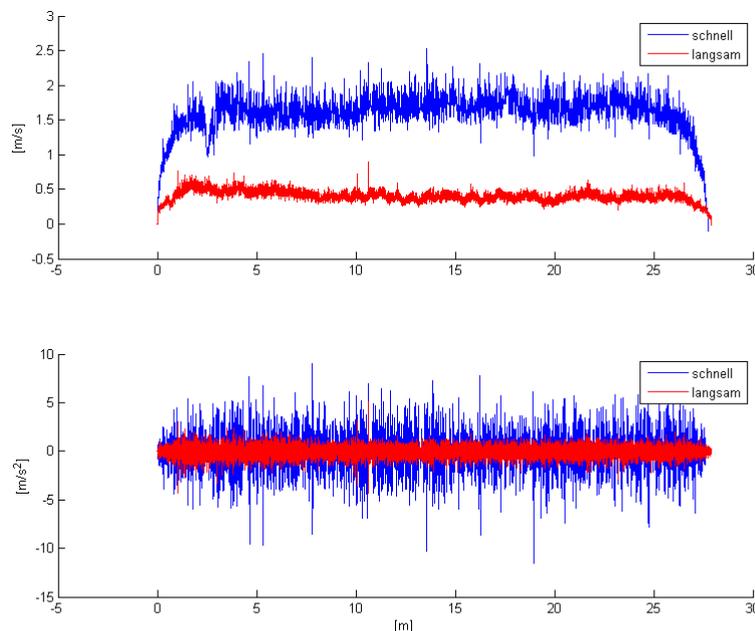


Abbildung 66: Ausgewählte Messfahrten auf der Komparatorbank; Geschwindigkeit (oben) und Beschleunigung (unten) von Interferometermessungen abgeleitet

Das heißt, dass sowohl die maximalen Amplituden vom Messsystem aufgelöst als auch Testfahrten auf der Komparatorbank durchgeführt werden können. Auch eine

Beschädigung des Sensors durch Erreichen des Sättigungsbereichs (ca. ± 25 g) ist somit ausgeschlossen.

Anhang D - Bestimmung einer linearen Drift

Es soll untersucht werden, welchen linearen Driften der Sensor unterliegt, und sich der Sensor für die Wegbestimmung eignet oder diese Driften so signifikant sind, dass mit diesem Sensor kein zufriedenstellendes Ergebnis mehr erzielt werden kann.

Es wird nach dem Prinzip des Vermittelnden Ausgleichs eine best anliegende lineare Funktion geschätzt und die Residuen zwischen den Messwerten und dem Trend berechnet. Die Standardabweichung der Residuen wird mit der Standardabweichung des Sensors (Abschnitt 6.2.5) verglichen. Dies wird durch einen Chi-Quadrat-Test realisiert, wobei die Testgröße wie folgt berechnet wird:

$$\chi^2 = f \cdot \frac{s^2}{\sigma^2} \quad (\text{C.1})$$

χ^2 ... Testgröße
 f ... Freiheitsgrad
 s^2 ... Standardabweichung der Residuen
 σ^2 ... Standardabweichung des Sensors

Der Test erfolgt einseitig mit einem Signifikanzniveau von 95 %. Wenn

$$\chi^2 \leq \chi_{0,95,f}^2 \quad (\text{C.2})$$

gilt, ist die Standardabweichung der Residuen zu 95 % kleiner gleich der theoretischen und somit unterscheiden sich die Messwerte nicht signifikant vom Trend. Dies wird im Allgemeinen jedoch nicht zutreffen und somit müssen Ausreißer eliminiert werden. Dies erfolgt wieder statistisch mittels Student-t Test (Mittelwerttest mit empirischer Standardabweichung). Es wird untersucht, ob sich die Residuen signifikant von $\mu = 0$ unterscheiden. Dieser Test wurde zweiseitig durchgeführt. Das Konfidenzintervall mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0.1$ % lautet:

$$P\{-t_{f,1-\alpha/2} \cdot s \leq \mu \leq t_{f,1-\alpha/2} \cdot s\} = 1 - \alpha \quad (\text{C.3})$$

t ... Testgröße
 μ ... Mittelwert
 α ... Irrtumswahrscheinlichkeit

Jene Messwerte, deren Residuen sich nicht in diesem Konfidenzintervall befinden, werden eliminiert. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis die Standardabweichung der Residuen der verbleibenden Messwerte der Messgenauigkeit entspricht. Alle Formeln dieses Abschnitts wurden Witte und Schmidt (2000) entnommen.

Anhang E - Hochfrequente Anteile

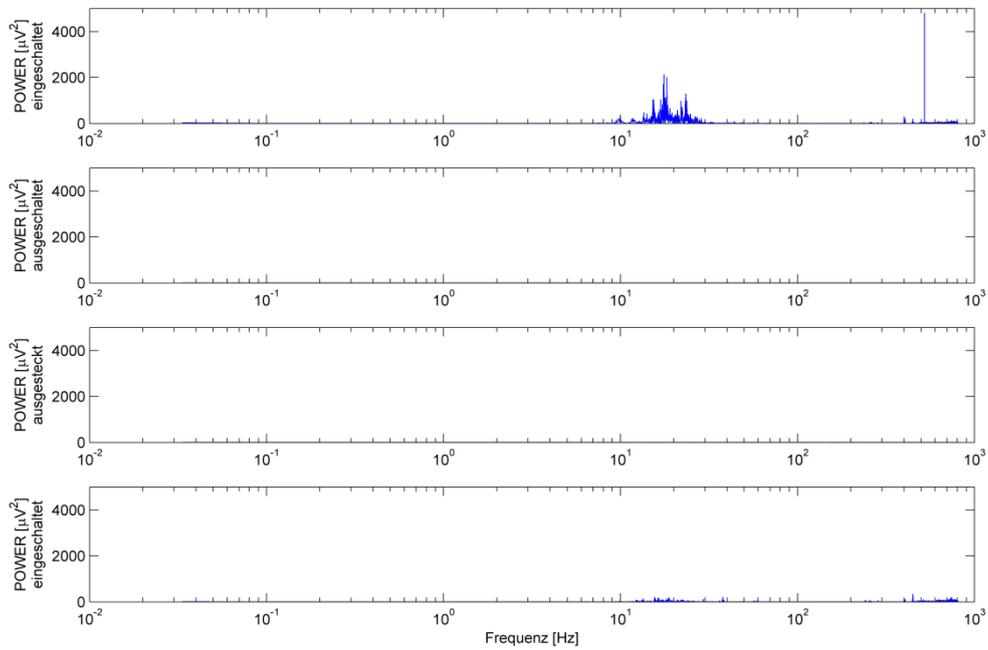


Abbildung 67: Zuordnung der hochfrequenten Anteile – 1.6 kHz

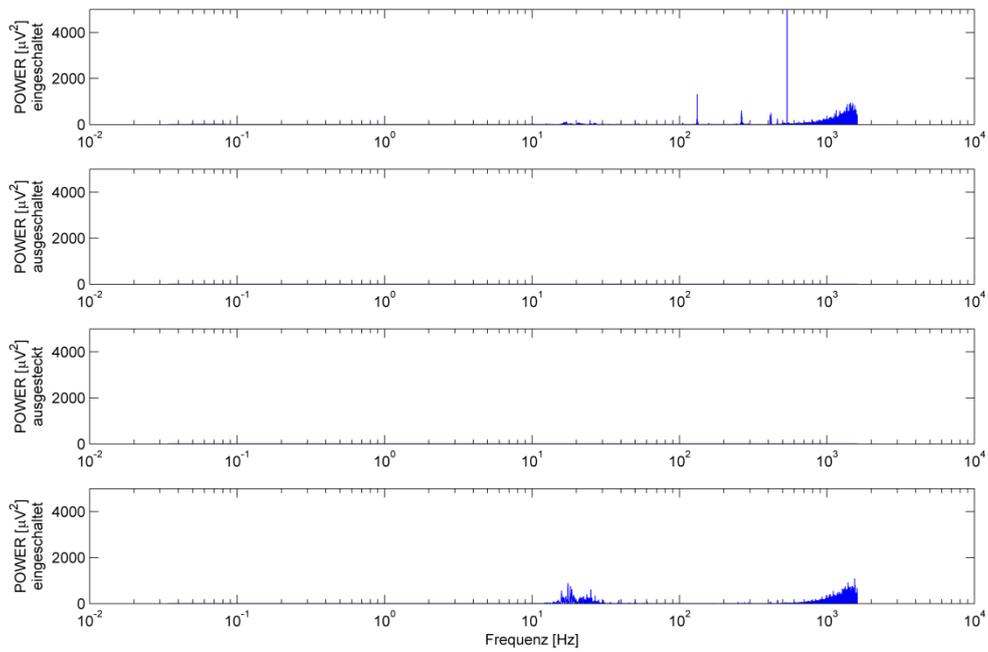


Abbildung 68: Zuordnung der hochfrequenten Anteile – 3.1 kHz

Anhang F - Wiederholung Reproduzierbarkeit Messsignal

Nach Beendigung aller Messungen für diese Arbeit wird die Umschlagsmessung wiederholt, um sicherzustellen, dass der Sensor während der Messungen nicht zerstört oder systematisch beeinflusst wird. Es werden 12 Messreihen mit je 3 Messungen zu 10 Sekunden und der Messfrequenz 3.1 kHz durchgeführt. Die Schwankung des Nullpunkts liegt auch hier wie bei dem Versuch in Abschnitt 6.2.9 innerhalb der Messgenauigkeit von $\pm 3 \mu\text{g}$. Es werden keine systematischen Einflüsse festgestellt.

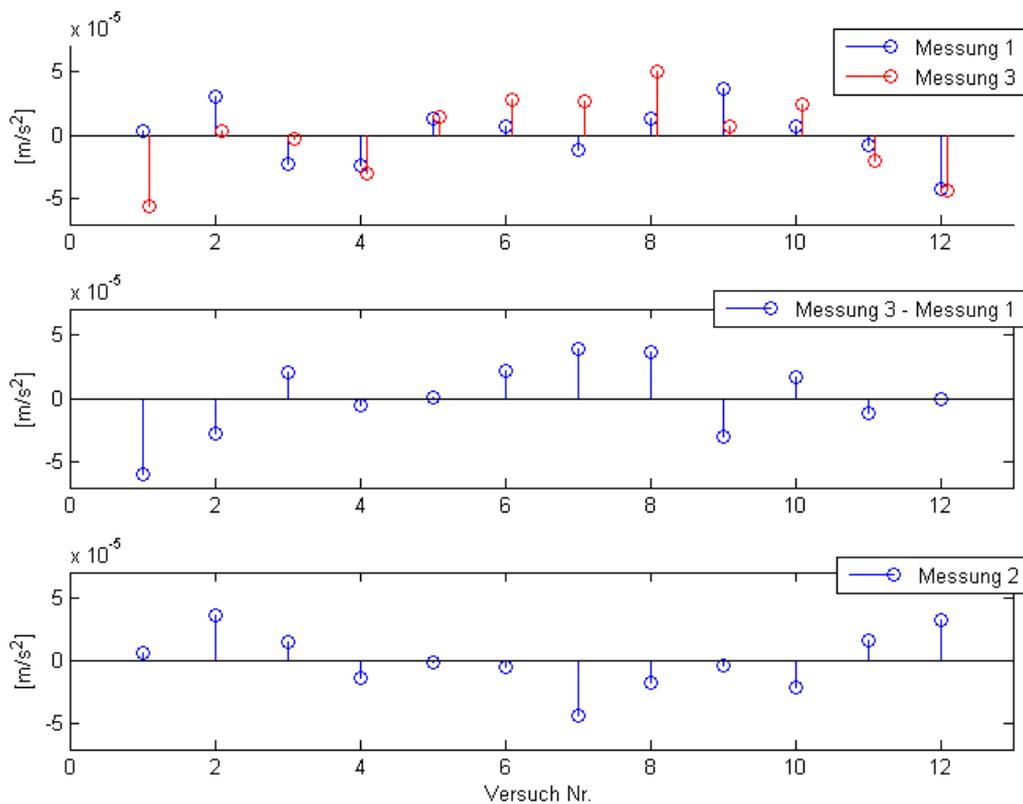


Abbildung 69: Wiederholung der Umschlagsmessung

Anhang G - Datenblätter

Datenblatt Q-Flex QA 1400 – Honeywell, 2005



Q-Flex® QA-1400 Accelerometer

Cost-effective inertial-grade sensor

For the most cost-effective inertial-navigation grade solution, Honeywell produces the QA1400 for a variety of industrial and laboratory applications.

As with the entire Q-Flex family of accelerometers, the QA1400 features a patented Q-Flex® etched-quartz-flexure seismic system. An amorphous quartz proof-mass structure provides excellent bias, scale factor, and axis alignment stability.

The integral electronics develops an acceleration-proportional output current providing both static and dynamic acceleration measurements. By use of a customer supplied output load resistor, appropriately scaled for the acceleration range of the application, the output current can be converted into a voltage.

Honeywell

Performance Characteristics

Additional product specifications, outline drawings and block diagrams, and test data are available on request.

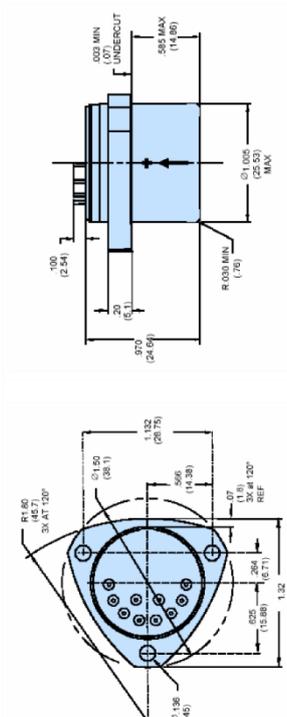
Performance	
Input Range [g]	±60
Bias [mg]	<±5
One-year Composite Repeatability [µg]	<1000
Temperature Sensitivity [µg/°C]	<±90
Scale Factor [mV/g]	1.20 to 1.46
One-year Composite Repeatability [ppm]	<1000
Temperature Sensitivity [ppm/°C]	<±180
Axis Misalignment [µrad]	<±200
One-year Composite Repeatability [µrad]	<±60 (50-500 Hz)
Vibration Rectification [µg/g rms]	<±150 (500-2000 Hz)
Intrinsic Noise [µg-rms]	<±7 (0-10 Hz) <±70 (10-500 Hz) <±1500 (500-10,000 Hz)
Environment	
Operating Temperature Range [°C]	-55 to +85
Shock [g]	250
Vibration Peak Sine [g]	20 @ 20-2000 Hz
Resolution/Threshold [µg]	<±1
Bandwidth [Hz]	>300
Thermal Modeling	
	YES
Electrical	
Quiescent Current per Supply [mA]	<±16
Quiescent Power [mW] @ ±15 VDC	<±480
Electrical Interface	Temp Sensor Voltage Self Test Current Self Test Power / Signal Ground +10 VDC Output -10 VDC Output
Input Voltage	±15 to ±28
Physical	
Weight [grams]	71 ±4
Diameter below mounting surface [inches]	Ø1.005 Max
Height - bottom to mounting surface [inches]	.565 Max
Case Material	300 Series Stainless Steel

Find out more:
www.inertialsensor.com
 Defense & Space Redmond
 Honeywell International, Inc.
 MAIL ADDRESS: P.O. Box 87001
 15001 N.E. 36th Street
 Redmond, Washington 98073-9701
 PHONE: 888 206 1667
 FAX: 425 883 2104
www.honeywell.com

ISO-9001 Certification Since 1995
DISCLAIMER: Specifications are subject to change without notice. Honeywell reserves the right to make changes to any product or technology herein to improve reliability, function, or design. Honeywell does not assume any liability arising out of the application or use of the product. Accelerometers exported from the United States must be done in accordance with the Export Administration Regulations (EAR) and/or the International Traffic in Arms Regulations (ITAR) as applicable.

Exported August 2005
 Copyright © 2005 Honeywell International, Inc. All Rights Reserved. Printed in USA.

Configuration Drawings



Datenblatt Q-Flex QA 1400 – MWS, 2003

17/02/2003 14:19 +49-8441-498328 MWS SENSORIK GMBH S. 86

QA-1400 Technical Data	
Environmental	
Temperature	-55°C to +95°C
Shock	250g, half sine, 6ms
Vibration	ML-B-5400 Curve IV (A)
Leakage	<1x10 ⁻⁶ cc/s
Electrical	
Power Supply Voltage	±13.0 to ±18.0 VDC
Quiescent Current	<2 mA
Insulation Resistance	>50 Mohm @ 50 VDC max (electronics to case)
Regulated Output @ 1.5 mA max	±8.5 to 10.1 V
Physical	
Weight	<80 grams
Case Material	Stainless steel
Functional Characteristics (24°C, Maximum Values)	
Output Range	±25g
Scale Factor	1.20 to 1.46 mA/g
Bias	<10 mg
Axis Misalignment	
Output Axis	2800 µrad
Pendulous Axis	2800 µrad
Frequency Response	
0 to 10 Hz	0.01 dB
10 to 300 Hz	0.45 dB
Above 300 Hz	<5 dB peaking
Natural Frequency	>Above 800 Hz
Damping Ratio	0.3 to 0.8
Threshold and Resolution	<1 µg
Noise	
0 to 10 Hz	10 nA rms
10 to 500 Hz	100 nA rms
500 Hz to 10 kHz	2 µg rms
Temperature Sensor	
Output at 20°C, nominal	293 µA
Scaling	1.0 µA/°C
Load	11 Kohms, max

Outline Drawing

The drawing shows a cylindrical sensor with a diameter of 1.32 inches (33.5 mm) and a height of 0.75 inches (19.0 mm). It features a central output pin with a diameter of 0.075 inches (1.91 mm) and a maximum length of 0.100 inches (2.54 mm). The top view shows a circular arrangement of pins with a diameter of 0.57 inches (14.5 mm) and a distance of 0.284 inches (7.21 mm) between pins. The side view shows a diameter of 0.284 inches (7.21 mm) and a height of 0.100 inches (2.54 mm).

QA-1400 Performance

Scale Factor	
Temperature Sensitivity	180 ppm/°C
Nonlinearity	20 µg/g ²

Bias	
Temperature Sensitivity:	
The QA-1400 has a selectable Bias Thermal Coefficient according to the Table below:	
Code	BTC Max
AA01	90 µg/°C
AA03	45 µg/°C
AA05	30 µg/°C
AA06	20 µg/°C
AA08	10 µg/°C

Axis Misalignment	
Temperature Sensitivity	10µrad/°C

Vibration Rectification	
50-500 Hz	60 µg/g ² rms
500-2000 Hz	150 µg/g ² rms

Otto-Rahn-Strasse 6
D-85276 Pfaffenhausen
Tel: +49 (0) 84 41-49 83-0
Fax: +49 (0) 84 41-49 83-20
www.mws-sensorik.de

17/02 '03 MO 13:18 [SE/EM NR 6115] 006

Anhang H - Messungen mit der Klimabox

Klimabox – Q-Flex QA-1400 / A/D-Wandler NI 9239

Um die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Komponenten des Messsystems zu untersuchen, werden zwei Versuchsreihen durchgeführt (siehe Tabelle 27). Dies ist vor allem dann interessant, wenn Komponenten des Messsystems ausgetauscht oder in einem anderen System verwendet werden.

Tabelle 27: Messparameter Klimabox Qflex QA 1400 / NI 9239

Messparameter	Qflex QA 1400	NI 9239
Anzahl der Messungen	5	
Einschalten Messsystem	2011/01/11ca. 21h00	2010/10/19ca. 20h30
Messbeginn	2011/01/12 09h57	2010/10/20 09h37
Messfrequenz	3.1 kHz	
Aufbau	C	nur NI 9239 in Klimabox
Messdauer	je 30 s	
Kanal 1	Beschleunigung	
Kanal 2	Temperatur	
Ergebnis [ppm/°C]	56	6

Bei den Messungen ist jeweils nur das zu untersuchende Messobjekt in der Klimabox aufgebaut, während die restlichen Hardwarekomponenten außerhalb der Box aufgestellt sind. (siehe Abbildung 70).

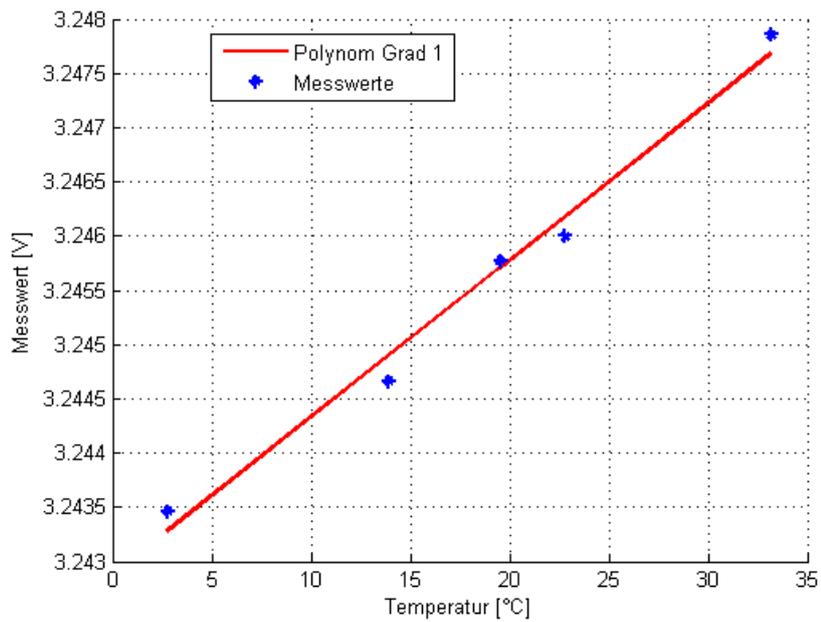


Abbildung 70: Temperaturabhängigkeit Q-Flex QA 1400

Für den Q-Flex QA 1400 ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit von **56 ppm/°C**.

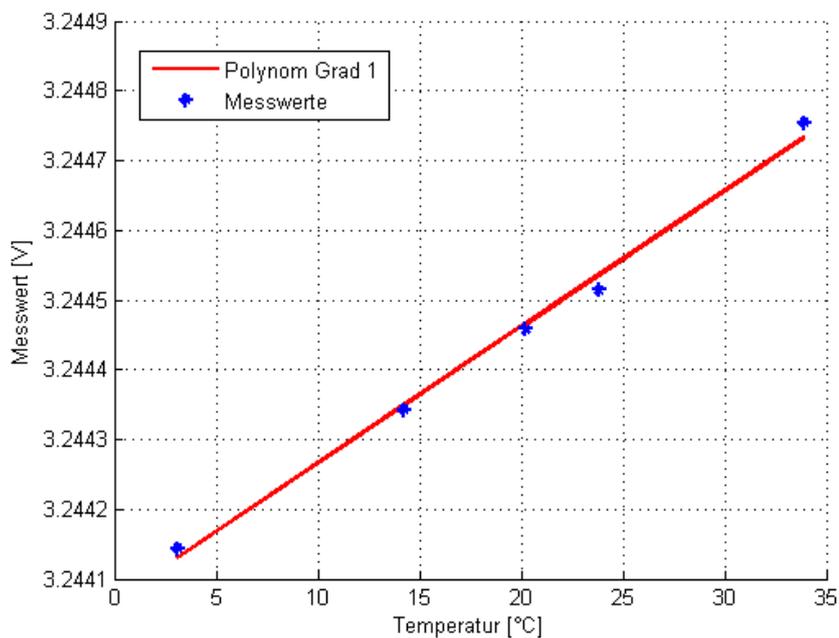


Abbildung 71: Temperaturabhängigkeit NI 9239

Für den NI 9239 ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit von **6 ppm/°C**.

Anhang I - Feldmessung

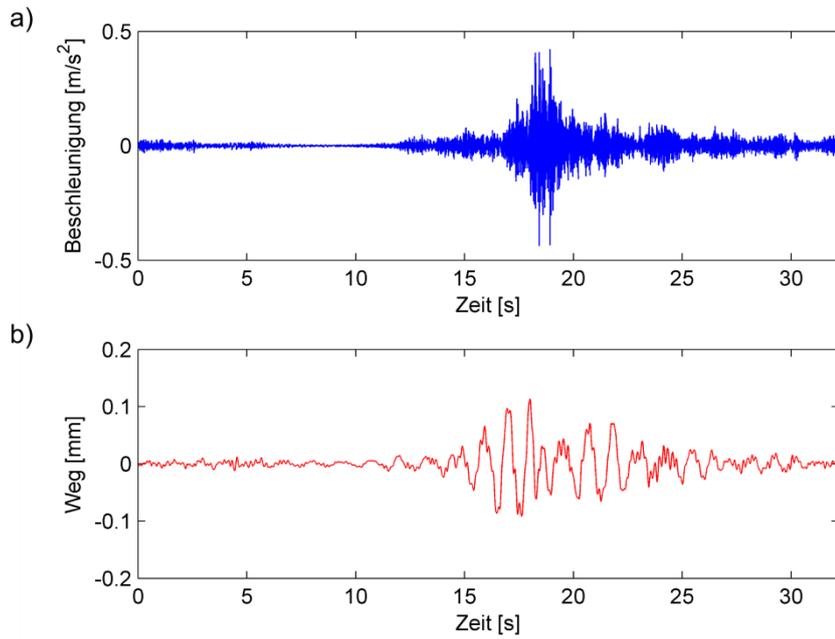


Abbildung 72: Messung 2 a) Beschleunigung b) Weg

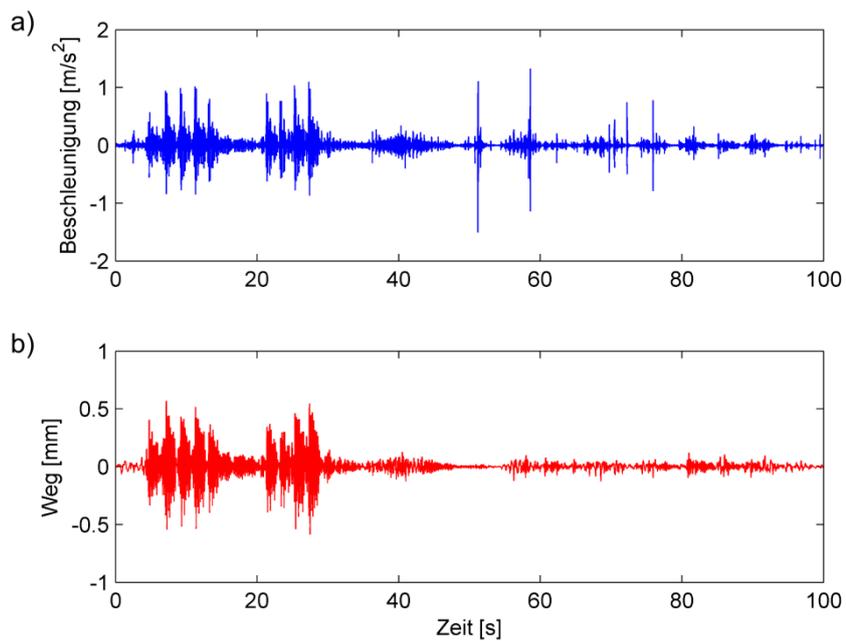


Abbildung 73: Messung 4 a) Beschleunigung b) Weg

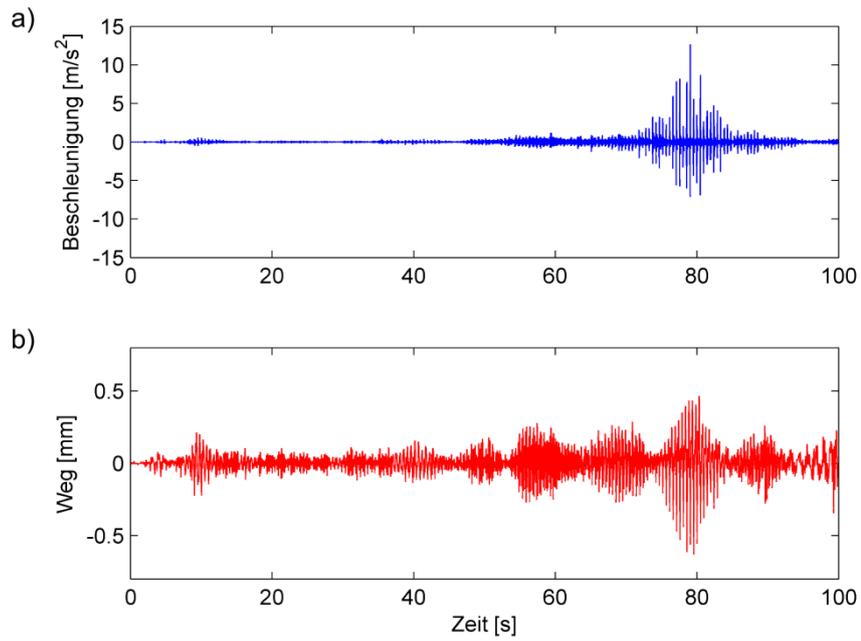


Abbildung 74: Messung 5 a) Beschleunigung b) Weg

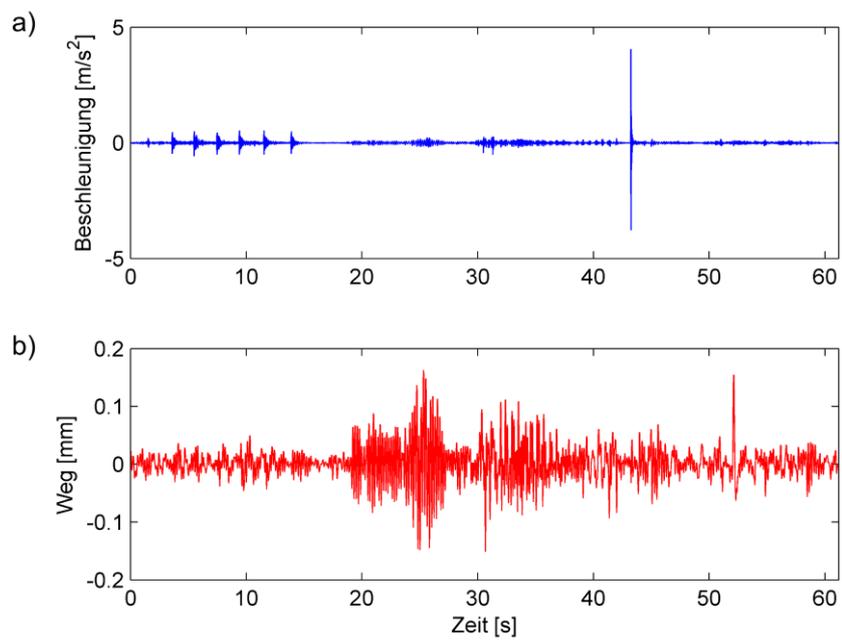


Abbildung 75: Messung 6 a) Beschleunigung b) Weg

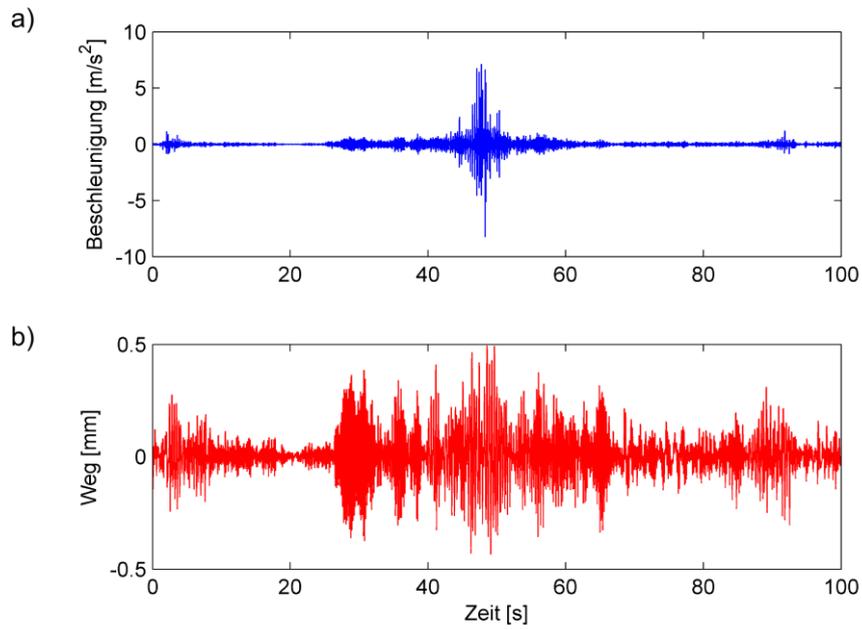


Abbildung 76: Messung 8 a) Beschleunigung b) Weg

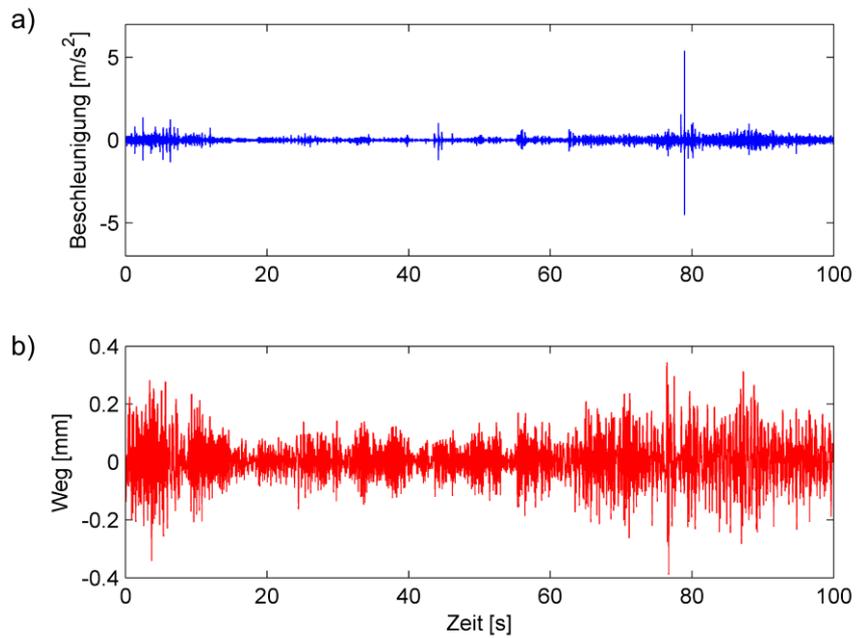


Abbildung 77: Messung 9 a) Beschleunigung b) Weg

Anhang J - Praxistest Horizontalkomparator

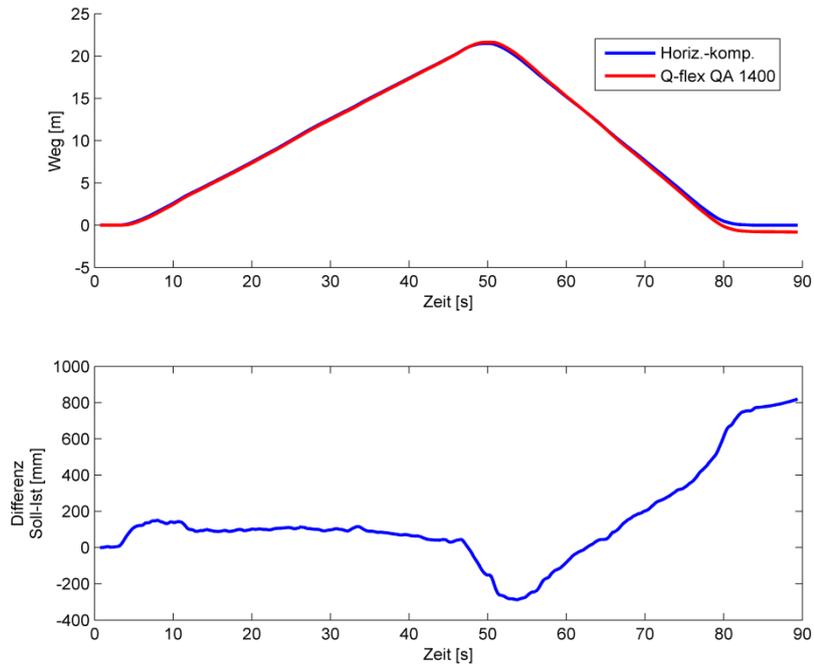


Abbildung 78: Messung 3 a) Wegbestimmung mit Q-Flex/Horizontalkomplkomparator b) Differenz