



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik

Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Bachelorarbeit

**Untersuchung zur Anwendung der Video Magnification für
ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen.**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Vorgelegt von: **Felix Weidemann**

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

Zweitprüfer: **M.Eng. Uwe Köster**

URN: **urn:nbn:de:gbv:519-thesis2022-0257-8**

Neubrandenburg, März 2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur mit Hilfe der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen wörtlich oder sinngemäß entlehnt wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Neubrandenburg, den 28.02.2022

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Anwendung der Video Magnification zur kamerabasierten Überwachungsmessung. Bei der Videoverstärkung werden im Falle der Eulerian Video Magnification in der Aufnahme vorliegende Farbänderungen verstärkt. Die Phase-based Video Magnification stellt ein auf der Darstellung von Bewegungen optimiertes Verfahren dar.

Die Arbeit untersucht, ob die Video Magnification einen Mehrwert für zukünftige Überwachungsmessungen darstellen kann, denn der Bedarf an kostengünstigen und effektiven Systemen ist hoch. Wirksame Überwachungssysteme sind ein essenzieller Bestandteil zum sicheren Betrieb von Ingenieurbauwerken und zur qualitativ hochwertigen industriellen Fertigung.

Zur Nutzung des Verfahrens wurde ein eigener Workflow entwickelt und sowohl im Labor als auch in verschiedenen realen messtechnischen Szenarien angewandt. Dabei wird betrachtet, wie gut dieses berührungslos messende Verfahren in der Lage ist, kleine Objektbewegungen zu visualisieren und vorliegende Frequenzen mit Hilfe weiterführender Videoanalyse zu bestimmen. Die Ergebnisse werden dabei teilweise durch die Nutzung von Beschleunigungssensoren beziehungsweise tachymetrischen Aufnahmeverfahren kontrolliert.

Abstract

This bachelor thesis deals with the application of video magnification for camera-based monitoring measurement. In case of Eulerian video magnification, color changes in the original video recording are amplified. The phase-based video magnification is a process optimized for the magnification of movements.

The work examines whether video magnification can provide added value for future monitoring measurements. Because the demand for low-cost and effective systems is high. Effective monitoring systems are an essential part of the safe operation of engineering structures and high-quality industrial production.

To use the method, a workflow was developed and applied both in the laboratory and in various real metrological scenarios. It is considered how well this non-contact measuring method is able to visualize small object movements and to determine existing frequencies with the help of further video analysis. Results are checked partly by using acceleration sensors, partly by using tachymetric recording methods.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe und Herrn M.Eng. Uwe Köster für die fachliche Betreuung bei der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Ebenfalls möchte ich Herrn M.Eng. Martin Kiskemper für die technische Unterstützung danken. Auch Herrn Markus Schober danke ich für die Anfertigung eines Versuchsaufbaus.

Des Weiteren danke ich Celina Bertz für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung von Messungen.

Meinen Kommilitonen danke ich für die kameradschaftliche Unterstützung während des gesamten Studiums.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mir auf diesen nicht immer leichten Weg unterstützend zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Motivation	8
2 Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen.....	10
3 Video Magnification als Verfahren der Videobearbeitung.....	12
3.1 Geschichte der Video Magnification	12
3.2 Theoretische Grundlagen der Eulerian Video Magnification.....	13
3.2.1 Filter	13
3.2.2 Bildpyramiden	14
3.2.3 Zeitreihenanalyse und Frequenzbestimmung	15
3.2.4 Eulerian Video Magnification	17
3.2.5 Phase-based Video Magnification	20
4 Videoaufnahmen als messtechnische Methode	22
4.1 Technische Grundlagen.....	22
4.2 Workflow und Umsetzung.....	26
4.2.1 Ablauf einer Messung.....	26
4.2.2 Ausrüstung und Software	27
4.3 Messungen unter Laborbedingungen.....	29
4.3.1 Erfassung von Schwingungen mit einfachen Kameras	31
4.3.2 Erfassung von Schwingungen mit „professionellen“ Kameras	38
4.3.3 Resümee der messtechnischen Eignung unter Laborbedingungen	42
5 Erprobung des Verfahrens an realen messtechnischen Szenarien	44

5.1	Vibration eines LKW-Motor.....	44
5.2	Rundlauf eines Rades und Bremsscheibe eines Krades	47
5.3	Biegelinie eines Windkraftanlagenrotorblattes	48
5.4	Bewegungsverhalten einer Fußgängerbrücke	50
6	Ergebnis der Erprobung und Ausblick.....	55
7	Zusammenfassung	58
8	Literaturverzeichnis.....	59
9	Abbildungsverzeichnis:	61

1 Motivation

Auch wenn die Ingenieurgeodäsie im Alltag vieler Menschen kaum wahrgenommen wird, leistet sie einen elementaren Beitrag für unsere moderne Gesellschaft. Am deutlichsten tritt die Verantwortung dieser Wissenschaft in den Fokus der Öffentlichkeit, wenn sie ihren Zweck nicht erfüllt oder nicht zum Einsatz kommt. Tragödien, wie der Einsturz der Autobahnbrücke in Genua im Jahr 2018 oder der Bruch eines Staudamms in Brasilien im Jahr 2021, erinnern auf tragische Weise an die Bedeutung greifender Überwachungs- und Kontrollsysteme für Ingenieurbauwerke.



Abbildung 1.1: Eingestürzte Brücke in Genua 2018. [Calanni, 2018]

Doch auch in der Industrie sichert die Ingenieurgeodäsie die Realisierung der Konstruktionsidee und überwacht deren Einhaltung fortwährend. So wird die Qualität, beispielsweise in der Automobil- oder Luftfahrtbranche, gesichert.

Dabei arbeitet ein*e Vermessungsingenieur*in stets mit Ingenieur*innen anderer Disziplinen, wie beispielsweise Bau- oder Maschinenbauingenieur*innen zusammen. Aus diesem Grund ist es von hoher Bedeutung, Messergebnisse anschaulich aufzubereiten, sodass auch Fachfremde eine möglichst genaue Vorstellung des Objektverhaltens bekommen können. Das fördert eine korrekte Einordnung des festgestellten Objektverhaltens durch die verantwortlichen Stellen. Gegenmaßnahmen können so zielführender erstellt und das vorliegende Problem besser behoben werden.

Eine vollständige Erfassung des Objektverhaltens kann dabei hohe Kosten verursachen. Entweder werden mehrere Sensoren zur Erfassung verschiedener Punkte oder kostenintensive, das Messobjekt komplett erfassende, Systeme benötigt. So leidet die angemessene Realisierung von Überwachungsmechanismen durch endlich vorhandene finanzielle Möglichkeiten oder an der fehlenden Bereitschaft vorhandene finanzielle Mittel zu investieren. Die Gefahr steigt, dass trotz vorhandener, aber unzureichender Überwachungskonzepte, das wahre Objektverhalten falsch eingeschätzt wird. Die Betriebssicherheit und Qualität des Objektes leiden darunter.

Leistungsfähige und gleichzeitig kostengünstige Systeme können somit dazu beitragen, dass Ingenieurbauten und sonstige Objekte engmaschiger und häufiger kontrolliert werden. Kamerabasierte Überwachungssysteme auf Grundlage der Video Magnification könnten zukünftig ein weiteres Verfahren zur Erfüllung geodätischer Überwachungsmessungen darstellen. Kameras können große Teile, oder gar das gesamte Objekt erfassen und somit Bewegungen anschaulich präsentieren. Dabei sind die Anschaffungskosten im Vergleich zu sonstigen Messinstrumenten, wie beispielsweise einem Laserscanner, gering. Wie gut das Verfahren bereits gegenwärtig funktioniert, soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Dazu wird die Video Magnification sowohl im Labor, als auch in verschiedenen messtechnischen Szenarien angewandt. Es wird dabei zum einen eingeschätzt, wie gut vorliegende Bewegungen in den jeweiligen Szenarien visualisiert werden. Zum anderen wird überprüft, ob und in welcher Qualität Frequenzen, die am Messobjekt auftreten, bestimmt werden können. Dabei wird die Video Magnification zusammen mit Smartphone-Beschleunigungssensoren oder tachymetrischen Messungen genutzt.

2 Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen

Zur Einordnung der Anwendbarkeit der Videoverstärkung für ingenieurgeodätische Aufgaben wird im Verlauf dieser Arbeit die Überwachungsmessung als Teilgebiet der Ingenieurgeodäsie nun in Kürze theoretisch vorgestellt.

Die Ingenieurvermessung beschäftigt sich mit der technischen Planung, der Verwirklichung und der Überwachung von Objekten und bildet so eine umfassende Disziplin der Geodäsie ab. Aufgrund des großen Spektrums an Aufgabenbereichen hat die Ingenieurvermessung eine zentrale Bedeutung für das Baugewerbe, die Industrie und die öffentliche Sicherheit und muss mit den stets voranschreitenden Anforderungen mithalten. Überwachungsmessungen bilden ein Teilgebiet der Ingenieurvermessung und beschäftigen sich je nach erwarteten Deformationsarten und dem gewählten Deformationsmodell mit der Beobachtung der Position beziehungsweise Form von Objekten als Funktion der Zeit und/oder Objektbelastung. [Kahmen, 2006]

Deformationsarten:

Deformationsarten beschreiben das vorliegende Verhalten des Messobjekts und müssen für eine erfolgreiche Messung bestmöglich abgetastet werden. Das Verhalten von Messobjekten kann dabei sehr komplex sein und eine Kombination mehrerer Bewegungen und Verformungen darstellen. In der Ingenieurgeodäsie unterscheidet man zunächst zwischen reversiblen und irreversiblen Objektbewegungen, des Weiteren zwischen Starrkörperbewegungen und Verformungen. Jede Deformationsart stellt dabei unterschiedliche Anforderungen an den Messaufbau und das dazugehörige Instrumentarium. [Kahmen, 2006]

Deformationsmodelle:

Deformationsmodelle beschreiben den Ansatz der Auswertung einer Deformations- bzw. Überwachungsmessung. Es wird grundlegend zwischen folgenden Modellen unterschieden:

- Kongruenzmodell:
 - geometrischer Vergleich zweier Zustände
- Kinematischen Modell:
 - zeitabhängige Beschreibung des Objektverhaltens
- Statischen Modell:
 - belastungsabhängige Beschreibung des Objektverhaltens
- Dynamischen Modell:
 - zeit- und belastungsabhängige Beschreibung des Objektverhaltens

Messprogramm und Instrumentarium:

Das Erstellen des Messprogramms und das damit einhergehende benötigte Instrumentarium hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Einige Faktoren sind hier aufgeführt:

- Beschaffenheit und Größe
- erwartete Deformationsart
- Stärke und Geschwindigkeit der Deformation
- Erreichbarkeit des Messobjektes
- nötige Messgenauigkeit
- nötige Auswertungsgeschwindigkeit
- Umweltbedingungen
- Budget

Anhand dieser Anforderungen, die für das Messprogramm berücksichtigt werden müssen, ergeben sich auch bestimmte Herausforderungen, die das Instrumentarium erfüllen muss. Dem Ingenieur steht dabei schon heute eine Vielzahl von Instrumenten zur Verfügung. Klassischerweise können Messobjekte analog mit, beispielsweise Maßstäben, dem Nivellier oder dem Theodolit vermessen werden. Modernere Instrumente ermöglichen einen automatisierten Betrieb inklusive Auswertung. Dazu gehören Tachymeter, GNSS, Neigungssensoren und Beschleunigungssensoren. Neben den bisher genannten Verfahren, die zuvor ausgewählte, diskrete Punkte beobachten, ist auch die Arbeit mit Instrumenten wie beispielsweise Laserscannern oder photogrammetrischen Verfahren möglich, die das Messobjekt in Gänze beobachten können. [Kahmen, 2006]

Trotz der Fülle an Messinstrumenten und Verfahren lohnt sich der Blick auf neue Methoden, die das Potenzial haben, bestehende Verfahren zu unterstützen, zu ergänzen oder gar Kompetenzlücken zu füllen.

3 Video Magnification als Verfahren der Videobearbeitung

Kamera und Videoaufnahmen ermöglichen es seit ihrer Erfindung, Szenerien oder einzelne Objekte, berührungslos zu beobachten. Während die Beobachtung durch Bildaufnahmen, die Photogrammetrie, bereits im Ersten Weltkrieg stark an Bedeutung gewann, blieb die technische Nutzung von Videokameras bis zur zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gering. Heute werden Videokameras in den verschiedensten Anwendungen, von der einfachen Überwachungskamera bis hin zu Fahrassistenzsystemen genutzt. Dabei enthalten Kameraaufnahmen mehr Informationen, als im ersten Moment ersichtlich ist. Beweisen lässt sich das unter anderem mit der Eulerian Video Magnification.

3.1 *Geschichte der Video Magnification*

Die Grundlage für die Eulerian Video Magnification, im folgenden auch EVM genannt, wurde bereits 2005 am Computer Science and Artificial Intelligence Lab (CSAIL) des Massachusetts Institute of Technology (MIT) mit der Lagrangian-Methode geschaffen. In diesem Verfahren wurden bereits Bewegungen detektiert und verstärkt. Dazu wurde die Bewegung von Pixelblöcken beobachtet, welche aus Pixeln mit ähnlicher Charakteristik bestimmt werden. [Liu, et al., 2005] Zwar konnte das Verfahren Bewegungen detektieren und verstärken, schwächelte jedoch bei nur geringen Bewegungen und schlechter Bildqualität. [Dambeck, 2012]

Das in Kapitel 3.2.4 beschriebene Verfahren der Eulerian Video Magnification wurde 2012 vom MIT CSAIL veröffentlicht. Zunächst versuchten die Forscher des CSAIL, lediglich Farbbänderungen zu verstärken, um beispielsweise die Herzfrequenz aus minimalen Änderungen der Hautfarbe ermitteln zu können. Zu diesem Zeitpunkt wurde unerwarteterweise auch das Phänomen entdeckt, dass Bewegungen verstärkt dargestellt werden, woraufhin das Verfahren mit der Phase-based Video Magnification zur Verstärkung von Bewegungen optimiert wurde [Dambeck, 2012]. Dieses Verfahren wird in Kapitel 3.2.5 näher betrachtet. [Wadhwa, et al., 2013]

In den folgenden Jahren wurden weitere Veröffentlichungen herausgegeben, die sich mit Verbesserungen der Leistungsfähigkeit der Video Magnification befassten. Dabei ist zum einen eine Arbeit zur schnelleren Berechnung der Phase-Based Video Magnification zu nennen. Diese wurde im Jahre 2014 vom MIT CSAIL veröffentlicht und ermöglicht die Anwendung der Bewegungsverstärkung in Echtzeit. Des Weiteren ist eine Arbeit vom CSAIL zur Learning-based Video Motion Magnification aus dem Jahr 2018 zu nennen. Hierbei wird mit-

hilfe von maschinellem Lernen die Filterung automatisch so angepasst, dass Rauschen und Unschärfe den geringstmöglichen Einfluss aufweisen. [Oh, et al., 2018]

Somit ist die Video Magnification keine Neuentwicklung, sondern ein bereits optimiertes Verfahren. Jedoch fehlen bisher bekannte, breitflächige Anwendungen. Die Wissenschaftler*innen des MIT konzentrierten sich als Anwendungsperspektive vor allem auf die Medizin, doch auch die Bewegung von Baukränen wurde bereits visualisiert.

3.2 Theoretische Grundlagen der Eulerian Video Magnification

Zur sicheren Anwendung der Video Magnification ist es wichtig, die Funktionsweise des Verfahrens zu verstehen. Im Folgenden soll die Funktionsweise der klassischen Eulerian Video Magnification, aber auch der Phase-based Video Magnification erläutert werden. Zuvor ist es dafür notwendig, die Filtertechniken und die Datenkomprimierungstechnik der Bildpyramide nachvollziehen zu können.

3.2.1 Filter

In der Bild- und Signalverarbeitung sind Filter eine allgegenwärtig genutzte Methode, um gewünschte Spektren zu extrahieren und ungewünschte Spektren zu absorbieren. Für die verschiedenen Zwecke haben sich unterschiedliche Filtertypen entwickelt.

Tief- und Hochpassfilter:

Tief- und Hochpassfilter ermöglichen die Absorption unerwünschter Spektren unter bzw. oberhalb einer definierten Grenzfrequenz. Der Tiefpassfilter lässt dabei alle Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz passieren. Der Hochpassfilter lässt hingegen alle über der Grenzfrequenz liegenden Frequenzen passieren. [Luhmann, 2017]

Bandpassfilter:

Bandpassfilter ermöglichen die Transmission eines nach oben und unten beschränkten Frequenzbandes. Die Beschränkung wird zuvor definiert. Dadurch werden alle Frequenzen außerhalb dieses definierten Spektrums absorbiert. [Luhmann, 2017]

3.2.2 Bildpyramiden

Bildpyramiden werden in der Bildverarbeitung vor allem zur Erkennung von Mustern und zur Datenkompression genutzt. Unter einer Bildpyramide versteht man eine Serie an Bildern, deren Auflösung gegenüber dem Vorgänger jeweils verringert wird. Durch die geringere Auflösung wird der Informationsgehalt und so auch die Datenmenge der Bilder in den höheren Pyramidenebenen verringert.

Gauß- Pyramide und Laplace-Pyramiden:

Die Gaußpyramide stellt ein Verfahren zur Berechnung der einzelnen Pyramidenebenen dar. Bei diesem Verfahren wird zur Verringerung der Auflösung jeweils der Mittelwert aus mehreren Pixeln nach der Gauß-Verteilung gebildet. Die Laplace-Pyramide ähnelt der Gaußpyramide, speichert jedoch im Gegensatz dazu, als Zwischenebenen nur die Differenzbilder aus dem Bild der niedrigeren Ebene und dessen geglätteter Version. Ein Differenzbild stellt die nicht gemeinsamen Pixel der Ausgangsbilder dar. Dabei ist nur das letzte Bild der Pyramide kein Differenzbild, um die Rückberechnung der Ebenen gewährleisten zu können. [Kraus, 2004]

Drehbare Pyramiden:

Drehbare Pyramiden stellen ein Verfahren der linearen Bildzerlegung dar, wobei mehrere Orientierungen und Größen des Bildes genutzt werden. So werden für ein Bild vier Orientierungen erstellt. Zudem wird das Bild in der Auflösung verkleinert. Das jeweils kleinere Bild zeigt dabei das Tiefpass-Signal des Eingangsbildes an. In der Basis stellen diese Pyramiden Richtungsableitungen einer bestimmten Ordnung k dar. [Simoncelli, 2008] Richtungsableitungen geben lokale Änderungsraten des Funktionswertes einer reellwertigen Funktion im Zuge einer Änderung der Funktionsvariablen in einer vorgegebenen Richtung an [Studyflix GmbH, 2022].

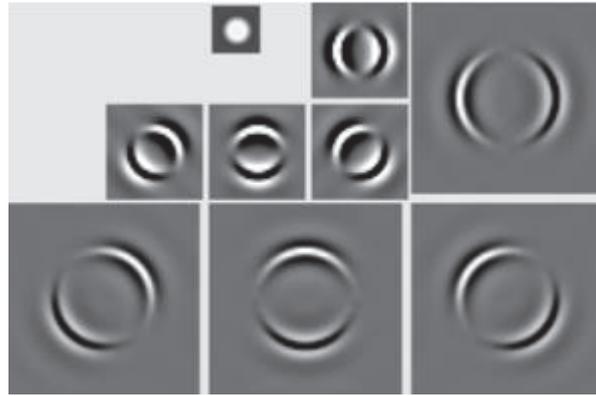


Abbildung 3.1: Beispielhafte Darstellung eines Bildes in einer drehbaren Pyramide.

[Simoncelli, 2008]

Dabei ist die Darstellung einer Bildstruktur sowohl translations- also auch rotationsinvariant, was bedeutet, dass sich die Struktur bei einer Translation und Rotation nicht verändert.

Anwendung findet das Verfahren beispielsweise in der Rauschentfernung und -verbesserung und im Falle der Phasen-basierten Videoverstärkung, wobei es die Erfassung der lokalen Amplitude und Phase des Videobildes ermöglicht. Die Phase-based Video Magnification ist eine Optimierung der Eulerian Video Magnification und wird im Kapitel 3.2.5 vorgestellt. [Simoncelli, 2008]

3.2.3 Zeitreihenanalyse und Frequenzbestimmung

Neben der visuellen Verstärkung werden im Laufe dieser Arbeit auch Zeitreihen aus dem verstärkten Video gebildet und postum mit dem Ziel der Frequenzbestimmung weiterverarbeitet. Der Vorgang dieser Weiterverarbeitung wird mit dem Gebiet der Zeitreihenanalyse umschrieben. Die Zeitreihenanalyse beschäftigt sich mit der Extraktion von vielseitigen Informationen aus einer zeitlichen Abfolge von Messwerten. Solche Informationen können in den Daten enthaltene Trends, Korrelationen und, wie in dieser Arbeit angewandt, Frequenzen sein. Eine Zeitreihe umfasst, wie aus dem Namen bereits abzuleiten ist, eine Abfolge zeitabhängiger Daten. Diese beschreiben einen stochastischen Prozess, also einen Ablauf, der im Gegensatz zum deterministischen Prozess nicht vollständig vorhersehbar ist. [Neuner, et al., 2009]

Zur Analyse der Zeitreihe sollten die Daten bestimmte Voraussetzungen erfüllen. So sollten die einzelnen zeitlichen Abstände einer Zeitreihe, die Periode, in der ein Messwert abgetastet wird, zur Auswertung konstant sein. Anderenfalls ist eine korrekte Analyse der Zeitreihe nicht möglich. Zudem sollten Zeitreihen die Eigenschaften der Stationarität und Ergodizität aufweisen. Die Stationarität beschreibt die Kontinuität einer Zeitreihe in Hinblick auf ihren

Mittelwert und ihrer Varianz. Diese dürfen sich über den ganzen Verlauf der Zeitreihe nicht ändern, weshalb Zeitreihen vor der Analyse von möglichen Trends befreit werden müssen. Mit der Ergodizität wird der Zustand eines statischen Prozesses beschrieben, wenn: „[...] sich die gleichen Zahlenwerte für die statistischen Kennwerte ergeben, wenn die Mittelung statt über die einzelnen Realisierungen des Prozesses entlang der Zeitachse einer Realisierung erfolgt.“ [Wandinger, 2020]

Zur Berechnung des Powerspektrums einer Zeitreihe wird die Autokovarianzfunktion $C(\tau)$ benötigt. Im Rahmen der Analyse gibt die Autokovarianzfunktion die stochastische Abhängigkeit einer um die Zeit τ verschobenen Folge zur ursprünglichen Folge an. (Neuner, et al., 2009)

$$(1) \quad C_{xx}(t, \tau) = E\{[x(t) - \mu_x(t)][x(t + \tau) - \mu_x(t + \tau)]\}$$

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

Dabei steht $(t + \tau)$ für die verschobene Folge und (t) für die ursprüngliche Folge. [Neuner, et al., 2009]

Die Autokorrelationsfunktion $R(t)$ erhält man anschließend aus der normierten Autokovarianzfunktion. Dies ist möglich, da die Autokovarianzfunktion nicht skaleninvariant ist.

$$(2) \quad R_{xx}(t, \tau) = \frac{C_{xx}(t, \tau)}{\sigma(t) \cdot \sigma_x(t + \tau)}$$

Aus $R(t)$ und $C(t)$ können die Periodizitäten abgelesen werden. Aus $R(t)$ ist zudem ersichtlich, wie stark die Werte der Zeitreihe miteinander korrelieren. [Neuner, et al., 2009]

Das Powerspektrums ist ein wichtiger Bestandteil der Zeitreihenanalyse und gibt die Energieanteile der einzelnen Frequenzen eines Signals an. Um es berechnen zu können, wird die Fourier-Transformation genutzt. Die Fourier-Transformation überführt dabei die Zeitreihe vom Ortsbereich $f(x)$ in den Frequenzbereich $F(x)$. Dabei ist die Fourier-Transformation für komplexe Zahlen ausgelegt. Für reelle Zahlen ausgelegt ist die kontinuierliche Fourier-Kosinus-Transformation. Auch diese wird zur Berechnung des Powerspektrums $P(v)$ genutzt und ist hier einzusehen:

$$(3) \quad P(v) = 2 \cdot \int_{\tau=0}^{\infty} C(\tau) * \cos(2 * \pi * v * \tau) dt$$

Zur Analyse von diskreten Zeitreihen, wie beispielsweise Daten einer Sensormessung, wird die diskrete Kosinus-Transformation (DCT) genutzt:

$$(4) \quad C(u) = a(u) \sum_{n=0}^{N-1} f(x) \cos \left[\frac{\pi(2x+1)u}{2N} \right]$$

[Khayam, 2003]

Bei der Planung der Messung, aber auch bei der späteren Analyse muss das Auftreten der Nyquist-Frequenzen beachtet werden. Die Nyquist-Frequenz definiert die höchste Frequenz, die in einem Signal enthalten sein kann. Dabei gilt:

$$(5) \quad v_N = \frac{1}{2 \cdot dt}$$

Das bedeutet, dass die Schwingung mehr als zweimal pro Periode abgetastet werden muss. Empfehlenswert sind jedoch Abtastraten, die mindestens fünfmal pro Periode einen Wert erfassen. [Muffert, et al., 2009]

3.2.4 Eulerian Video Magnification

Die Eulerian Video Magnification verstärkt linear zeitliche Farbänderungen in einem Video. Dies läuft im Wesentlichen in drei Schritten ab. Dabei wird das Ursprungsvideo zunächst in unterschiedliche räumliche Frequenzbänder aufgeteilt. Anschließend werden entsprechende Filter zur Verstärkung der Frequenzen angewandt. Abschließend wird das Video rekonstruiert und ausgegeben. [Wu, et al., 2012] Zur Veranschaulichung soll die folgende Abbildung dienen:

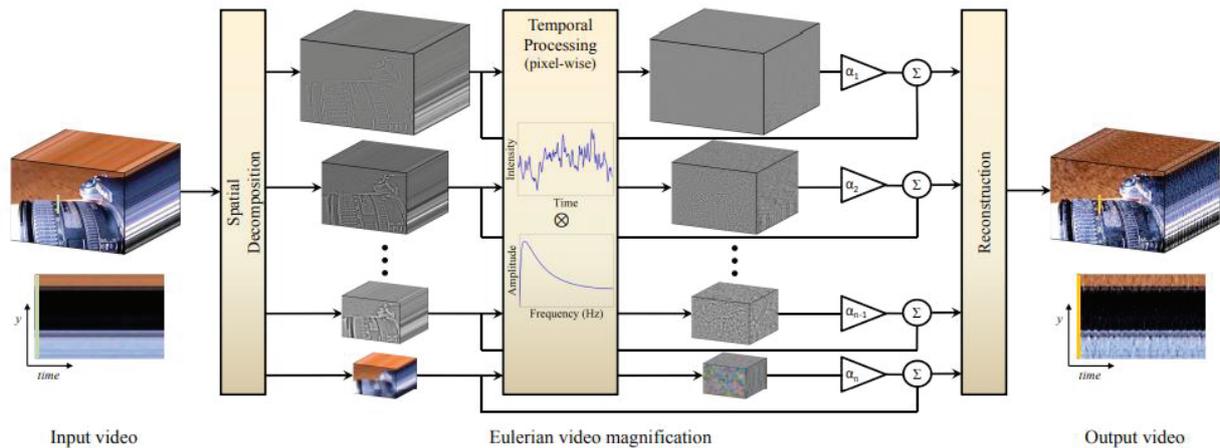
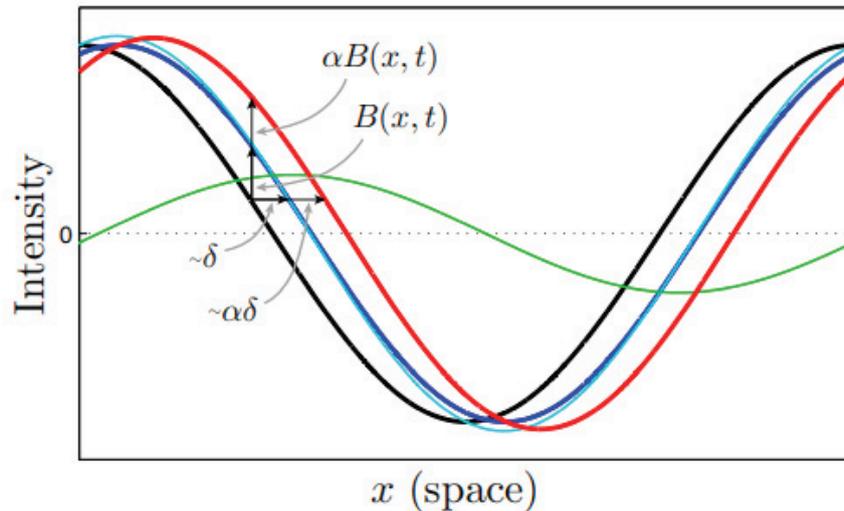


Abbildung 3.2: Ablauf der Eulerian Video Magnification mit den beschriebenen Schritten der Zerlegung (Spatial Decomposition), der Filterung (Temporal Processing) und der Rekonstruktion (Reconstruction). [Wu, et al., 2012]

Da die eigentliche Verstärkung des Videos in Abschnitt zwei vonstattengeht, wird dieser Abschnitt genauer erläutert. Die Bearbeitung jedes Frequenzbandes erfolgt zwar identisch, dennoch können die Frequenzbänder unterschiedlich stark verstärkt werden. Grund dafür sind zum einen unterschiedliche Signal-Rausch-Verhältnisse, zum anderen können Frequenzen vorliegen, für die die lineare Verstärkung nicht zutreffend sind. [Wu, et al., 2012]

Vor der Verstärkung werden die einzelnen Bilder des Eingangsvideos einer Tief-Pass-Filterung unterzogen, um Bildrauschen vor der Verstärkung zu reduzieren. Des Weiteren wird, um die Berechnungen weniger rechenleistungsintensiv zu gestalten, die Laplace-Pyramide genutzt. Anschließend werden die einzelnen Zeitreihen an Pixelwerten betrachtet. Aus der Zeitreihe wird mit einer Fast Fourier Transformation das Frequenzspektrum berechnet. Wenn einzelne Frequenzen erwartet werden, können diese mit einem Bandpassfilter extrahiert werden. Diese Frequenzen werden nun über einen Verstärkungsfaktor α multipliziert. Um das Video zu rekonstruieren, wird das verstärkte Signal zu dem Eingangssignal hinzugefügt und die Bildpyramide wird auf die Ursprungsebene zurückberechnet. [Wu, et al., 2012]

Bildlich kann sich das am Beispiel eines Signals wie folgt vorgestellt werden:



— $f(x)$ — $f(x + \delta)$ — $f(x) + \delta \frac{\partial f(x)}{\partial x}$ — $B(x, t)$ — $f(x) + (1 + \alpha)B(x, t)$

Abbildung 3.3: Es werden die Berechnungsschritte anhand eines 1D Signales gezeigt. Die schwarze Funktion beschreibt die Ausgangsfunktion. Dunkelblau zeigt die gewöhnliche Verschiebung um δ . Hellblau wird die erste Stufe der Taylorreihe dargestellt. Das bandpassgefilterte Signal wird grün und das erzielte, um α verstärkte Signal, rot dargestellt.

[Wu, et al., 2012]

Mathematisch lässt sich die Abbildung 3.3 mit den einzusehenden Formeln erklären. Dabei liegt zunächst Folgendes vor:

$$(6) \quad \hat{I}(x, t) = f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$$

$\hat{I}(x, t)$ stellt dabei die Intensität des Bildes an einer Position (x) zu einem bestimmten Zeitpunkt (t) dar. Die Funktion $\delta(t)$ drückt die Verschiebung aus und α den Verstärkungsfaktor.

Angenommen, dass Bild kann durch die erste Ordnung einer Taylorreihe angenähert werden, lässt sich das zum Zeitpunkt t wie folgt darstellen:

$$(7) \quad I(x, t) \approx f(x) + \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

Ebenso lässt sich das mit dem Bandpassfilter bearbeitete Signal darstellen.

$$(8) \quad B(x, t) = \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

Zur Verstärkung wird, wie in der folgenden Formel einzusehen, das bandpassgefilterte Signal um den Faktor α multipliziert und mit dem Ausgangssignal addiert.

$$(9) \quad \tilde{I}(x, t) = I(x, t) + \alpha B(x, t)$$

In einer Formel zusammengefasst lässt sich die Berechnung des verstärkten Signals $\tilde{I}(x, t)$ mit

$$(10) \quad \tilde{I}(x, t) \approx f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$$

darstellen.

[Wu, et al., 2012]

3.2.5 Phase-based Video Magnification

Das Verfahren der Phase-based Video Magnification stellt eine Optimierung der Eulerian Video Magnification in Hinblick auf die Verstärkung von Bewegungen dar. Im Kontrast zur in Kapitel 3.2.4 vorgestellten Eulerian Video Magnification bietet die phasenbasierte Methode die Möglichkeit, die Bewegungen bei geringerer Anfälligkeit gegenüber Rauschen noch stärker hervorzuheben. [Wadhwa, et al., 2013]

Dabei wird im Gegensatz zur linearen Eulerian Video Magnification nicht die Amplitude, sondern die Phase des Signals verstärkt. Das Rauschen im Signal wird so von der Verstärkung nicht betroffen. Zugrunde liegt die phasenbasierte Methode auf in Kapitel 3.2.2 beschriebenen drehbaren Pyramiden. Diese erlauben es erst, lokale Bewegungen im Bild zu erfassen und zu verstärken. [Wadhwa, et al., 2013]

Besagte drehbare Pyramiden werden in komplexer Form im ersten Schritt zur Zerlegung des Videos genutzt. So können die Amplituden und Phasen des Videos getrennt betrachtet werden. Die Phasen werden anschließend in jeder Orientierung und Größe der Pyramide, wie auch in der Eulerian Video Magnification, gefiltert und um α verstärkt. Anschließend kann das Rauschen im Video minimiert werden, bevor das nun verstärkte Video rekonstruiert wird. [Wadhwa, et al., 2013]

Der Ablauf dieses Verfahrens wird in der nun zu betrachtenden Abbildung dargestellt.

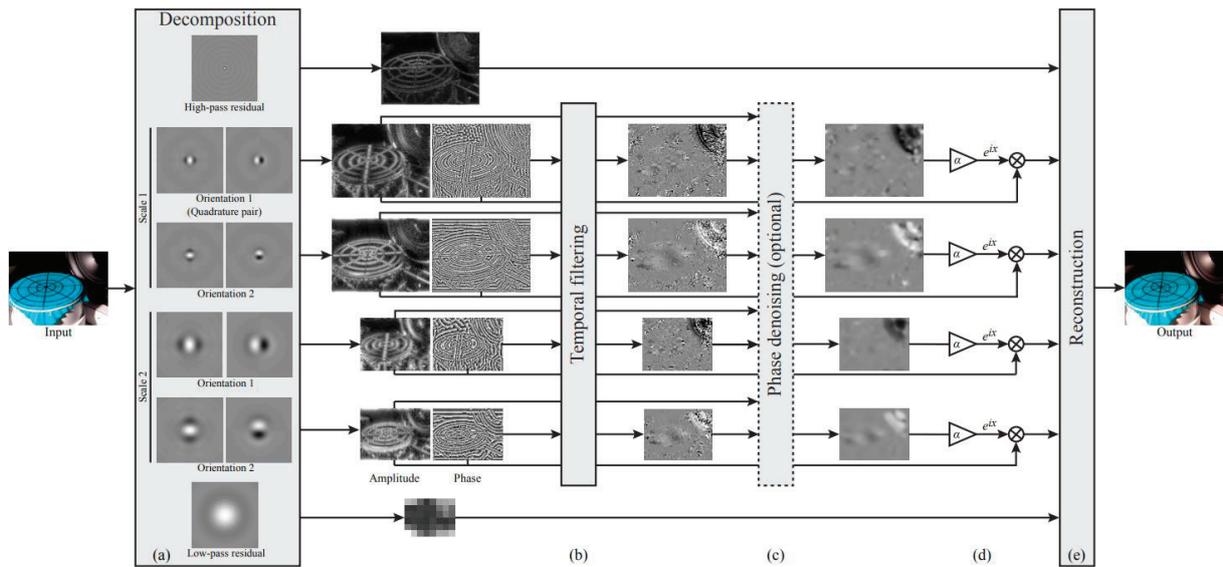


Abbildung 3.4: Darstellung der phasenbasierten Videoverstärkung mit der Bildzerlegung im Abschnitt (a), der Filterung mit Verstärkung in Abschnitt (b) der optionalen, in dieser Arbeit nicht genutzten Rauschminimierung in Abschnitt (c) und der Rekonstruktion des Videos im letzten Abschnitt (d). [Wadhwa, et al., 2013]

4 Videoaufnahmen als messtechnische Methode

Bildaufnahmen sind in der Vermessung ein bewährtes und altes Verfahren. Die Wissenschaft der Photogrammetrie beschäftigt sich mit der Rekonstruktion der Lage und Form von Objekten aus Bildaufnahmen, die photomechanisch oder photoelektrisch entstanden sind. [Kraus, 2004]

Begründet wurde die Photogrammetrie bereits im Jahr 1859 durch den französischen Oberst Laussedat. Dieser präsentierte an der Akademie für Wissenschaften in Paris, wie aus zwei Bildaufnahmen mithilfe eines räumlichen Vorwärtseinschnitts die Objektkoordinaten berechnet werden können. Zeitgleich gab es auch in Deutschland erfolgreiche Versuche durch A. Meydenbauer, der die Photogrammetrie für Bauaufnahmen einsetzen wollte. Große Bedeutung fand die Photogrammetrie dann im Ersten Weltkrieg. Damals wurden Luftbildkarten für taktische Planungen erstellt. Seit jeher stetig weiterentwickelt ist die Photogrammetrie heute ein essenzieller Bestandteil der Fernerkundung, Landvermessung und Messtechnik. [Kraus, 2004]

Doch auch Videoaufnahmen gewannen seit Aufkommen der Computer Vision in der Messtechnik an Bedeutung. So nutzen Fahrassistenzsysteme u. a. Kameras zur Überwachung der Umgebung des Fahrzeuges. Die Video Magnification wäre ein weiteres Beispiel für den Einsatz von Kameraaufnahmen in der Messtechnik.

4.1 Technische Grundlagen

Wenn die Video Magnification zur Detektion, Visualisierung und Erfassung von Bewegungen genutzt werden soll, wird neben der Software und ausreichend leistungsfähiger Rechentechnik vor allem eine geeignete Kamera benötigt.

Eine Kamera projiziert das einfallende Licht auf einen CMOS oder CCD Sensor. Da erste Versuche mit CMOS Sensoren scheiterten, wurden seit den 1970er Jahren zunächst überwiegend CCD Sensoren verwendet. CCD steht abkürzend für charge coupled device. Der Sensor besteht aus einer Vielzahl von Detektoren. Diese registrieren entsprechend des Photoelektrischen Effektes die Photonen des einfallenden Lichts. Die Detektoren bestehen dabei aus Elektroden, hinter denen sich neben einem Isolator ein Halbleiterelement befindet. Das Halbleiterelement besteht zumeist aus Silizium. Im Halbleiter wird proportional zur Menge der auftreffenden Photonen eine Ladung aufgebaut. [Bässmann, 2010] [Kraus, 2004]

Veranschaulicht wird der Aufbau in der folgenden Abbildung:

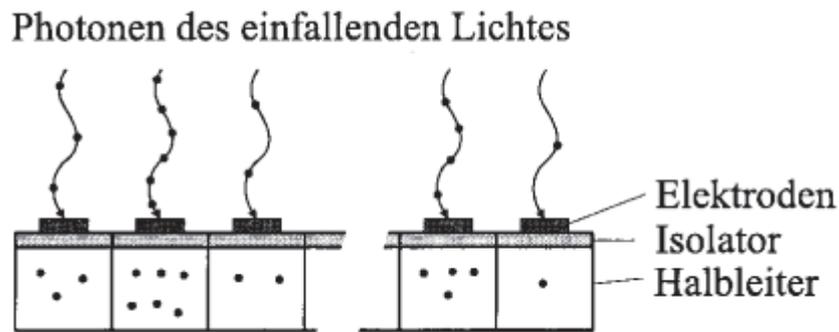


Abbildung 4.1: Mit einem Punkt visualisierte Photonen treffen auf den Detektor. Im Halbleiter stellen die Punkte die zu den auftreffenden Photonen proportionale Menge der Ladung dar.

[Kraus, 2004]

Die Ladungen und somit die Informationen über das einfallende Licht werden über ein parallel angeordnetes Transferregister und einem sich dem anschließenden Ausleseregister übertragen. Dieses nimmt die Ladungszustände der aktiven Detektoren auf. Von dort aus werden die Informationen seriell, taktweise übertragen. Es wird ein analoges elektrisches Signal gebildet, welches in Analog/ Digital-Wandler anschließend digitalisiert wird. Das Transferregister besteht ebenfalls aus lichtempfindlichen Halbleitern und muss deshalb vor Lichteinfall geschützt werden.

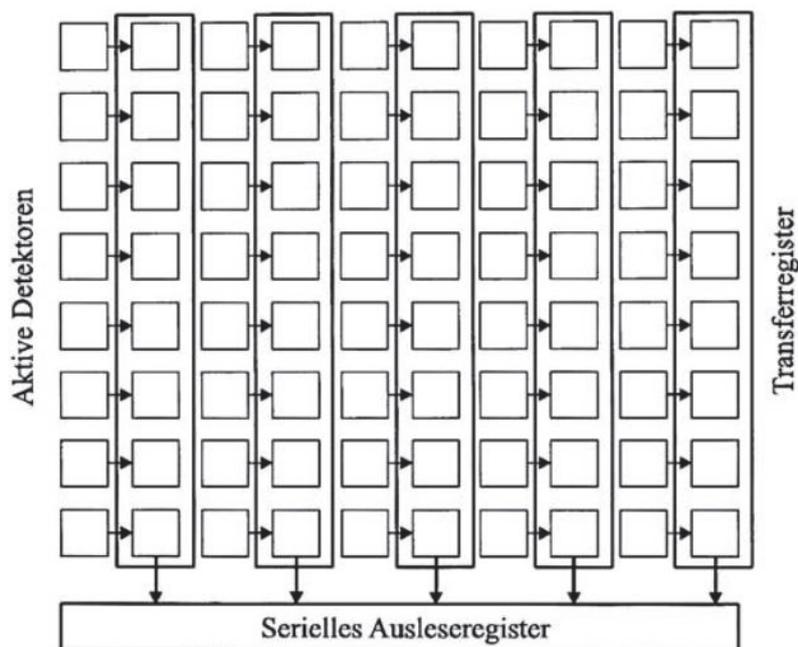


Abbildung 4.2: Darstellung eines klassischen CCD Sensor [Kraus, 2004]

Wie in Abbildung 4.2 zu erkennen, besteht bei klassischen CCD Sensoren nur die Hälfte der Sensorfläche aus aktiven Sensoren. Ausnahme bilden Full-Frame-Sensoren, bei denen die Transferregister so angeordnet sind, dass die gesamte Sensorfläche durch aktive Sensoren genutzt werden kann. [Kraus, 2004]

CCD Sensoren werden heutzutage zumeist in Industriekameras verwendet. Ein Grund stellt insbesondere der Global Shutter dar. Dieser ermöglicht verzerrungsfreie Aufnahmen sich schnell bewegender Objekte. Des Weiteren ist die Möglichkeit langer Belichtungszeiten von Vorteil für Anwendungen zur Beobachtung lichtschwacher Objekte. Die Belichtungszeit gibt die Dauer an, für die der Sensor dem Licht ausgesetzt wird. [Bässmann, 2010]

Dennoch wurde der CCD Sensor mittlerweile in vielen Anwendungsbereichen durch den CMOS Sensor verdrängt. CMOS steht abkürzend für Complementary Metal Oxide Semiconductor. Die Funktionsweise eines solchen Sensors ist ähnlich dem CCD Sensor, unterscheidet sich jedoch im technischen Aufbau und dem Auslesen der Daten. Im Gegensatz zum CCD arbeitet beim CMOS jede Photodiode bis zum Auslesen der Information einzeln. Das bedeutet, dass nach Entstehung einer Ladung aufgrund des Photoelektrischen Effektes, diese direkt in der einzelnen Diode verstärkt und mit einem Analog-Digitalwandler in ein digitales Signal verarbeitet und weitergeleitet wird. [Paech, 2020]

Ermöglicht wird dadurch eine kompaktere und effizientere Bauform, was vor allem in der Mobiltelefonbranche einen großen Vorteil gegenüber den CCD Sensoren darstellt. Darüber hinaus ermöglicht die CMOS Bauweise das Auslesen einzelner Bildteile, direkt im Sensorchip stattfindende Bildverarbeitung und hohe Bildfrequenzen mit bis zu 2000 Bildern pro Sekunde und höher. Nachteilig ist der bei CMOS meist verwendete Rolling Shutter. [Luhmann, 2017] [Bässmann, 2010]

Rolling und Global Shutter

Bereits bei der Vorstellung der verschiedenen Sensortypen wurde die Unterscheidung zwischen dem Rolling Shutter und Global Shutter getroffen. Diese unterschiedlichen Arten der Bilderfassung werden nun gegenübergestellt.

Die dem CMOS Sensoren überwiegend genutzten Rolling Shutter werden die einzelnen Zeilen des Sensors zeitlich hintereinander belichtet. Das ermöglicht einen sehr schnellen Auslesevorgang und dementsprechend auch eine hohe Aufnahme rate. Nachteilig wirkt sich dieses Verfahren bei sich schnell bewegenden Objekten aus. Durch den Rolling Shutter Effekt werden solche Objekte verzerrt im Bild dargestellt. Dies ist insbesondere zur Analyse der Bilder oder Aufnahmen störend. Minimiert wird der Effekt bei CMOS Sensoren durch die Nutzung einer möglichst geringen Belichtungszeit. Damit das Bild dennoch nicht zu dunkel erscheint,

sollte die Belichtungszeit auf den halben Wert der Aufnahme­rate eingestellt werden. Werden also 30 Bilder in einer Sekunde erfasst, sollte die Belichtungszeit $1/60$ Sekunde betragen. Kom­plett vermieden wird dieser Effekt, wenn ein Global Shutter eingesetzt wird. Mit einem Global Shutter ausgerüstete Sensoren erfassen das Bild überall auf dem Sensor zeitgleich. Es entsteht dadurch kein zeitlicher Versatz. Bauartbedingt weisen alle CCD Sensoren einen Global Shutter auf. Jedoch werden auch einige CMOS Sensoren mit Global Shutter vertrieben. Zur Anwendung der Video Magnification ist ein Global Shutter zu empfehlen, aber solange nicht allzu schnelle Bewegungen vorliegen, nicht unabdingbar. [Paech, 2020]

4.2 *Workflow und Umsetzung*

Im Laufe der Arbeiten wurde ein eigener Workflow zur Aufnahme und Auswertung entwickelt, der im Folgenden vorgestellt wird.

4.2.1 **Ablauf einer Messung**

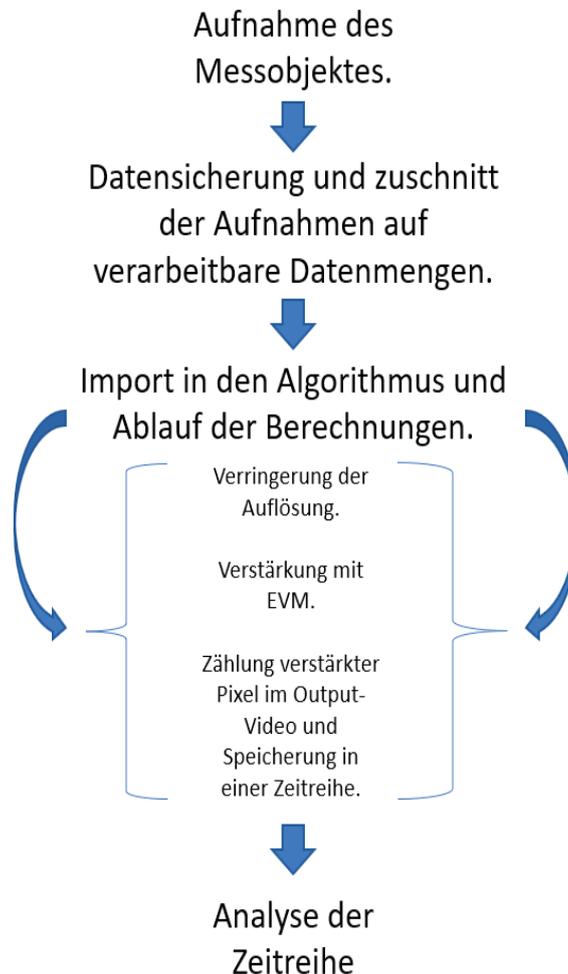


Abbildung 4.3: Übersicht zum Workflow der Messung und Auswertung.

1. Aufnahme des Messobjektes:

Zur Erfassung des Messobjektes genügt das Starten der Videoaufnahme. Dabei sollte auf eine richtige Fokussierung und günstige Einstellung der Belichtungszeit geachtet werden. Zudem ist der sichere Stand der Kamera wichtig. Die Herausforderung besteht insbesondere in der Auswahl des korrekten Standpunktes zur optimalen Beobachtung der erwarteten Bewegung. Optional kann die Software durch Markierung des Messobjektes mit kontrastreichen Marken unterstützt werden.

2. Datensicherung und zuschnitt:

Im Anschluss an die Aufnahme sollten die Daten auf einem externen Speichermedium gesichert werden. Da eine Aufnahme meist eine zu lange Dauer für die späteren Berechnungen aufweist, muss sie je nach verwendeter Auflösung gekürzt werden. Dies ist notwendig, da die benötigte Rechenleistung ansonsten die verfügbare Rechenleistung des Computers übertrifft.

3. Ablauf des Algorithmus:

Sobald der Videoclip vorbereitet ist, kann dieser in das genutzte Python-Programm eingelesen werden. Nach dem Einlesen wird das Video zunächst auf eine zuvor definierte Auflösung komprimiert, da ansonsten selbst mit den im Algorithmus genutzten Bildkomprimierungsverfahren nur sehr kurze Videos bearbeitet werden könnten. Nach der Komprimierung werden die im Kapitel 3.2 beschriebenen Berechnungen der Video Magnification durchgeführt. Anschließend wird das verstärkte Video analysiert. Um die Ergebnisse nicht nur optisch im Video betrachten zu können, sondern auch numerisch, werden in jedem Bild des ausgegebenen Videos die verstärkten Pixel gezählt und in einer Zeitreihe gespeichert. Alternativ können auch die Farbwerte eines zuvor definierten Pixels während des zeitlichen Verlaufes des Videos gespeichert werden. Eine nähere Beschreibung der softwaretechnischen Analyse des verstärkten Videos erfolgt in Kapitel 4.2.2..

4. Analyse der Zeitreihe und verstärkten Aufnahme:

Die erfassten Zeitreihen, sei es aus der Anzahl der je Bild verstärkten Pixel oder den jeweiligen Farbwerten eines Pixels, werden mit der Fourier-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt. Man erhält ein Frequenzspektrum, in welchem die vorhandenen Frequenzen einer Schwingung mit deren Amplitude einzusehen sind.

Natürlich können auch aus dem frequenzverstärkten Video wichtige Erkenntnisse gezogen werden. So lässt sich genau verorten, wo Bewegungen auftreten. Zudem können visuelle Informationen über die Stärke der Bewegungen erhalten werden. Eine Berechnung der Amplitude ist im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht vorgesehen und ist Bestandteil weiterer Untersuchungen.

4.2.2 Ausrüstung und Software

Hardware:

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Messungen wurden mit der Sony Alpha 7 II aufgenommen. Die Sony Alpha 7 II nutzt einen 35 mm CMOS Vollformat Sensor mit 24,3 MP.

Bei der Nutzung der Kamera wurde stets auf eine standfeste und schwingungsarme Aufstellung der Kamera geachtet, da Eigenbewegungen der Kamera die späteren Ergebnisse der Bewegungsverstärkung massiv beeinträchtigen können. Dazu wurde ein geodätisches Stativ genutzt. Das im Labor ebenfalls genutzte Smartphone LG G8s verfügt über eine 16MP Kamera. Im Hintergrund arbeitet dabei ein 2,84 GHz Octa-Core Prozessor, 6 GB RAM Arbeitsspeicher und ein interner Speicher von 128 GB.

Zur Verifizierung der mit der Kamera erfassten Beobachtungen wurde der Beschleunigungssensor eines Smartphones genutzt. Zudem wurden Bewegungen tachymetrisch getrackt, um weitere Vergleichsdaten zu den kameraerfassten Daten zu erhalten.

Ein großer Bestandteil jeder Messung ist die Auswertung. Im Fall der Eulerian Video Magnification heißt das zum einen die softwaretechnische Berechnung zur Verstärkung der Aufnahme, zum anderen die nachgestellte Erfassung von Frequenzen aus der Aufnahme.

Software:

Zur Berechnung der im Kapitel 3.2.4 beschriebenen Eulerian Video Magnification und der im Kapitel 3.2.5 beschriebenen Phase-based Video Magnification wurde eine mit der Bibliothek EVM.py frei verfügbare Python OpenCV Implementation genutzt. In dieser wurden Funktionen zur Verringerung des Rechenaufwandes durch Anpassung der Videoauflösung und Funktionen zur Analyse des verstärkten Videos beigefügt.

Der Programmablauf stellt sich wie folgt dar: Nach dem Import des Videos wird dieses zunächst auf die gewünschte Auflösung reduziert. Zumeist wurde eine Auflösung von 480x360 Pixel genutzt. Die maximale Auflösung und die Länge der zu verstärkenden Videoclips variierten je nach Leistungsfähigkeit des Computers. Mit einem Arbeitsspeicher von 8 GB gelingt es bei besagter Auflösung, Videos mit einer Länge von 20 Sekunden zu verstärken.

Nach Anpassung der Auflösung wird das Video in den Algorithmus der Eulerian oder Phase-based Video Magnification überführt. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird das Video dort mit der Gauß-Laplace Pyramide zunächst weiter komprimiert. Anschließend werden Frequenzen aus der Aufnahme gefiltert und verstärkt. Nach Rekonstruktion des Videos, bei der die Bildpyramiden aufgehoben werden, wird das verstärkte Video abgespeichert. Dieser Rechenprozess dauert mit den zuvor beschriebenen Voraussetzungen 3,5 Minuten.

Damit beginnt die Analyse des verstärkten Videos. Dazu wird zum einen in den einzelnen Bildern des Videos nach allen Pixeln gesucht, die durch die Verstärkung weiß eingefärbt wurden. Hierfür werden die einzelnen Bilder des Videos zunächst von RGB- in Graustufenbilder überführt. In diesen Graustufenbildern wird jeweils die Anzahl der Pixel gezählt, die

einen Farbwert von 255 aufweisen. Der Farbwert 255 steht für eine weiße Färbung des Pixels. Die Anzahl der Pixel pro Bild wird daraufhin in einer Textdatei abgespeichert. Zudem wird auch der Grauwert pro Bild eines zuvor im Video definierten Pixel abgegriffen und in einer Textdatei abgespeichert.

Zudem wurde zur Visualisierung aller Bewegungen im Verlauf des Videos ein Modul hinzugefügt, das aus einem Programm von Herrn Christian Wolff stammt. Dabei werden die einzelnen Graustufenbilder des Videos übereinandergelegt und als ein Bild ausgegeben.

4.3 Messungen unter Laborbedingungen

Um das Verfahren zunächst unter kontrollierten Bedingungen testen zu können, wurde das Labor der Hochschule Neubrandenburg genutzt. Beobachtet wurde ein Schwingtisch, der es ermöglicht eine ca. 10 cm große Platte mit einer zuvor gewählten Frequenz und Amplitude in Schwingung zu versetzen. Die Einhaltung der gewählten Frequenz wurde vor der Kameraaufnahme mit den Beschleunigungssensoren eines Smartphones überprüft. Beim Vergleich der Soll-Frequenz mit der Ist-Frequenz ist ein zufriedenstellendes Ergebnis erhalten worden. Mit dem Smartphone-Sensor konnte nachgewiesen werden, dass die Frequenz bis 10 Hz, wie zuvor eingestellt, an die Platte des Schwingtisches übertragen wird.

Amplitudenspektrum der Messung

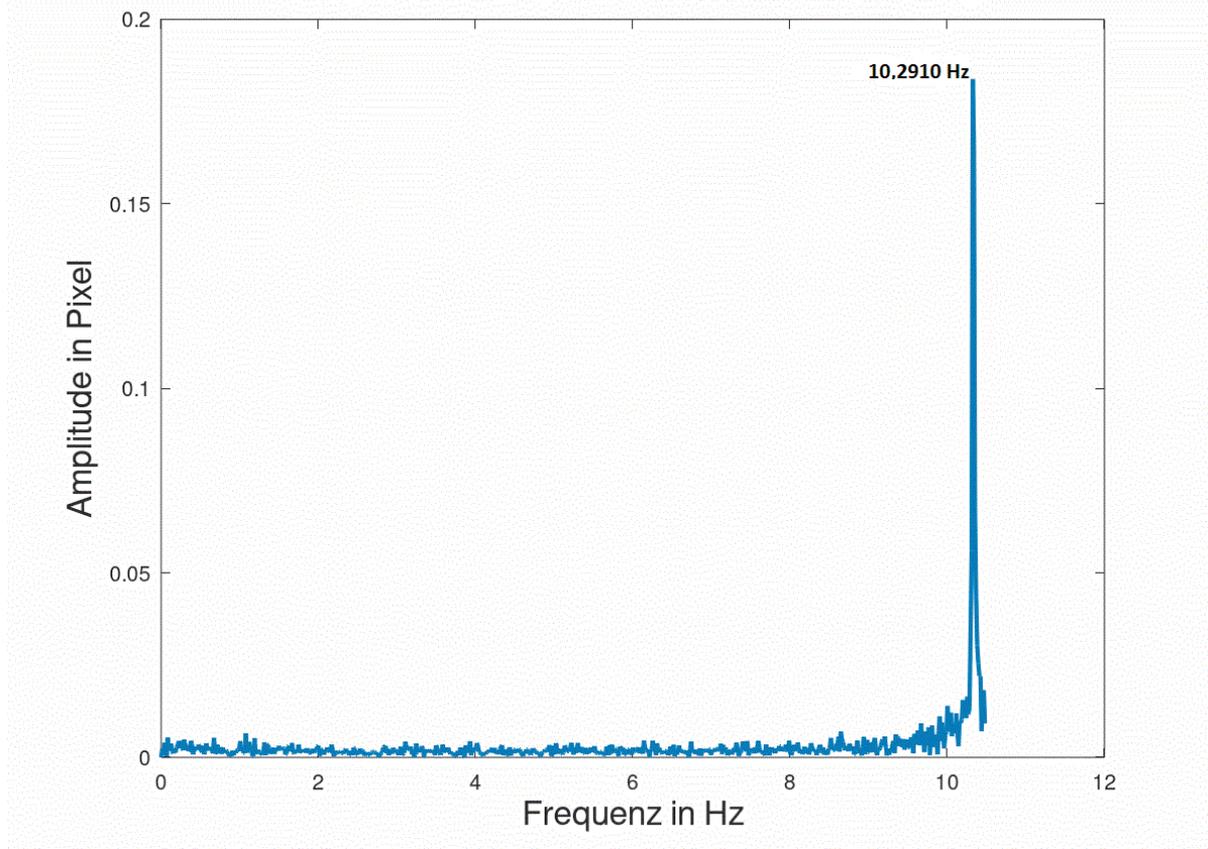


Abbildung 4.4: Spektrum der mit dem Beschleunigungssensor des Smartphones erfassten Schwingung.

Die in der Abbildung 9 dargestellte Frequenz von 10,29 Hz weicht um 0,29 Hz von den eingestellten 10 Hz ab. Grund für die Abweichung dürfte der ungenaue Einstellmechanismus des Schwingtisches sein. Höhere Frequenzen konnten mit dem Smartphone nicht kontrolliert werden. Die Abtastrate des Sensors reichte mit 20 Hz nicht mehr aus, um die Frequenzen von 11 Hz bis 15 Hz getreu abzutasten. Somit bestätigt die Messung in deutlicher Form das Abtasttheorem, welches besagt, dass die Abtastrate stets mehr als das doppelte der maximal zu erwartenden Frequenz betragen sollte. Dennoch reicht die Messung aus, um zu beweisen, dass der Schwingtisch in dem Bereich, indem Kameraaufnahmen verstärkt werden sollen, die Frequenzen wie eingestellt erzeugt.

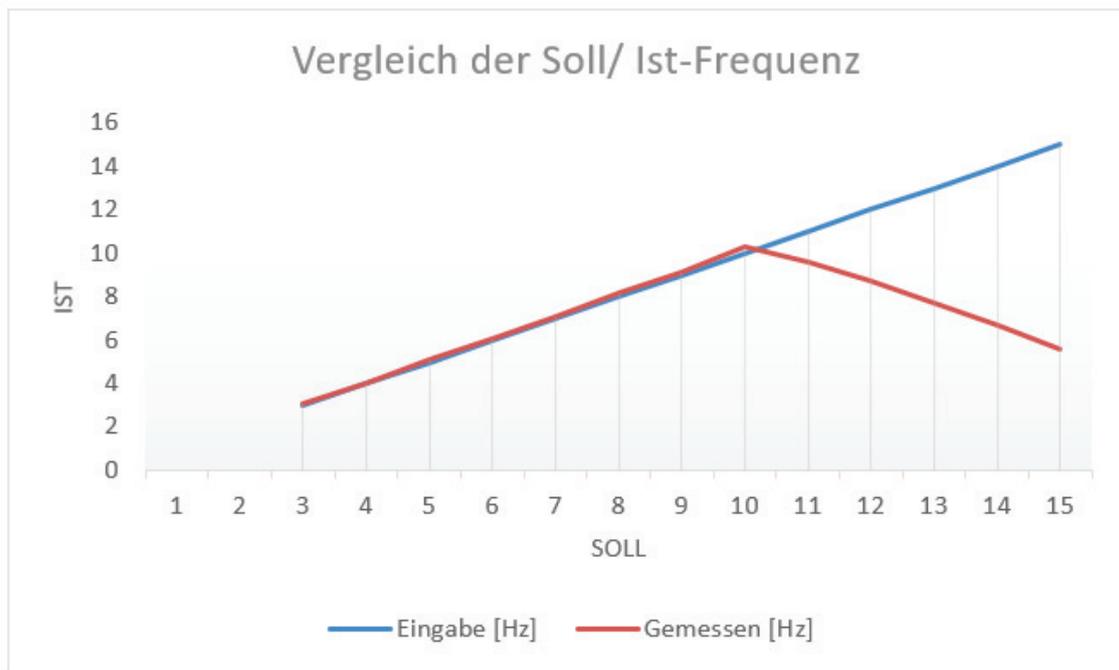


Abbildung 4.5: Vergleich der eingestellten Frequenz mit der gemessenen Frequenz. Gemessen wurde mit dem Beschleunigungssensor eines Smartphones.

Zudem wurde vor der Messung überprüft, ob die Schwingung des Schwingtisches Einfluss auf den nah gelegenen Standpunkt der Kamerasysteme hat. Dabei kam heraus, dass die massive Bauweise des Schwingtisches kaum Bewegungen an den Boden überträgt. Die geringen Schwingungen, die am Fuße des Schwingtisches noch zu erkennen waren, wurden bereits nach wenigen Zentimetern absorbiert.

4.3.1 Erfassung von Schwingungen mit einfachen Kameras

Die Anschaffung geeigneter Hardware ist oftmals ein großer Kostenfaktor für Unternehmen. Um zu überprüfen, ob Bewegungen auch mit einfachen Kameras verstärkt und in ihrer Frequenz bestimmt werden können, wurde neben einer hochwertigen Kamera auch die Kamera des Smartphones LG G8s genutzt.

Die Auswertung der Aufnahmen begann zunächst mit einer Ernüchterung. Bei einer Bewegung des Schwingtisches mit 3 Hz konnte optisch im verstärkten Video keine Bewegung erkannt werden. Nur eine scheinbar konstante Weißfärbung bewegter Bereiche liegt in dieser Aufnahme vor.

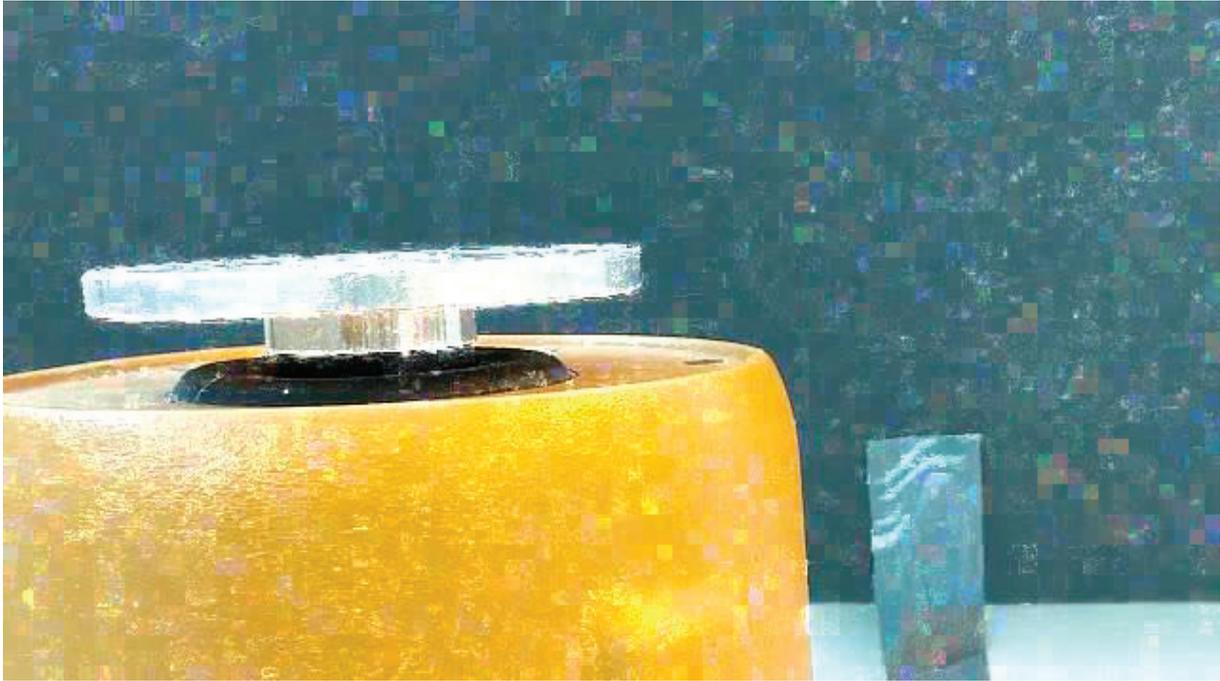


Abbildung 4.6: Videoausschnitt der verstärkten Smartphone-Aufnahme.

Bei dieser Aufnahme wurde die Eulerian Video Magnification genutzt. Dementsprechend wurde die Farbänderung der Pixel verstärkt. Die schlechte visuelle Aufbereitung der Verstärkung resultiert daher, dass lediglich die ohnehin schon hellen Pixel des sich bewegenden Bauteils weiß gefärbt wurden. So erscheinen verstärkte Pixel in nur geringem Kontrast. Trotz der schlechten visuellen Wiedergabe der Verstärkung, konnte mit erfassen der verstärkten Pixel und entsprechender Zeitreihenanalyse die korrekte Frequenz von 3 Hz ermittelt werden.

Amplitudenspektrum der Messung

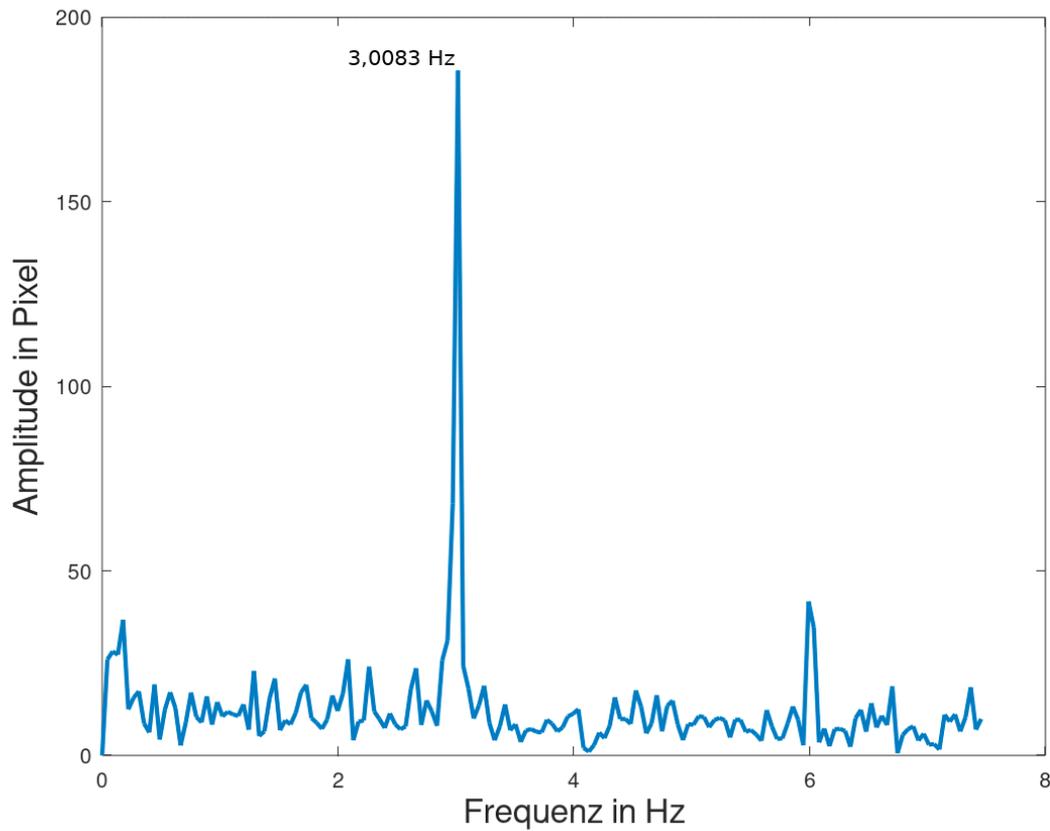


Abbildung 4.7: Spektrum des schlecht visualisierten Smartphone Videos.

Um dennoch die Video Magnification mit ihrem größten Vorteil, der anschaulichen Visualisierung, zu nutzen, wurde die Software umgestellt und fortan mit der im Kapitel 3.2.5 beschriebenen Phase-based Video Magnification gearbeitet. Die Phase-based Video Magnification erweist sich als rechenleistungsintensiver, weshalb das Programm um eine Funktion zur Verringerung der Auflösung erweitert werden musste. Das Ausgabevideo wies daraufhin zufriedenstellende visuelle Eigenschaften auf.



Abbildung 4.8: Videoausschnitt der bewegungsverstärkten Smartphone Aufnahme.

Der im Abbildung 4.8 gezeigte Videoausschnitt weist klarere Kanten auf. Zudem wird das Bild weniger stark von verstärkten Pixeln überblendet. Trotz gleichen Verstärkungsfaktors α ist im Video die Bewegung sehr viel besser wahrzunehmen. Die aus dem Video ermittelte Frequenz bleibt mit 3 Hz korrekterweise konstant.

Amplitudenspektrum der Messung

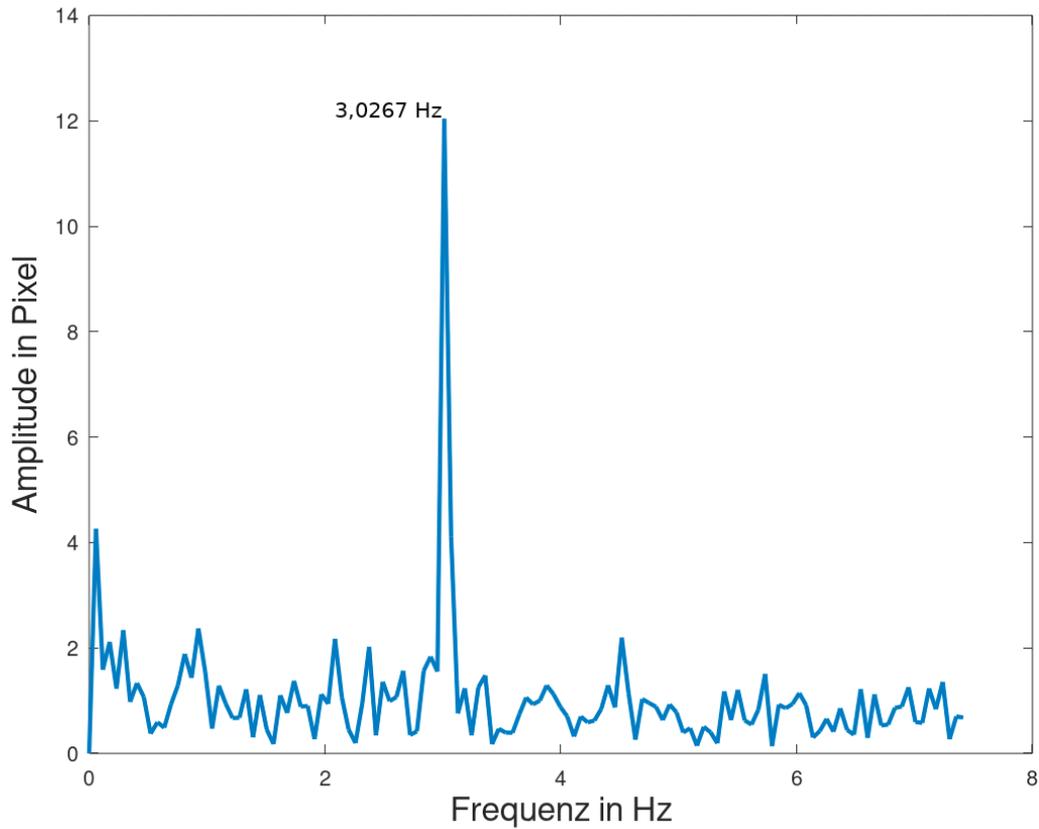


Abbildung 4.9: Spektrum des zufriedenstellend visualisierten Smartphone Videos.

Vergleichend wird der Unterschied zwischen den Aufnahmen noch einmal in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Darstellung zeigt dabei jeweils alle Bewegungen an, die im Laufe des Videos erfasst wurden.

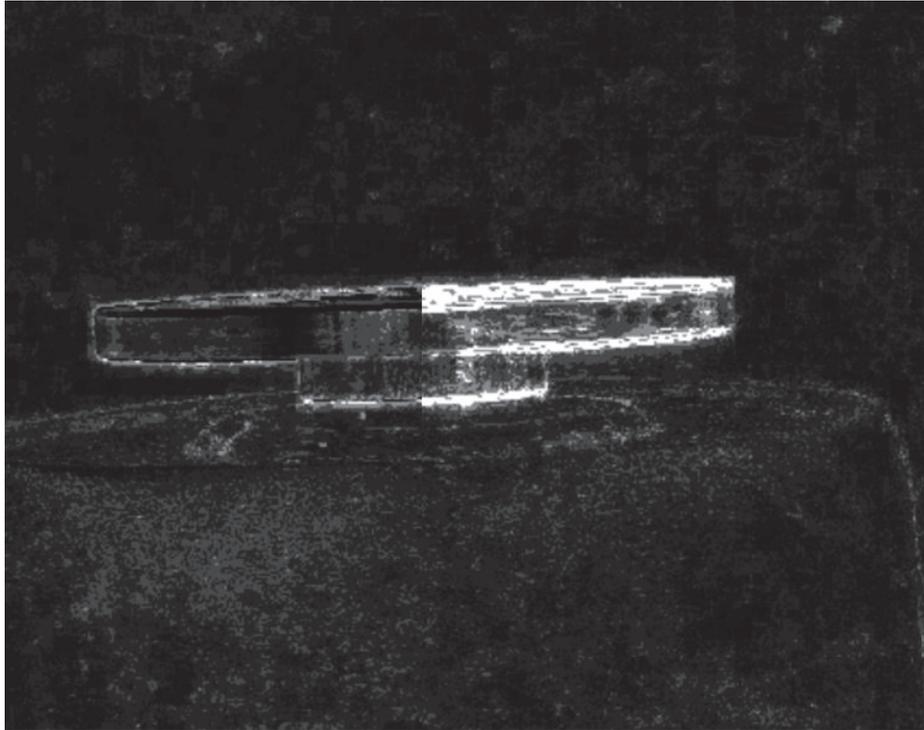


Abbildung 4.10: Vergleich der Schwingtischaufnahme mit der Verstärkung durch die Eulerian Video Magnification (links) und der Phase-based Video Magnification (rechts).

Die Abbildung zeigt, dass Bewegungen bei der Phase-based Video Magnification deutlicher visualisiert werden. Eine Verortung bewegter Bereiche ist leichter möglich. Dazu erfolgt im Folgenden eine Gegenüberstellung zwischen dem um $\alpha = 50$ verstärkten und dem nicht verstärkten Video.

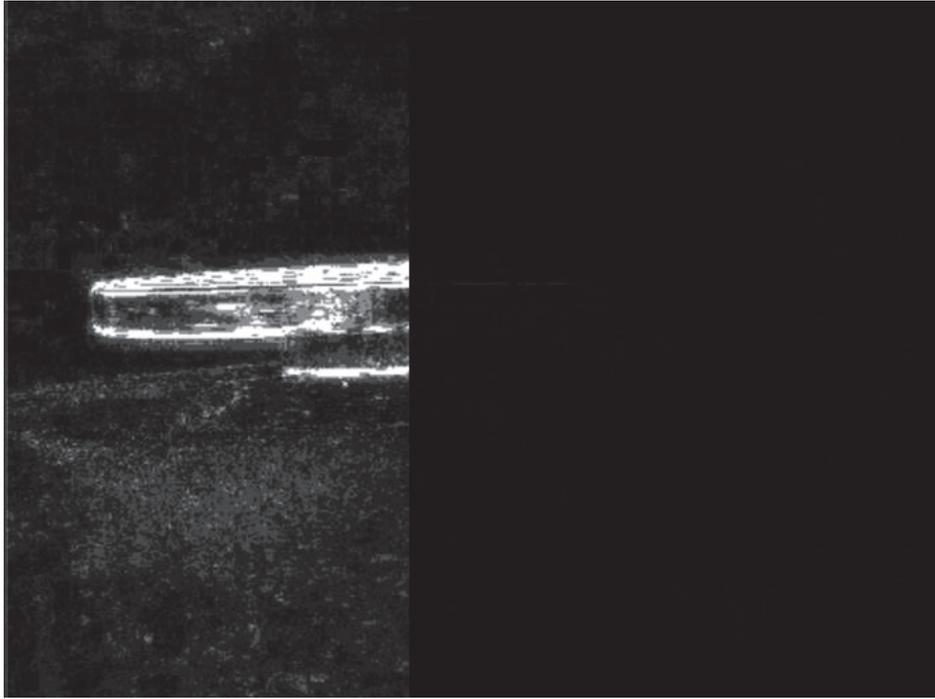


Abbildung 4.11: Vergleich des um $\alpha=50$ bewegungsverstärkten Videos (links) mit dem Originalvideo (rechts).

Im linken Bild sind die sich bewegenden Kanten sehr deutlich zu erkennen. Die Umrisse aller sonstigen Kanten entstehen durch Rauschen und kleine Bewegungen der Kamera an selbst. Trotz des Rauschens kann sehr gut zwischen bewegten und nicht bewegten Regionen unterschieden werden. Im rechten Bild ist nur eine sehr leichte Kontur der Oberkante, der in Schwingung versetzten Platte zu erkennen.

Doch bis zu welcher Frequenz ist es möglich, Schwingungen mit einer einfachen Smartphone-Kamera zu erfassen?

Wie in Abbildung 4.11 bereits zu erkennen, kann selbst aus einer Smartphone-Aufnahme die Frequenz eines schwingenden Objektes ermittelt werden. Gemäß des Abtasttheorems sollte dies bei einer Aufnahmerate von 30 Bildern in der Sekunde bis zu einer Frequenz von 15 Hz möglich sein. Da mit dem Beschleunigungssensor lediglich der Frequenzbereich bis 10 Hz verifiziert werden konnte, wurde nur dieser Bereich überprüft. Bis 10 Hz konnte die Frequenz eindeutig ermittelt werden.

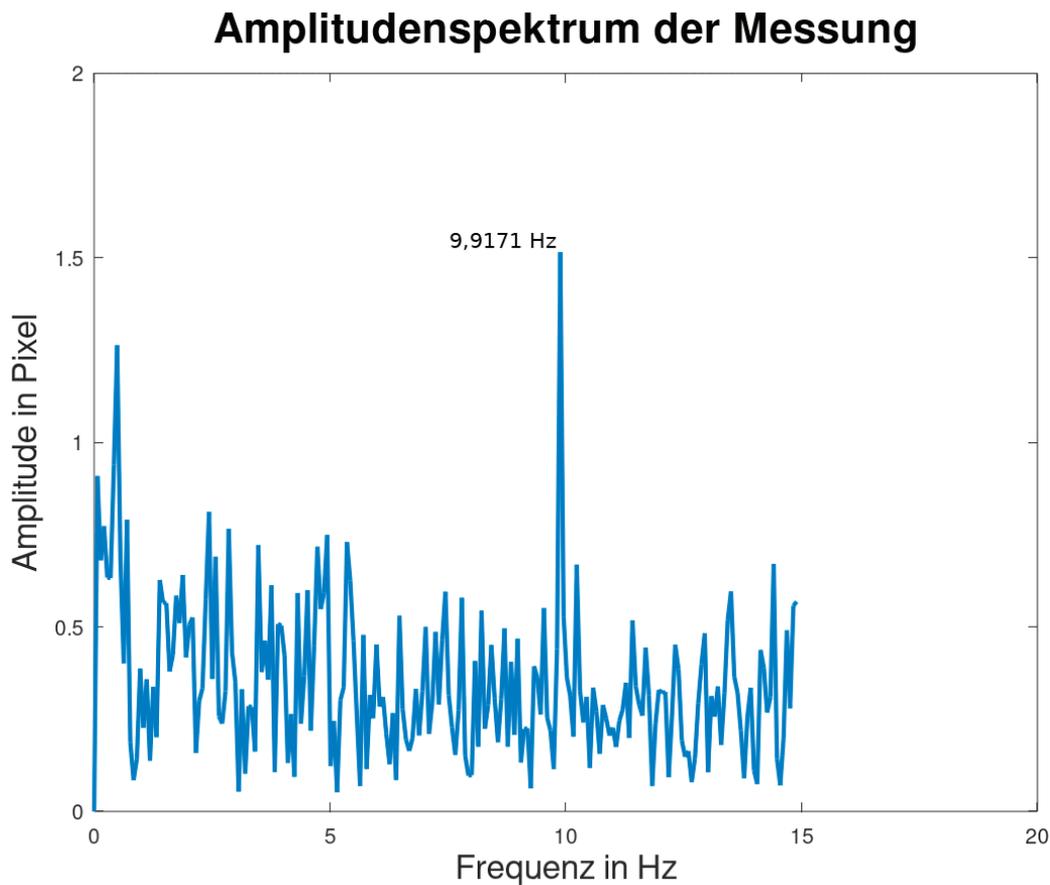


Abbildung 4.12: Spektrum des Schwingtisches bei 10 Hz.

Im Vergleich zur Messung mit dem Beschleunigungssensor zeigt sich, dass mit dem videobasierten Verfahren ebenfalls alle Frequenzen mit dem Einsatz des Smartphones bestimmt werden konnten. Allerdings leidet das videobasierte Verfahren stärker unter dem Einfluss von Rauschen.

Bei hohen Frequenzen ist ein Rolling Shutter Effekt erkennbar, welcher ein Grund für das Rauschen im Powerspektrum darstellt.

4.3.2 Erfassung von Schwingungen mit „professionellen“ Kameras

In welchem Maß eine technologisch besser ausgestattete Kamera die Ergebnisse gegenüber den Aufnahmen der Smartphone-Kamera verbessert, wird in diesem Kapitel geprüft. Optimalerweise hätten die hier beschriebenen Testungen mit einer Industriekamera, die mit einem Global Shutter ausgerüsteten ist, stattfinden müssen. Da ein solches zumeist kostenintensives und hoch spezialisiertes System nicht zur Verfügung stand, wurden die Aufnahmen mit einer modernen Vollformatkamera erfasst, der Sony Alpha 7 II. Die Parameter dieser Kamera sind in Kapitel 4.2.2 einzusehen.

Entsprechend der technischen Daten ist die Vollformatkamera der Smartphone-Kamera als überlegen anzusehen. Dennoch enttäuschten die Aufnahmen unter den getroffenen Einstellungen mit der Alpha 7 II im Vergleich zu den mit dem Smartphone aufgenommenen Video-clips. Mit den Aufnahmen gelang es ebenfalls, die Schwingungen des Tisches bis zu einer Frequenz von 10 Hz zu ermitteln. Leider trat im Vergleich zu den Smartphone-Aufnahmen stärkeres Rauschen auf.

Amplitudenspektrum der Messung

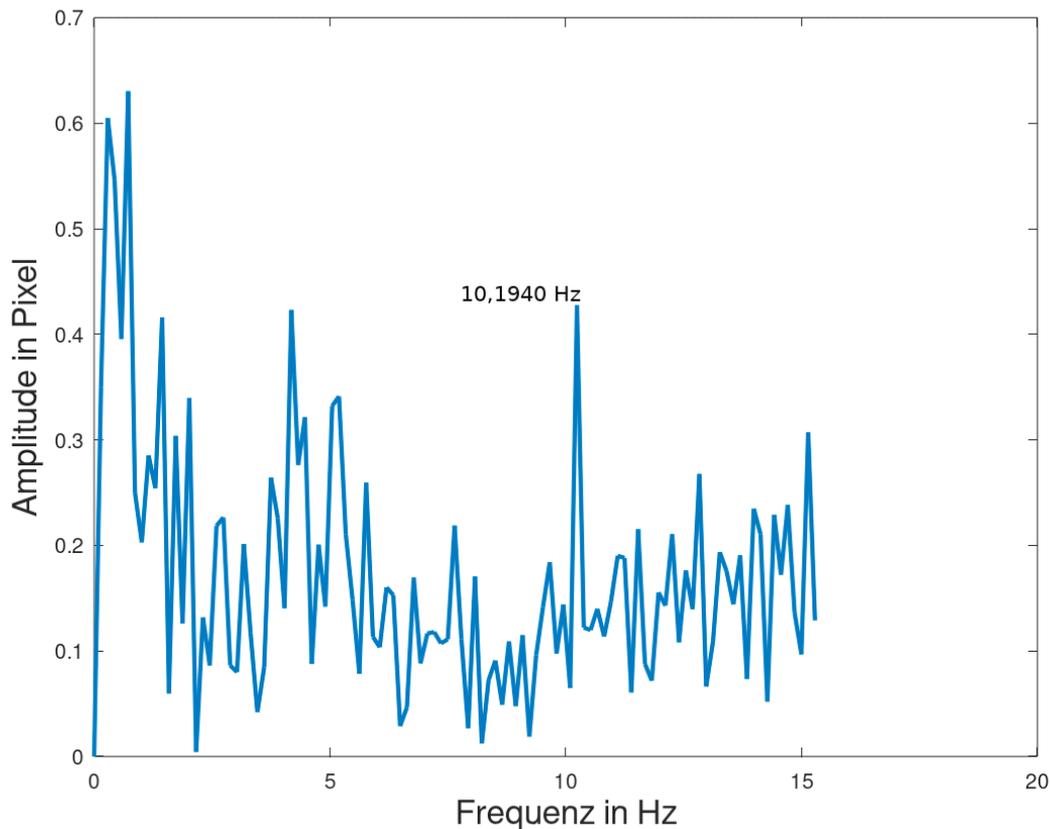


Abbildung 4.13: Spektrum einer Aufnahme bei 10Hz mit der Alpha 7 II.

Zu sehen ist korrekterweise ein Peak bei 10 Hz. Dieser tritt aus dem Rauschen deutlich, aber weniger stark als bei vorherigen Messungen hervor. Des Weiteren ist im Bereich sehr geringer Frequenzen, gegen 0 Hz, ein deutlicher Anstieg mit mehreren Peaks zu erkennen. Dieser entsteht durch die hohe Verstärkung des Videos, die nötig ist, um den erwarteten Peak deutlich zu erhalten. Eine hohe Verstärkung führt zu verstärktem, niedrig frequentem Rauschen im Video. Die Notwendigkeit der höheren Verstärkung erklärt sich durch die Verstärkung um α . Wenn zwei unterschiedliche Amplituden um einen kleinen Wert α multipliziert werden, ist die Differenz der Amplituden kleiner als bei einem hohen α .

Der Peak bei 5 Hz zeigt, dass im Video die Auf- und Ab Bewegung des Tisches teilweise als eine Bewegung erfasst wird.

Optisch lassen sich bis einschließlich einer Frequenz von 10 Hz bewegte Bereiche gut erkennen und klar abgrenzen. Allerdings ist bei 10Hz ein Rolling Shutter Effekt erkennbar, der zum hohen Rauschniveau im Powerspektrum der Aufnahme beiträgt.

Auch wenn die Sony Alpha 7 II mit den genutzten Einstellungen unter Laborbedingungen etwas schlechtere Ergebnisse als die Kamera des Smartphone LG G8s liefert, ist das Ergebnis zufriedenstellend. Die Kamera eignet sich zur Beobachtung aller im Weiteren Laufe dieser Arbeit vorgestellten Objekte.

Biegelinienbestimmung unter Laborbedingungen:

Oftmals ist es schwer zu ermitteln, wo Bewegungen in Gebäuden vorliegen, wie sie verlaufen und wo sie ihren Ursprung nehmen. Die Video Magnification könnte dies zukünftig vereinfachen. Aus diesem Grund wurde bereits im Labor untersucht, wie gut sich das Bewegungs- beziehungsweise Verformungsverhalten eines Objektes mit diesem Verfahren nachvollziehen und beobachten lässt.

Dazu wurde auf dem Schwingtisch eine länglich geschnittene Metallplatte installiert. Der Hintergrund ist zur Kontrasterhöhung verdunkelt. Die Kamera erfasst den Schwingtisch und die Metallplatte mit 30 Bildern in der Sekunde und einer Auflösung von 1440x1080 Pixeln.



Abbildung 4.14: Versuchsaufbau im Labor.

Mit dem Aufbau kann auf einfache Weise, ein im Wind stehender Mast simuliert werden. Die Schwerkraft stellt in diesem Szenario einen gleichmäßigen Wind dar, während die Bewegungen des Schwingtisches das Auslenken des Turmes bei einer Windböe herbeiführt.

Zur Auswertung der Aufnahme wird aus Gründen der Rechenbarkeit ein 20 Sekunden langer Ausschnitt aus der Ursprungsaufnahme ausgeschnitten. Zusätzlich wird die Auflösung des Ausschnittes auf 480x360 Pixel verringert.

Das daraus resultierende verstärkte Video verdeutlicht die Verformung der Metallblech aufgrund der einwirkenden Kräfte.

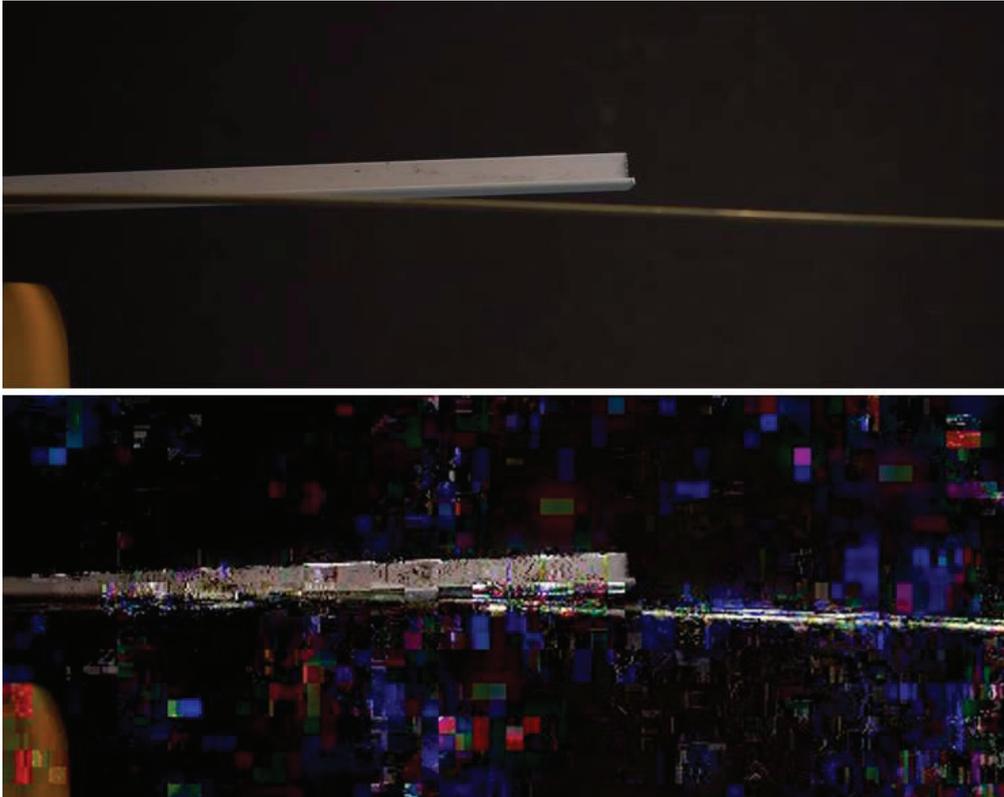


Abbildung 4.15: Videoausschnitt aus dem Originalvideo (Oben) und dem verstärkten Video (Unten).

Im Bild sehen wir einmal oben und einmal unten einen Frame aus dem Video. Unten links ist der Schwingtisch zu erkennen. Mittig von links nach rechts verläuft das Metallblech, dessen Biegelinie es zu visualisieren galt. Dass dies gelungen ist, lässt sich gut beim Vergleich des oberen und unteren Videoframes erkennen. Im unteren Frame ist das Blech ab der Bildmitte weiß eingefärbt. Im Verlauf nach rechts hin intensiviert sich die weiße Einfärbung. Das belegt das erwartete Verformungsverhalten des Bleches auf dem Schwingtisch. Die Schwingung des Bleches verstärkt sich mit zunehmendem Abstand zur Arretierung auf dem Schwingtisch.

4.3.3 Resümee der messtechnischen Eignung unter Laborbedingungen

Die Aufnahmen unter Laborbedingungen zeigen, dass mit der Video Magnification Bewegungen von Objekten unter kontrollierten Bedingungen tatsächlich visualisiert werden können. Zudem funktioniert die in Kapitel 3.2.2 erläuterte Methode zum Abgreifen der Frequenz aus dem verstärkten Video zuverlässig. Wie hoch die Frequenzen dafür maximal sein dürfen, hängt vom jeweiligen Kamerasystem ab. Das Smartphone LG G8s lieferte bis 10 Hz klare Ergebnisse. Die Sony Alpha 7 II schafft es ebenfalls Frequenzen von 10 Hz zu bestimmen,

jedoch unter Einfluss eines höheren Rauschpegels. Grund dafür ist der Rolling Shutter Effekt, der bei der Sony Alpha 7 II etwas mehr als beim LG G8s zu bemerken ist.

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ist dieser Effekt bei CMOS Sensoren ganz normal. Durch günstige Einstellungen der Kamera kann der Rolling Shutter Effekt jedoch minimiert werden. Es ist möglich, dass beim LG G8s günstigere Kameraeinstellungen genutzt wurden als bei der Sony Alpha 7 II, da die Einstellungsmöglichkeiten der Smartphone-Kamera dem Nutzer besser bekannt sind. Es zeigt sich, dass eine gute Kenntnis über die Möglichkeiten des Messsystems auch im Falle von Kamerasystemen unerlässlich für optimale Ergebnisse ist. Bei den Aufnahmen mit der Alpha 7 II im Labor wurde die Belichtungszeit nicht optimal eingestellt. Um den Rolling Shutter Effekt zu minimieren, sollte sie das Doppelte der Aufnahmegeschwindigkeit betragen. Bei den aufgenommenen 30 Bildern in der Sekunde wäre eine Belichtungszeit von 1/60 Sekunde einzustellen gewesen.

Dennoch eignet sich die Kamera des Herstellers Sony, auch mit den im Labor festgestellten Ergebnissen für die folgenden Messungen unter realen Bedingungen. Der Aufbau als professionelle Kamera ermöglicht das feste und standsichere Aufbauen mit einem hochwertigen Stativ. Zudem liefert die Kamera die Möglichkeit der Nutzung eines geeigneten Objektivs.

5 Erprobung des Verfahrens an realen messtechnischen Szenarien

Zur Erprobung eines Verfahrens ist die Anwendung unter realistischen Bedingungen unerlässlich. So beeinflussen eine Vielzahl von Faktoren das Ergebnis der Messung. Die Qualität der Videoaufnahme kann unter ungünstigen Lichtbedingungen leiden. Zusätzlich kann die Sicht auf das Messobjekt durch Dunst, Nebel und Regen beeinträchtigt werden. Sodass Kontraste im Video nicht mehr optimal erscheinen und die Weiterverarbeitung gestört werden kann. Ein weiterer Faktor zur Generierung einer guten Aufnahme des Objektes ist der Standort der Kamera und die Erreichbarkeit des Objektes. Die Kamera muss sicher und standfest aufgestellt werden, um Eigenbewegungen zu vermeiden. Auch sollten möglichst wenige Bewegungen sonstiger Objekte auf dem Video erfasst werden. Gleichzeitig muss die Kamera das Messobjekt in den zu prüfenden Regionen so erfassen, dass Bewegungen in der Bildebene möglichst klar und groß erscheinen. Optimale Bedingungen liegen somit nur selten vor, sodass die Anforderungen an das Messsystem außerhalb des Labors erhöht sind. In diesem 5. Kapitel werden Beispiele aufgezeigt, an denen das Potenzial der Video Magnification in verschiedenen Anwendungsbereichen außerhalb des Labors aufgezeigt werden soll.

5.1 *Vibration eines LKW-Motor*

In der Industrie, insbesondere der Automobilindustrie ist die zuverlässige Funktionsweise, aber auch ein wertiges Auftreten der Produkte wichtig. Produktions- oder Konstruktionsfehler können zu Schwingungen führen, die störende Geräusche oder gar Ausfälle der Baugruppe zur Folge haben. Die Detektion und Abstellung von Fehlern ist dabei oftmals aufwändig, da zumeist vielerlei Bauteile den Auslöser des Problems darstellen könnten. Die Verstärkung und Analyse einer Videoaufnahme könnte solche Problemabstellungsverfahren unterstützen. So kann im nun vorgestellten Beispiel der Motorraum eines Mercedes-Benz Vario 814DA berührungsfrei auf dessen Vibrationsverhalten untersucht werden. Von Vorteil ist dabei, dass mehrere Bauteile im Motorraum gleichzeitig beobachtet werden. Zudem kann der Sensor nicht durch die im Motorraum herrschenden hohen Temperaturen beschädigt werden. Lediglich Refraktionseinflüsse können die Aufnahme stören.

Der in diesem Beispiel gezeigte Motor befindet sich im Leerlauf und arbeitet dabei mit einer angegebenen Drehzahl von 500 Umdrehungen in der Minute. Schwingungen des Motors, die

direkt aufgrund der Arbeit des R4 Motors entstehen, weisen somit eine Frequenz von 8,33 Hz auf.

Um diese erwartete Frequenz nachzuweisen, wurde der Motorraum mit der Sony Alpha 7 II aufgenommen. Es wurde eine Aufnahmezeit von 30 Bildern in der Sekunde bei einer Auflösung von 1440x1080 Pixeln genutzt.

Die folgende Darstellung zeigt das Originalbild (rechts) und das um $\alpha = 25$ verstärkte Bild auf der linken Seite.

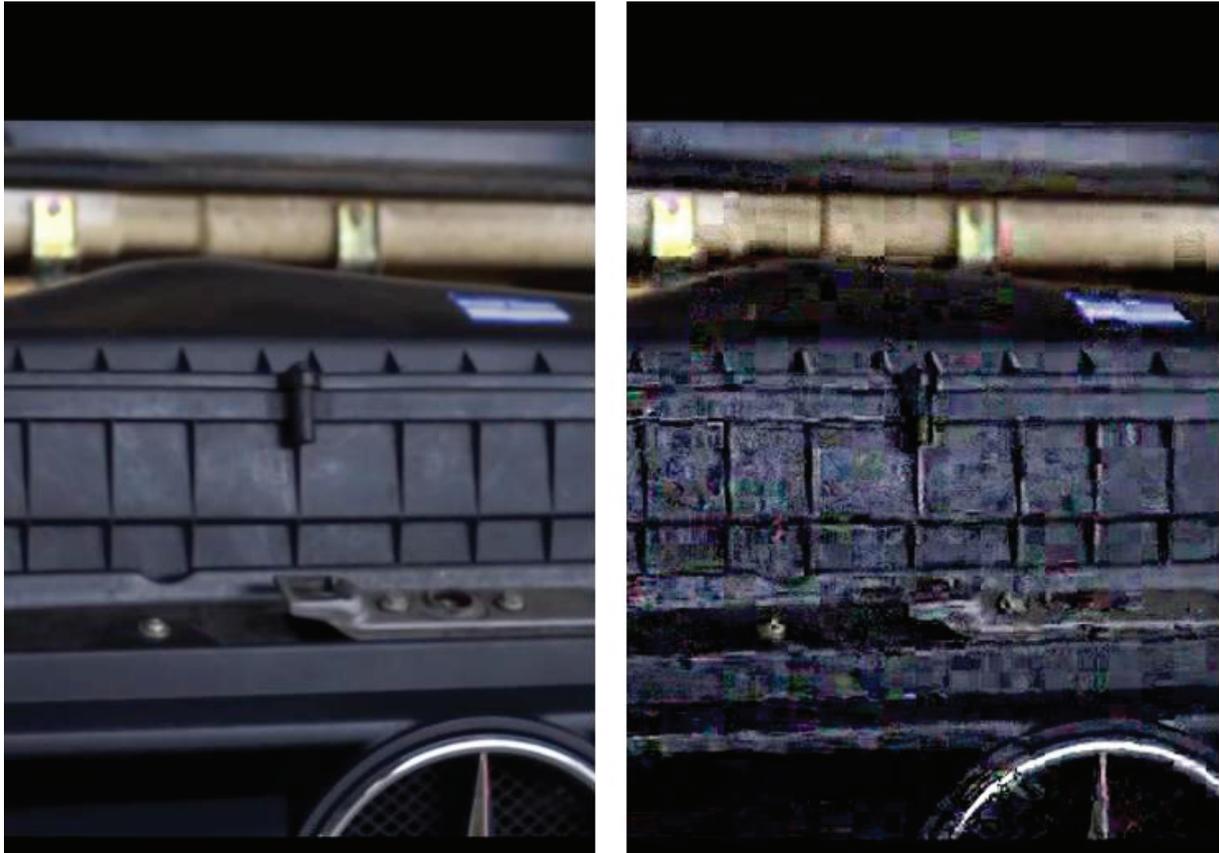


Abbildung 5.1: Bildausschnitt einer Videoaufnahme des Motorraumes mit dem Originalvideo (rechts) und dem verstärkten Video (links).

In der Abbildung sehen wir, dass im verstärkten Bild die Rippen der Motorverkleidung rechts einen weißen Rand aufweisen. Dies stellt im verstärkten Video eine wellenartige von rechts nach links verlaufender Schwingung des Motors dar. Diese Bewegung entspricht der zeitlich versetzten Kolbenbewegung des Reihen-Vierzylinder-Motors.

Weiter wurde das Powerspektrum der aus der Aufnahme gewonnenen Zeitreihe ermittelt.

Amplitudenspektrum der Messung

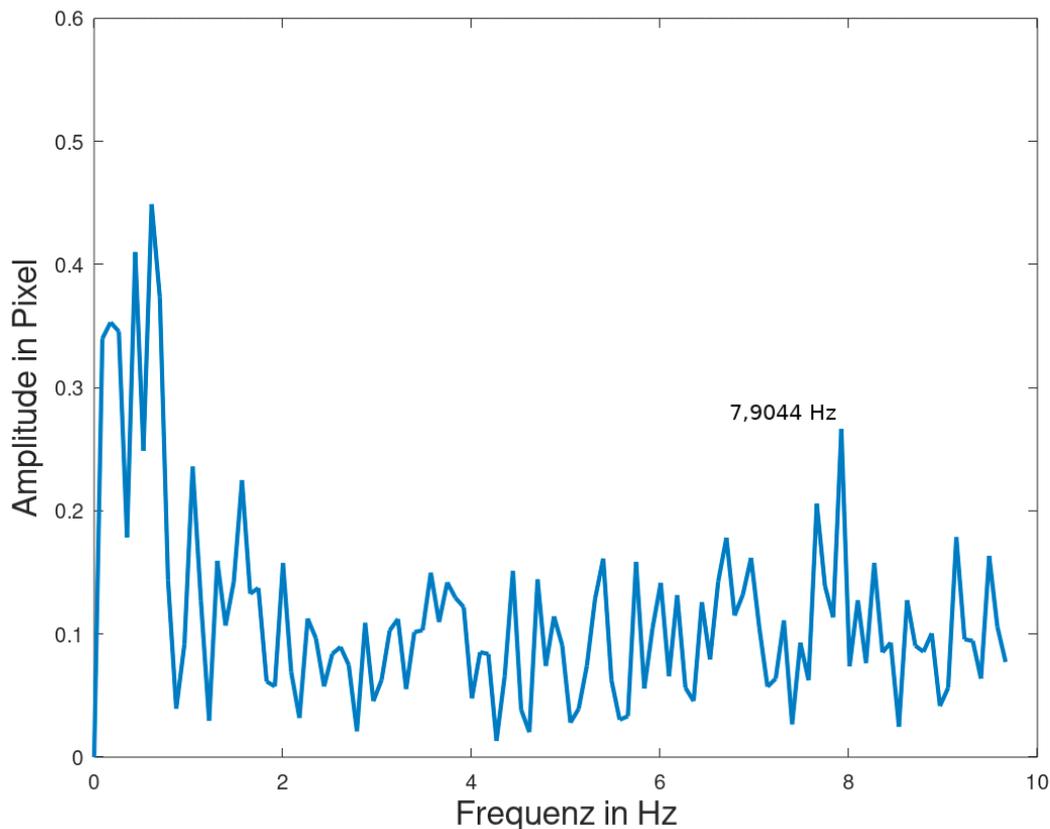


Abbildung 5.2: Spektrum der Motoraufnahme.

Zu sehen ist ein Peak bei 7,90 Hz. Demnach könnte diese Frequenz die Schwingung des Motors aufgrund der Bewegung der Zylinder darstellen. Darüber hinaus wurde mit Auswahl eines kleineren Abschnittes der Zeitreihe eine Frequenz von 8,35 Hz festgestellt. Diese entspricht somit erstaunlich genau der vorhergesagten Frequenz von 8,33 Hz. Eine weiterführende Verifizierung des Ergebnisses war leider nicht möglich da aufgrund der hohen Temperatur im Motorraum wurde von einem Einsatz weiterer Sensorik abgesehen wurde.

So zeigt dieses Beispiel, dass zum einen das Bewegungsverhalten des Motors im verstärkten Video veranschaulicht wird und darüber hinaus Aussagen zur Frequenz der im Video dargestellten Bewegungen ermöglicht werden. Eine Aussage, welches Bauteil welche Frequenz erzeugt, würde jedoch weitere Messungen benötigen, entweder mit zusätzlicher Sensorik oder mit Nahaufnahmen der einzelnen Bauteile.

5.2 Rundlauf eines Rades und Bremsscheibe eines Krades

In der Industrie kann ebenfalls die Bestimmung des Rundlaufs von Bedeutung sein. Das kann zum einen taktil, beispielsweise mit einer Messuhr erfolgen, oder durch optische Systeme, die die Oberfläche des zu prüfenden Körpers mit einem Laser erfassen. Eine taktile Messung ist insbesondere bei empfindlichen oder schwer erreichbaren Bauteilen nicht immer möglich. Optische Systeme sind dahingehend leistungsfähiger, aber auch kostenintensiver. Ein kamerabasiertes Verfahren könnte somit eine gute Ergänzung der bisher eingesetzten Verfahren liefern. Im nun vorgestellten Beispiel wird der Rundlauf eines Motorradvorderrades visualisiert. Abweichungen im Rundlauf der Räder des Motorrades sind durch vorliegende Standschäden zu erwarten.

Die Erwartung bestätigt sich mit Betrachtung des um $\alpha = 20$ verstärkten Videos. Das Video erfasst das Rad parallel zur Rotationsachse. Die Aufnahme ist mit 30 Bildern in der Sekunde bei einer Auflösung von 1440x1080 Pixeln aufgenommen worden. Im Video lässt sich der Durchlauf einer deutlich weiß gefärbten Kontur auf der Innenseite der Felge erkennen. Dem folgt versetzt eine weiße Kontur auf der Innenseite.



Abbildung 5.3: Ausschnitt der verstärkten Radaufnahme. Die innere Kontur ist weiß eingefärbt.



Abbildung 5.4: Ausschnitt der verstärkten Radaufnahme. Die äußere Kontur ist weiß eingefärbt.

Die Abfolge der verstärkten Bereiche der Felge lassen auf eine Abplattung der Felge schließen. Eine weiße Kontur am inneren Rand der Felge besagt demnach, dass sich der Felgenreand nach innen verschiebt. Der Radius der Felge ist in diesem Bereich kleiner. Anschließend folgt die äußere Kontur. Die Felge dehnt sich dabei wieder im Radius aus und kehrt zu ihrem Nennradius zurück. Demzufolge ist die Felge zwischen den eingefärbten Bereichen eingedrückt.

Wie zuvor eingesehen, lassen sich Abweichungen im Lauf eines rotierenden Körpers darstellen. Die Aufnahme kann dabei in kürzester Zeit berührungsfrei durchgeführt werden.

5.3 *Biegelinie eines Windkraftanlagenrotorblattes*

Um die bereits im Labor getestete Fähigkeit der Darstellung der Biegelinie anhand eines realen Beispiels vorzustellen, wurde eine Windkraftanlage aufgenommen. Die Windkraftanlage rotierte dabei nicht. Die hohen Windgeschwindigkeiten am Tag der Messung führten zum Abschalten einiger Windräder, da andernfalls das Stromnetz überlastet werden könnte. Die Aufnahme fand mit dem bereits in Versuch 5.2 genutzten Videoparametern statt.

Im folgenden Videoausschnitt ist die Biegelinie des nach oben gerichteten Rotorblatts klar zu erkennen.



Abbildung 5.5: Biegelinie des Windradrotorblattes.

Auch die sich elastisch verformenden Bereiche der anderen beiden Rotorblätter sind gut zu erkennen. So lässt sich auch ein Unterschied zwischen der Verformung des nach oben gerichteten Rotorblatts und des horizontal stehenden Rotorblatts erkennen. Der Bereich der Verformung ragt beim Letzteren näher an die Drehachse heran.

Neben der Visualisierung der Biegelinie wurde auch die Frequenz der Schwingung des vertikal ausgerichteten Rotorblattes gemessen. Dem Rotorblatt ist eine Schwingung mit einer Frequenz von 1,51 Hz zuzuordnen. Zudem ist eine weitere Frequenz von 0,47 Hz zu erkennen. Verifiziert wurde die ermittelte Frequenz des Windrads im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Anhand eines anderen Windrads konnte überprüft werden, ob auch langsame, kontinuierliche Bewegungen hervorgehoben werden können. Das Windrad beendet in der Aufnahme die Rotation. Dadurch kann die immer geringer werdende Bewegung des Windrads nachverfolgt werden. Die Umsetzung gelingt gut, wie im folgenden Bild zu erkennen ist.



Abbildung 5.6: Windkraftanlage mit geringer Rotation.

Die Kontur der Bewegung des Windrades ist dabei bis zum visuell wahrnehmbaren Stillstand hin erkennbar.

5.4 ***Bewegungsverhalten einer Fußgängerbrücke***

Im Folgenden wird ein klassisches Szenario einer ingenieurgeodätischen Überwachungsmessung vorgestellt. Es handelt sich um eine Fußgängerbrücke, dessen Bewegungsverhalten negativ aufgefallen ist. Um einen sicheren Betrieb der in Altentreptow befindlichen Fußgängerbrücke zu gewährleisten, wird die Bewegung der Brücke beobachtet.

Im Zuge dessen wird die Brücke mit einem Tachymeter erfasst. Zusätzlich beobachtet eine Kamera die sich bewegende Brücke. Während das Tachymeter einen seitlich an der Brücke befestigten Reflektor erfasst, beobachtet die Kamera die Brücke ebenfalls längsseitig, aber im Gegensatz zum Tachymeter in Gänze. Im Weiteren wird zunächst die Messung mit dem Tachymeter ausgewertet. Anschließend sind die Ergebnisse der Kameraaufnahme einzusehen.

Tachymeter Messungen:

Zur Messung der Bewegung der Brücke mit dem Tachymeter wird der Reflektor automatisch verfolgt und im technisch kleinstmöglichen Intervall dauerhaft gemessen. Dabei wird vor al-

lem die im Vergleich zur Entfernungsmessung, schneller messbare Richtung erfasst. Es können so bis zu 19 Messungen in der Sekunde durchgeführt werden. Mithilfe eines Python-Programmes wurden die Messwerte direkt in einer Textdatei abgespeichert und anschließend ausgewertet. Im Zuge dessen wurde mit der Fouriertransformation aus der erfassten Zeitreihe das Frequenzspektrum berechnet.

Zur Messung wurde die Brücke durch das wiederholte Auf- und Abspringen einer Person in Schwingung versetzt. Es wurde die vertikale Bewegung der Brücke beobachtet. Dabei wurde eine Frequenz von 4,16 Hz festgestellt.

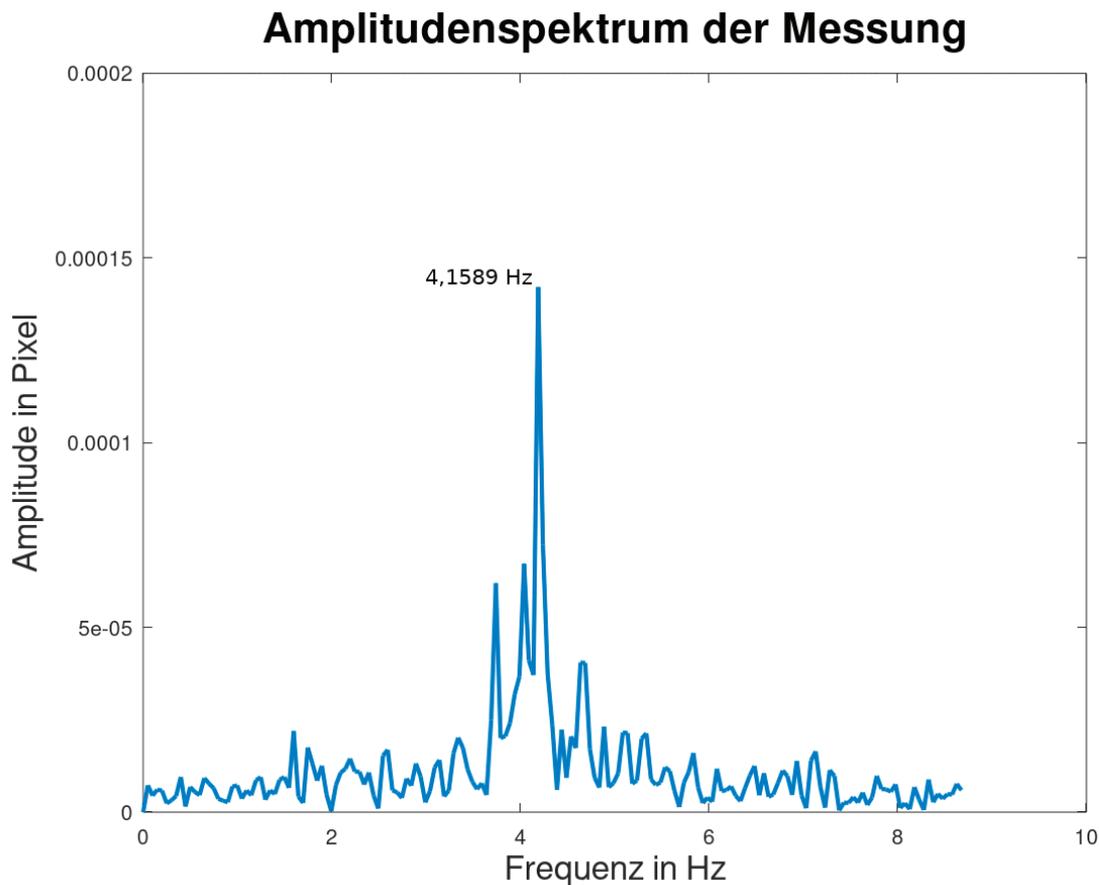


Abbildung 5.7: Spektrum der Tachymeter-Messung der Brücke.

Die Beobachtung mit dem Tachymeter lässt eine genaue Bestimmung der Amplitude zu. Demnach bewegt sich die Brücke in der vertikalen um maximal 6,72 mm.

Die tachymetrische Messung ermöglicht eine genaue Beobachtung der Bewegung der Brücke in einem bestimmten Punkt. Die Amplitude ist einfach bestimmbar.

Videobasierte Messung mit der Phase-based Video Magnification:

Zur Visualisierung der Brückenbewegungen wurde die Kamera, wie auch das Tachymeter, längs zur Brücke aufgestellt. So konnte sowohl die vertikale Auf- und Abbewegung, als auch die Torsion der Brücke beobachtet werden. Die Brücke wurde erneut mit wiederholtem Auf- und Abspringen einer Person in Schwingung versetzt. Die Aufnahme der Brücke fand erneut mit einer Auflösung von 1440x1080 Pixeln statt. Zur Auswertung wurde ein 20 Sekunden langer Videoclip genutzt. Im Zuge der Verstärkung um $\alpha=20$ wurde das Video auf eine Auflösung von 480x360 Pixel herunterskaliert.

Im verstärkten Video kann das Bewegungsverhalten der Brücke genau nachvollzogen werden.



Abbildung 5.8: Vergleich der Brückenposition in zwei Videoausschnitten des verstärkten Videos.

Im verstärkten Video kann die Bewegung der Brücke als Kombination einer vertikalen Schwingung und Torsion identifiziert werden. In der Horizontalen wird besonders stark die unter der Brücke herausragende Trägerkonstruktion und das Gelände bewegt. Die Achse der Torsionsbewegung liegt, abgeleitet aus dem verstärkten Video, zwischen den unter dem Gehweg befindlichen Doppel-T Stahlträgern. Die vertikale Schwingung ist weniger intensiv. Wobei allerdings anzumerken ist, dass die Höhenänderung in der Mitte der Brücke am stärksten ausfällt.

Aus dem verstärkten Video wurden ebenfalls Frequenzen bestimmt. Da das Video nicht einen bestimmten Punkt, sondern die gesamte Szenerie erfasst, wurden mehrere Frequenzen

festgestellt. Neben verschiedenen Schwingungen der Brücke werden somit auch die Schwingungen der umliegenden Vegetation erfasst. Dennoch ist im Powerspektrum der Videoaufnahme die mit dem Tachymeter bestimmte Frequenz wiederzufinden.

Amplitudenspektrum der Messung

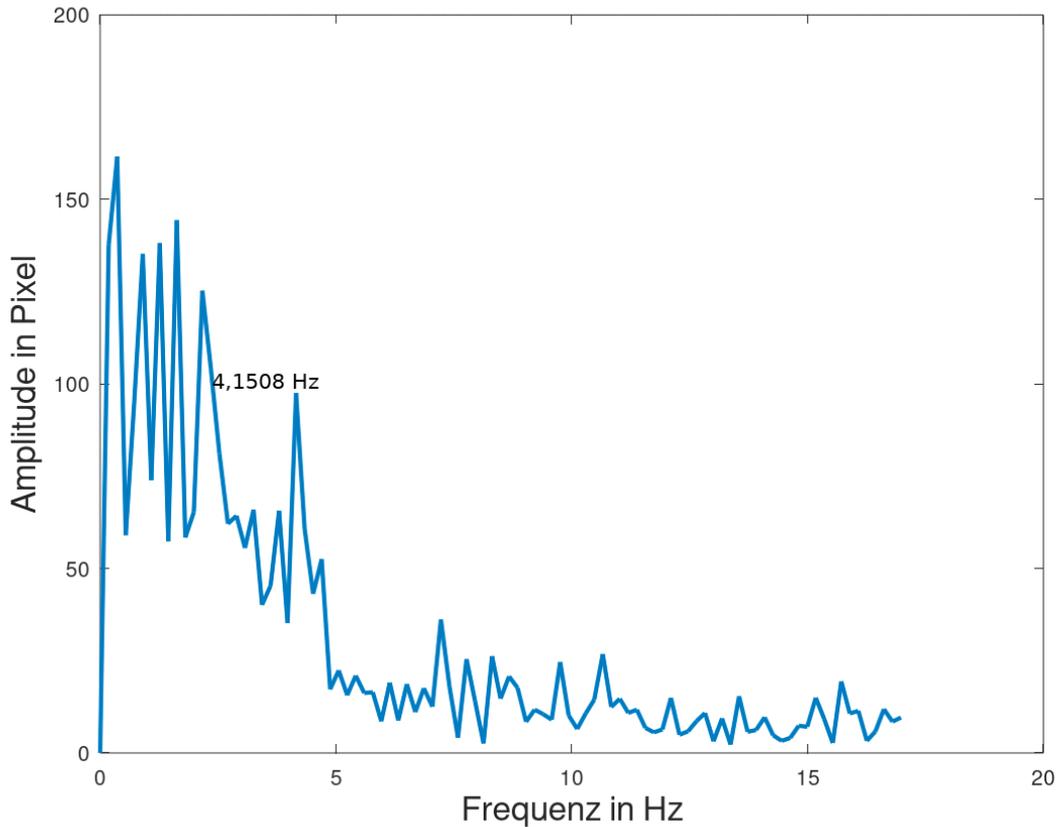


Abbildung 5.9: Spektrum der verstärkten Videoaufnahme der Brücke.

Somit bestätigt sich das videobasierte Verfahren und das tachymetrische Verfahren gegenseitig. Die ermittelten Frequenzen werden hier noch einmal gegenübergestellt:

Messsystem:	Tachymeter	Video Magnification
Frequenz:	4,16 Hz	4,15 Hz

Darüber hinaus ergänzen sich die beiden Verfahren zur Überwachung der Brücke sehr gut. Das Tachymeter eignet sich zur Beobachtung eines bestimmten Punktes der Brücke, und liefert eindeutige Ergebnisse über die Frequenz und Amplitude der Bewegung des ausgewählten Punktes. Im Gegensatz dazu kann die Aufnahme der Brücke in Kombination mit der Phase-based Video Magnification die Gesamtbewegung der Brücke visualisieren. Das ermöglicht es, das Verhalten der Brücke besser zu charakterisieren. Zudem erleichtert die Vi-

sualisierung der Bewegungen das Verorten wichtiger, messtechnisch genauer zu beobachtender Punkte an der Brücke.

6 Ergebnis der Erprobung und Ausblick

Zur Einordnung des Nutzens der Video Magnification für vermessungstechnische Aufgaben wurde das Videoverarbeitungsverfahren in verschiedenen messtechnischen Szenarien genutzt. So konnte das Bewegungsverhalten verschiedener Objekte in verschiedenen Situationen visualisiert werden. Darüber hinaus konnten Frequenzspektren der Videoaufnahmen berechnet werden.

Die verstärkte Visualisierung der Bewegungen war stets möglich. Dabei gelang es selbst, Bewegungen zu verstärken, die von weiteren Bewegungen im Bild überlagert werden könnten. So gelingt es in Kapitel 5.2, den Rundlauf der rotierenden Felge zu visualisieren, wobei Abweichungen gut erkennbar erfasst wurden. Auch die Bewegung der Wolken im Hintergrund der Windkraftanlage störte die Beobachtung der Biegelinie der Rotorblätter nicht. Anders verhält es sich, wenn aus dem Video Frequenzen erfasst werden sollen. Da in den vorgestellten Szenarien die Messobjekte in ihrer Gesamtheit erfasst werden, treten teilweise auch Schwingungen auf, die nicht vom jeweiligen Messobjekt stammen. Beispielhaft dafür steht die Aufnahme der Fußgängerbrücke in Altentreptow im Kapitel 5.4. Bei Vergleich der Powerspektren der tachymetrischen Messung und der Kameraaufnahme ist zu erkennen, dass die mit dem Tachymeter gemessene Frequenz der Schwingung auch von der Kamera erfasst wurde. Jedoch sind in deren Powerspektrum noch weitere Frequenzen erkennbar, die zum Teil durch die Schwingung der umliegenden Vegetation, aber auch von Bewegungen der Brücke stammen können, die vom Tachymeter nicht beobachtet wurden.

Aus den gezeigten Szenarien lassen sich gut die Stärken der Videoverstärkung ableiten. Der primäre Vorteil des Verfahrens stellt die umfassende Beobachtung des gewünschten Objektes dar. Die Verstärkung der im Video erfassten Bewegungen ermöglicht es, bewegte Bereiche im Video genau zu lokalisieren und einzuordnen. Dies erleichtert eine zutreffende Beschreibung der Objektbewegungen und Verformungen, wodurch wiederum weiterführende Vermessungen unterstützt werden, da Punkte mit einem interessanten Bewegungsverhalten leichter detektiert werden können. Zudem ist die Messung sehr schnell zu erledigen. Die Aufbauphase ist kurz und Vorkehrungen am Messobjekt sind nicht zwingend notwendig. Des Weiteren ist die Messung berührungslos. So konnte beispielsweise eine Windkraftanlage beobachtet werden, ohne das mit hohem Aufwand Sensorik oder Reflektoren am Rotor angebracht werden mussten.

Demnach ergeben sich mit der in dieser Arbeit genutzten Software verschiedene Einsatzmöglichkeiten. Im Bereich der Industriemesstechnik ermöglicht das Verfahren die berüh-

rungslose Beobachtung von Rundlaufabweichungen. Auch können in komplexen Räumen Bauteile detektiert werden, die ungewollte Bewegungen oder Frequenzen aufweisen, die durch Konstruktions- und Entwicklungsfehler entstehen können.

Zur messtechnischen Überwachung von Gebäuden ermöglicht das eingesetzte Verfahren die Visualisierung der Bewegung und Verformung eines Bauwerks. Dies kann zum einen als Planungsgrundlage für die Vermessung eines Gebäudes mit weiteren Sensoren dienen, aber auch als Ergänzung zu bestehenden Messergebnissen fungieren. Somit kann dem Kunden ein klareres Bild, der in den verschiedenen Sensoren erfassten Bewegung an die Hand gegeben werden. Neben der Unterstützung konventioneller Sensorik, kann die Verstärkung und Auswertung einer Videoaufnahme auch selbst Messergebnisse erzeugen. Außerdem können Frequenzen der Schwingungen, die im Video erfasst werden, berechnet werden.

Gegenüberstellung der positiven und negativen Eigenschaften der Videoverstärkung:

Um übersichtlich die Erkenntnisse dieser Arbeit aufzuführen, werden in der folgenden Tabelle die Vor- und Nachteile des untersuchten Verfahrens gegenübergestellt.

Vorteile:

- anschauliche Visualisierung vorliegender Bewegungen
- Visualisierung von Translationen, Rotationen und Verformungen
- Frequenzbestimmung möglich
- ermöglicht erweitertes Verständnis der vorliegenden Bewegung (sowohl für den Kunden als auch den Vermessungsingenieur)
- berührungsloses Messverfahren

Nachteile:

- Verfahren ermittelt alle Frequenzen im Video, Zuordnung so teilweise schwer
- rechenintensiv (schwerer Kompromiss zwischen Videolänge und Auflösung)
- aktuell noch keine Amplitude einer bestimmten Bewegung bestimmbar

Anzumerken ist, dass das Potenzial des Verfahrens die in der vorliegenden Arbeit gezeigten Möglichkeiten übersteigt. In erster Linie betrifft das die Bestimmung der Amplitude. Eine automatisierte und genaue Bestimmung dieser Größe ist erstrebenswert. Das Berechnen der Amplitude durch Messung von Pixelabständen im Bild mit entsprechender Berücksichtigung

der Verstärkung führte vorerst zu keinen realistischen Ergebnissen. Auch eine Auswertung des Videos in Echtzeit beziehungsweise nahezu Echtzeit wurde noch nicht umgesetzt. In diesem Zusammenhang wären weitere, die Effizienz steigernde Maßnahmen notwendig. Dies betrifft zum einen die Videoverstärkung an sich, aber auch das Auslesen der Bildinformationen aus dem Kamerasensor. Neben diesen technischen Erweiterungen sind als Ausblick an dieser Stelle auch Erprobungen im Zusammenhang mit Zeitlupen- und Zeitrafferaufnahmen zu nennen, die zu sehr interessanten und womöglich besonders aussagekräftigen Ergebnissen führen könnten.

7 Zusammenfassung

Überwachungsmessungen sind ein essenzieller Bestandteil zum sicheren Betrieb von Ingenieurbauten und zur qualitativ hochwertigen industriellen Fertigung. Deshalb ist der Bedarf an finanzierbaren und effektiven Messsystemen hoch. Überwachungsmessungen bilden ein Teilgebiet der Ingenieurvermessung und beschäftigen sich je nach erwarteten Deformationsarten und dem gewählten Deformationsmodell mit der Beobachtung der Position beziehungsweise der Form von Objekten als Funktion der Zeit und/oder Objektbelastung. Bildaufnahmen werden schon seit dem Ersten Weltkrieg zur Vermessung eingesetzt. Mit dem Aufkommen der Computertechnik wird heutzutage immer häufiger auch Videotechnik in der Messtechnik eingesetzt und die 2012 entwickelte Video Magnification könnte zukünftig ein Vertreter dieser Gattung sein. Die Eulerian Video Magnification verstärkt Änderungen des Farbwertes im Verlauf des Videos. Eine 2014 erschienene Weiterentwicklung der Eulerian Video Magnification, die Phase-based Video Magnification, verstärkt im Gegensatz dazu nicht die Amplitude des Signals, sondern die Phase und ermöglicht es so, Bewegungen besser zu verstärken. Zur Aufnahme kommen Kameras zum Einsatz, die heutzutage zumeist mit einem CMOS Sensor ausgestattet sind, die im Vergleich zu den besser geeigneten CCD Sensoren das Bild nur zeilenweise mit einem zeitlichen Versatz erfassen können. Die Aufnahme bildet dabei nur den ersten Teil des Workflows. Anschließend wird das Video zugeschnitten, verstärkt und analysiert, wobei die Anzahl der verstärkten Pixel pro Frame als Zeitreihe erfasst wird, um in der Folge vorliegende Frequenzen zu berechnen. So wurde im Labor festgestellt, dass das Verfahren in der Lage ist, Bewegungen visuell stärker darzustellen und dabei die Frequenz der im Video erfassten Bewegung genau wiederzugeben. In den anschließend betrachteten realen Szenarien wurde das Laborergebnis bestätigt, aber beobachtet, dass zusätzliche Schwingungen im Bild, beispielsweise durch Vegetation, das Ermitteln der korrekten Objektfrequenz behindern können. Nichtsdestotrotz ist die Video Magnification in der Lage, einen Mehrwert bei der Durchführung von Überwachungsmessungen zu bringen, da das Bewegungsverhalten sehr anschaulich dargestellt wird und zusätzlich eine korrekte Frequenzberechnung möglich ist, wobei zu betonen ist, dass das Potenzial des Verfahrens noch nicht ausgeschöpft ist und es sich lohnt, weiterführende Methoden, beispielsweise zur Berechnung von Bewegungsamplituden, zu entwickeln.

8 Literaturverzeichnis

- Bässmann, H. (2010). *Industrie-Kameras*. Abgerufen am 16. Januar 2022 von <http://www.industrie-kamera.de/ccd-sensor.htm>
- Calanni, A. (2018).
- Ce, L., Torralba, A., Freemann, W. T., Durand, F., & Adelson, E.-H. (2005). *Motion Magnification*. Cambridge USA: Computer Science and Artificial Intelligence Lab, Massachusetts Institute of Technology.
- Dambeck, H. (27. 06. 2012). *Spiegel Wissenschaft*. Von <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/video-analyse-software-macht-puls-und-atmung-sichtbar-a-840836.html> abgerufen
- Foppe, K., & Neuner, H. (2009). Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich. *Schriftenreihe des DVW*, 59(Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze in unseren Daten.).
- Iske, A. (2007). www.math.uni-hamburg.de. Abgerufen am 23. Februar 2022 von https://www.math.uni-hamburg.de/teaching/export/tuhh/cm/a3/0708/vorl04_a3.pdf
- Kahmen, H. (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Khayam, S. (2003). *The Discrete Cosine Transform (DCT): Theorie and Application*. Michigan State University, Department of Electrical & Computer Engineering.
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie Band 1 Geometrische Informationen aus Photographien und Laseraufnahmen*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & KG.
- Luhmann, T. (2017). *Nahbereichsphotogrammetrie*. Oldenburg: Wichmann.
- Muffert, M., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2009). Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Frequenzbereich. *Schriftenreihe des DVW*, 59(Zeitabhängige Messgrößen - Verborgene Schätze unserer Daten).
- Oh, T.-H., Jaroensri, R., Kim, C., Elgharib, M., Durand, F., Freeman, W. T., & Matusik, W. (2018). *Learning-based Video Motion Magnification*. Cambridge USA; Doha Qatar: MIT CSAIL; HBKU QCRI.
- Paech, W. (23. April 2020). *baader planetarium*. Abgerufen am 16. Januar 2022 von <https://www.baader-planetarium.com/de/blog/cmos-und-ccd-sensoren-technik-und-technische-daten-mit-ihren-jeweiligen-vor-und-nachteilen-im-vergleich/>

- Simoncelli, E. (2008). *The Steerable Pyramid*. Center for Neural Science, New York University. Abgerufen am 14. Februar 2022 von <http://www.cns.nyu.edu/~eero/STEERPYPYR/>
- Studyflix GmbH. (2022). *Studyflix*. Abgerufen am 14. Februar 2022 von <https://studyflix.de/mathematik/richtungsableitung-1351>
- Wadhwa, N., Rubinstein, M., Durand, F., & Freeman, W. T. (2013). *Phase-Based Video Motion Processing*. Cambridge USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Wandringer. (2020). 3. *Leistungsdichtespektren*. Abgerufen am 12. Januar 2022 von http://wandringer.user-web.mwn.de/LA_Akustik/v1_3.pdf
- Wu, H.-Y., Rubinstein, M., Shih, E., Guttag, J., Durand, F., & Freeman, W. (2012). *Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World*. MIT CSAIL, Quanta Research Cambridge, Inc.

9 Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1.1: Eingestürzte Brücke in Genua 2018. [Calanni, 2018].....	8
Abbildung 3.1: Beispielhafte Darstellung eines Bildes in einer drehbaren Pyramide. [Simoncelli, 2008]	15
Abbildung 3.2: Ablauf der Eulerian Video Magnification mit den beschriebenen Schritten der Zerlegung (Spatial Decomposition), der Filterung (Temporal Processing) und der Rekonstruktion (Reconstruction). [Wu, et al., 2012]	18
Abbildung 3.3: Es werden die Berechnungsschritte anhand eines 1D Signales gezeigt. Die schwarze Funktion beschreibt die Ausgangsfunktion. Dunkelblau zeigt die gewöhnliche Verschiebung um δ . Hellblau wird die erste Stufe der Taylorreihe dargestellt. Das bandpassgefilterte Signal wird grün und das erzielte, um α verstärkte Signal, rot dargestellt. [Wu, et al., 2012].....	19
Abbildung 3.4: Darstellung der phasenbasierten Videoverstärkung mit der Bildzerlegung im Abschnitt (a), der Filterung mit Verstärkung in Abschnitt (b) der optionalen, in dieser Arbeit nicht genutzten Rauschminimierung in Abschnitt (c) und der Rekonstruktion des Videos im letzten Abschnitt (d). [Wadhwa, et al., 2013]	21
Abbildung 4.1: Mit einem Punkt visualisierte Photonen treffen auf den Detektor. Im Halbleiter stellen die Punkte die zu den auftreffenden Protonen proportionale Menge der Ladung dar. [Kraus, 2004]	23
Abbildung 4.2: Darstellung eines klassischen CCD Sensor [Kraus, 2004]	23
Abbildung 4.3: Übersicht zum Workflow der Messung und Auswertung.....	26
Abbildung 4.4: Spektrum der mit dem Beschleunigungssensor des Smartphones erfassten Schwingung.....	30
Abbildung 4.5: Vergleich der eingestellten Frequenz mit der gemessenen Frequenz. Gemessen wurde mit dem Beschleunigungssensor eines Smartphones.	31
Abbildung 4.6: Videoausschnitt der verstärkten Smartphone-Aufnahme.....	32
Abbildung 4.7: Spektrum des schlecht visualisierten Smartphone Videos.	33
Abbildung 4.8: Videoausschnitt der bewegungsverstärkten Smartphone Aufnahme.....	34
Abbildung 4.9: Spektrum des zufriedenstellend visualisierten Smartphone Videos.....	35

Abbildung 4.10: Vergleich der Schwingtischaufnahme mit der Verstärkung durch die Eulerian Video Magnification (links) und der Phase-based Video Magnification (rechts).....	36
Abbildung 4.11: Vergleich des um $\alpha=50$ bewegungsverstärkten Videos (links) mit dem Originalvideo (rechts).....	37
Abbildung 4.12: Spektrum des Schwingtisches bei 10 Hz.	38
Abbildung 4.13: Spektrum einer Aufnahme bei 10Hz mit der Alpha 7 II.....	39
Abbildung 4.14: Versuchsaufbau im Labor.	41
Abbildung 4.15: Videoausschnitt aus dem Originalvideo (Oben) und dem verstärkten Video (Unten).	42
Abbildung 5.1: Bildausschnitt einer Videoaufnahme des Motorraumes mit dem Originalvideo (rechts) und dem verstärkten Video (links).....	45
Abbildung 5.2: Spektrum der Motoraufnahme.	46
Abbildung 5.3: Ausschnitt der verstärkten Radaufnahme. Die innere Kontur ist weiß eingefärbt.	47
Abbildung 5.4: Ausschnitt der verstärkten Radaufnahme. Die äußere Kontur ist weiß eingefärbt.	48
Abbildung 5.5: Biegelinie des Windradrotorblattes.....	49
Abbildung 5.6: Windkraftanlage mit geringer Rotation.	50
Abbildung 5.7: Spektrum der Tachymeter-Messung der Brücke.	51
Abbildung 5.8: Vergleich der Brückenposition in zwei Videoausschnitten des verstärkten Videos.	52
Abbildung 5.9: Spektrum der verstärkten Videoaufnahme der Brücke.	53

