

F 3105

Guido Morgenthal, Sebastian Rau, Markus Nowack

# Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern



Fraunhofer IRB Verlag

 $\mathbb{R}$ 

## F 3105

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

#### 2019

ISBN 978-3-7388-0327-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

## Forschungsprojekt

## Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern

"Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.35) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor."

Verfasser: Prof. Dr. Guido Morgenthal Sebastian Rau MSc Dipl.-Ing. Markus Nowack

Abschlussbericht –Weimar, 30. November 2017



## Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort		5
2 Projektdaten			
	2.1	Eckdaten	6
	2.2	Projektbeteiligte	6
	2.3	Projektinhalt	7
3	Motivati	on und Einsatzszenarien	8
	3.1	Motivation	8
	3.2	Einsatzszenarien	. 12
	3.2.1	Einsatz zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs	. 12
	3.2.2	Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse	. 13
	3.2.3	Einsatz an historischen Bauwerken	. 14
4	Messter	chnische Konzeption zur Tragwerksüberwachung	. 16
	4.1	Einführung	. 16
	4.2	Neigungsmessung	. 16
	4.2.1	Anwendung von Beschleunigungssensoren zur Neigungsmessung	. 16
	4.2.2	Erforderliche Auflösung der Signalwandlung	. 17
	4.2.3	Ermittlung von Neigungsänderungen	. 17
	4.3	Tragwerksüberwachung	. 18
	4.3.1	Deformationsbasierte Tragwerksüberwachung	. 18
	4.3.2	Grenzzustände	. 18
	4.3.3	Ermittlung von Beanspruchungen aus Neigungsmessungen bei bekannter Lastanordnung	. 19
	4.3.4	Ermittlung von Beanspruchungen aus Neigungsmessungen bei unbekannter Lastanordnung	.21
	4.4	Anforderung an die Messung	. 22
	4.4.1	Einsatzszenario 1: Einsatz zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Gebäuden	. 22
	4.4.2	Einsatzszenario 2: Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse	. 24
	4.4.3	Einsatzszenario 3: Einsatz an historischen Bauwerken	. 25
5	Prototyp	bisches Messsystem auf Basis von Mikrocontrollern	. 27
	5.1	Mikrocontroller	.27
	5.2	Entwicklung eines prototypischen Sensorboards	. 33
	5.3	Software	. 35
	5.3.1	Betriebssystem	. 35
	5.3.2	Software-Framework	. 35
	5.3.3	Konfiguration des Sensors und Abfragen von Messwerten	. 36
	5.3.4	Steuerung und Messablauf	. 37

	5.3.5	Binärformat der Messdateien	38
	5.3.6	Langzeitmessungen und Datenübertragung zu einem Speicher-Server	39
	5.4	Softwareseitige Datenerfassung und Datenverarbeitung sowie Mittelwertbildung	g40
	5.4.1	Anforderungen an die Datenerfassung und Datenverarbeitung	40
	5.4.2	Datenerfassung und Mittelwertbildung	41
	5.5	Datenfluss	43
6	Anpas	sung der Sensorik für den Einsatz am Bauwerk	44
	6.1	Funktionsprinzip der Sensorik	44
	6.2	Laborversuche zur erreichbaren Sensordatenqualität	45
	6.2.1	Eingesetzte Messtechnik	46
	6.2.2	Bestimmung von Scale-Faktor und Bias	46
	6.2.3	Bestimmung des Temperatureinflusses auf Scale-Faktor und Bias	48
	6.2.4	Stabilität und Auflösung	51
	6.2.5	Zusammenfassung der erreichbaren Sensordatenqualität	52
	6.3	Überarbeitung der Hardware	53
	6.3.1	Anpassungen der Sensorboards	53
	6.3.2	Auswahl geeigneter Gehäuse zur Kapselung der Sensorik	53
	6.3.3	Untersuchung der erreichbaren Datenqualität der gehausten Sensoren	56
	6.3.4	Zweiachsige Abtastung des Sensors	58
	6.3.5	On-Chip Temperaturkompensation	59
	6.3.6	Weiterführende Ansätze zur Bias-Stabilität	59
	6.4	Fazit und Ausblick zur eingesetzten Sensorhardware	63
7	ldentifi	kation kritischer Lastzustände	64
	7.1	Überblick	64
	7.2	Ermittlung kritischer Lastzustände aus Verformungsmessungen	64
	7.3	Interpretation möglicher Lastzustände und entwickelte Methodik	66
	7.4	Antwortflächen und Definition eines Qualitätsmaß	67
	7.4.1	Bestimmung einer Kernfläche	67
	7.4.2	Definition eines Qualitätsmaßes	69
	7.5	Berechnung der Zielgrößen	70
	7.5.1	Einfluss von Lastbeschränkungen	70
	7.5.2	Einfluss von Messunsicherheiten und Vergleich verschiedener Sensorsetups	71
	7.6	Erweiterung der Methodik	72
	7.7	Fazit	73
8	Experi	mentelle Laborversuche zum Messsystem	74
	8.1	Einführung	74
	8.2	Untersuchungen zur Genauigkeit und Linearität des Sensors	74

	8.2.1	Versuchsaufbau	75
	8.2.2	Versuchsdurchführung	75
	8.2.3	Versuchsergebnisse	76
	8.3	Messtechnische Untersuchungen zur Linearität	78
	8.4	Überprüfung des Rauschverhaltens	81
	8.4.1	Versuchsaufbau	81
	8.4.2	Versuchsdurchführung	81
	8.4.3	Versuchsergebnisse	82
	8.4.4	Quantifizierung des Rauschens	83
9	Bauteil	versuche	85
	9.1	Biegeversuch an einem Stahlbetonbalken	
	9.1.1	Versuchsaufbau	85
	9.1.2	Neigungsmessung mit dem entwickelten Messsystem	
	9.1.3	Versuchsdurchführung	
	9.1.4	Versuchsauswertung	
	9.1.5	Anmerkungen	
	9.2	Wiederholung des Biegeversuches an einem Stahlbetonbalken	
	9.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	
	9.2.2	Neigungsmessung mit dem untersuchten Messsystem	
	9.2.3	Versuchsauswertung	90
	9.3	Fazit	93
10	Unters	uchung der Langzeitstabilität	94
	10.1	Langzeitmessung mit ungehausten Sensoren	
	10.1.1	Versuchsaufbau	94
	10.1.2	Versuchsauswertung für Messung 1	95
	10.1.3	Versuchsauswertung für Messung 2	96
	10.1.4	Versuchsauswertung für Messung 3	97
	10.1.5	Versuchsauswertung für Messung 4	
	10.1.6	Fazit	
	10.2	Dauermessung mit gehausten Sensoren	
	10.2.1	Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 1	
	10.2.2	Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 2	
	10.2.3	Fazit	105
11	Messur	ngen an Referenzobjekten	
	11.1	Anforderungen	
	11.2	Übersicht Referenzbauwerke	
	11.3	Stadtkirche St. Marien in Freyburg	

	11.3.1	Einführung1	108		
	11.3.2	Geplantes Vorgehen1	108		
	11.3.3	Herausforderung bei der Planung der Installation1	109		
	11.3.4	Durchgeführte Maßnahmen1	110		
	11.3.5	Vergleich der Neigungen zwischen Referenzsystem und MEMS-Sensoren 1	115		
1	1.4	Fazit1	117		
1	1.5	Fabrikhalle Griesson – de Beukelaer, Kahla 1	118		
	11.5.1	Einführung1	118		
	11.5.2	Geplantes Vorgehen	120		
	11.5.3	Herausforderung bei der Planung der Messaufgabe1	121		
	11.5.4	Vorbetrachtungen1	121		
	11.5.5	Anforderung an das Messsystem und die Datenverarbeitung1	124		
	11.5.6	Installation des prototypischen Messsystems1	124		
	11.5.7	Identifikation von Schneefallereignissen1	126		
	11.5.8	Installation eines Temperaturmesssystems1	129		
12	Zusamn	nenfassung1	131		
13	Weitere	r Forschungs- und Entwicklungsbedarf1	134		
Que	Quellenverzeichnis135				
Glo	Glossar139				

## 1 Vorwort

In diesem Projekt wurde das Potential des Einsatzes von kostengünstigen Messsystemen auf Basis von MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern (Einplatinencomputern) untersucht. Die Untersuchungen waren praxisnah angelegt, um die tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten dieses Messsystems im sensorbasierten Bauwerksmonitoring möglichst realitätsnah aufzeigen und bewerten zu können. Auf diese Weise soll eine zukünftige Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis gewährleistet werden. Zusammen mit den Projektpartnern First Sensor und dem Ingenieurbüro Trabert + Partner wurden umfangreiche Laborversuche und Instrumentierungen an zwei Referenzbauwerken durchgeführt. Für die Planung der Messaufgabe und die Installation an den Bauwerken wurden insbesondere die Betreiber der Gebäude sowie zuständige Ingenieure und Ämter einbezogen.

Während der praktischen Versuche sowie bei der Auswertung der gesammelten Messdaten sind große Datenmengen entstanden, die bei der projektbearbeitenden Stelle vorgehalten werden. Die im Zuge der Bearbeitung erzielten Ergebnisse wurden teilweise bereits auf internationalen Konferenzen und Messen vorgestellt. Im Rahmen des Projektes sind zudem studentische Arbeiten wie Bachelor- und Masterarbeiten in dem Bereich prototypischer Implementierungen des Messsystems und der Datenverarbeitung entstanden.

Das Forschungsprojekt wurde während der 2. und 5. Projektetage der Bauforschung der Forschungsinitiative Zukunft Bau im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumplanung in Bonn am 2. März 2016 und 7. März 2017 vorgestellt.

Die Bearbeiter des Projektes danken den Betreibern und Verantwortlichen der Referenzbauwerke für deren Bereitschaft und Hilfe, ohne die eine prototypische Implementierung und praktische Erprobung der Messsysteme nicht möglich gewesen wären. Besonderer Dank gilt Herrn Wolfgang Günther, Herrn Frank Blankenburg und Herrn Drews von Griesson - de Beukelaer in Kahla und Herrn Pfarrer Arvid Reschke von der evangelischen Kirchgemeinde in Freyburg.

Das Forscherteam dankt des Weiteren den Mitarbeitern der Forschungsinitiative Zukunft Bau für die Förderung, die ausgezeichnete Unterstützung der Bearbeitung sowie die Möglichkeit des konstruktiven Austausches mit anderen Projektteams.

## 2 Projektdaten

## 2.1 Eckdaten

Titel:	Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern
Förderer:	BBSR, Forschungsinitiative Zukunft Bau
Projektnummer:	SWD-10.08.18.7-15.35
Projektzeitraum:	01.10.2015 – 30.11.2017
Fördersumme:	104.963,48 € (Gesamtsumme: 191.856,99 €)

## 2.2 Projektbeteiligte

Forschungseinrichtung: (Antragsteller) Bauhaus-Universität Weimar	Bauhaus-Universität Weimar (BUW) Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Professur Modellierung und Simulation – Konstruktion (MSK) Marienstraße 13 99423 Weimar				
	Kontakt:	Prof. Dr. Tel.: Fax: Web: E-Mail:	Guido Morgenthal (Projektleiter) +49 (0)3643 58-4418 +49 (0)3643 58-4422 www.uni-weimar.de/Bauing/MSK guido.morgenthal@uni-weimar.de		
Projektpartner:	First Sensor Peter-Behre 12459 Berlir	AG (FS) ns-Straße 1	e 15		
First Sensor 🧐	Kontakt:	DiplIng Tel.: Fax: Web: E-Mail:	. Markus Nowack +49 (0) 30 63 99 23 - 879 +49 (0) 30 63 99 23 - 819 www.first-sensor.com markus.nowack@first-sensor.com		
TP	Trabert + Pa Borscher Str 36419 Geisa	artner (TP aße 13 a	))		
	Kontakt:	Dr.sc.teo Tel.: Fax: Web: E-Mail:	chn. Josef Trabert +49 (0) 36 96 75 00 90 +49 (0) 36 96 77 53 11 www.trabert.de geisa@trabert.de		

## 2.3 Projektinhalt

In diesem Forschungsprojekt wurden wissenschaftliche und anwendungsbezogene Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von Neigungssensoren zur Bauwerksüberwachung bearbeitet. Neuartige, auf der MEMS-Technologie (mikro-elektro-mechanische Systeme) basierende Sensoren in Verbindung mit modernen Mikrocontrollersystemen, wie beispielsweise dem Raspberry Pi, bilden ein innovatives Messsystem zur Erfassung lokaler Verdrehungen von Tragwerken bzw. Tragwerkskomponenten. Mithilfe dieses Messsystems sollen Verformungszustände und das Systemverhalten von Tragstrukturen überwacht und kritische Beanspruchungszustände detektiert werden.

Die Verwendung dieses kompakten und kostengünstigen Monitoringsystems ermöglicht eine wirtschaftliche Überwachung von Bauwerken und soll zu einer dauerhaft sicheren Nutzung der Bauwerke beitragen. Im Rahmen des Projekts wurde das große Anwendungspotential für eine neue Generation effizienter Monitoringsysteme aufgezeigt, um dem Bauwerksmonitoring neue Anwendungsfelder im Bereich der konventionellen Bauwerke, wie beispielsweise Industriehallen, zu erschließen.

Innerhalb des Projektes wurde untersucht, an welchen Bauwerken das alternative Messsystem, basierend auf modernster Sensor- und Mikrocontrollertechnologie, wirkungsvoll und effizient eingesetzt werden kann. Dazu wurden insbesondere Fragestellungen zur Qualität der Sensordaten bearbeitet. Neben der effektiven Auflösung von Neigungsänderungen wurde auch der Einfluss von Umgebungsbedingungen wie Temperatur sowie das Langzeitverhalten untersucht.

Von der Sensorik werden am Bauwerk auftretende, lokale Verdrehungen erfasst. Dies ermöglicht die Ermittlung von Verformungszuständen z.B. von Trägern und Rahmen. Unter Verwendung mechanischer Zusammenhänge kann der Beanspruchungszustand des Tragwerks berechnet werden. Dabei werden unterschiedliche Anwendungsszenarien untersucht, wobei typische Einwirkungen und definierte Grenzzustände verschiedener Bauwerkstypen betrachtet werden.

An Referenzbauwerken wurde die Praxistauglichkeit des alternativen Messsystems getestet und optimiert sowie praktische Erfahrungen bei der Nutzung gesammelt. Fragen zur dauerhaften Anbringung am Bauwerk wurden ebenso bearbeitet wie Methoden zur Verarbeitung und Auswertung der Messdaten.

Die Bearbeitungsschwerpunkte des Projektes waren im Einzelnen:

- Erarbeitung von Anwendungsszenarien und Definition von Anforderungen an Referenzbauwerke,
- Untersuchung der Sensorik bezüglich der erreichbaren Genauigkeit und Datenqualität,
- Quantifizierung des Einflusses von Umgebungsbedingungen auf Sensordaten und Ermittlung von Kompensationsfaktoren,
- Definition von Anforderungen an eine softwareseitige Datenverarbeitung,
- Entwicklung eines prototypischen Messsystems,
- Entwicklung von Methoden zur Verarbeitung und Auswertung von Sensordaten,
- Entwicklung einer Softwarelösung zur Datenerfassung, -auswertung und –übertragung sowie Überprüfung der Funktionsfähigkeit,
- Erprobung und Optimierung des Messsystems an Referenzbauwerken zum Nachweis der Praxistauglichkeit.

Abschließend wurden die sich ergebenden Anwendungspotentiale dargestellt.

## 3 Motivation und Einsatzszenarien

## 3.1 Motivation

Bauwerke sind verschiedensten Umwelteinflüssen und Schädigungsmechanismen ausgesetzt und erfordern eine sorgfältige Überwachung, um einerseits die im Sinne der Nachhaltigkeit immer länger werdenden Nutzungsdauern zu erfüllen und um anderseits eine dauerhaft sichere Nutzung von Gebäuden zu gewährleisten. Eine regelmäßige Bauwerksüberprüfung ist erforderlich, um Schäden an der Tragkonstruktion oder Überbelastungen frühzeitig zu erkennen. Nicht rechtzeitig erkannte Bauwerksschäden können zu Nutzungseinschränkungen führen. Darüber hinaus hat das Versagen eines Tragwerks einen großen finanziellen Schaden zur Folge und kann im schlimmsten Fall zum Verlust von Menschenleben führen.

Tragwerksschädigungen können vielfältige Ursachen haben. Sie können sowohl durch Alterung, Konstruktionsfehler oder durch außergewöhnliche Beanspruchungen hervorgerufen werden. Auch klimatische Einwirkungen oder geotechnische Prozesse wie Setzungen können der Auslöser für unplanmäßiges Tragwerksverhalten sein.

Zur Erfassung des aktuellen Tragwerkszustandes können sensorbasierte Monitoringsysteme eingesetzt werden. Die bisher verwendeten Systeme basieren auf großen, wenig intelligenten und proprietären Datenloggern in Verbindung mit sehr genauen, aber meist wenig kompakten Sensoren. Die typischen Messsysteme sind daher noch heute extrem teuer und erfordern Expertenwissen zur Konditionierung und Unterhaltung, sodass das Monitoring speziellen Anwendungen an ausgewählten Tragwerken (z.B. Bauwerken der Infrastruktur wie Brücken) vorbehalten ist. Jedoch vereinen Bestandsbauwerke wie Hallentragwerke bei intensiver Beanspruchung durch extreme Schneelasten oder bei Installation zusätzlicher Aufbauten ein erhebliches Risikopotential, sodass eine sensorbasierte Bauwerksüberwachung als probates Mittel zur Erkennung und Vermeidung von Tragwerksschädigungen und -versagen ebenfalls sinnvoll ist, wenn Aufwand und Nutzen in sinnvollem Verhältnis zueinander stehen.

An zukunftsfähige Monitoringsysteme bestehen die Anforderungen nach einer flexiblen Einsatzmöglichkeit und geringen Kosten bei zugleich hinreichender Genauigkeit. Aktuelle Entwicklungen in der Sensortechnologie und bei der Mikrocontrollerhardware ermöglichen deutlich vereinfachte und miniaturisierte Monitoringsysteme zur effizienten Anwendung an Bauwerken. Eine Kombination dieser Technologien soll hier Anwendung finden, um neuartige, kompakte und kostengünstige Monitoringsysteme zu konzipieren und auf diese Weise neue Anwendungsfelder für die Bauwerksüberwachung zu erschließen.

Insbesondere bei weitgespannten Hallentragwerken sind in der Vergangenheit vielfach Probleme aufgetreten, die zu Einschränkungen des Betriebs (Werk- oder Logistikhallen) oder zur Gefährdung von Nutzern (Versammlungsstätten u. a.) geführt haben. Die Sperrung solcher Hallen infolge unerwarteter Schäden oder schwer abschätzbarer Tragreserven führt teilweise zu erheblichen wirtschaftlichen Ausfällen und ist im Falle von öffentlichen Gebäuden gesellschaftlich und volkswirtschaftlich nicht hinnehmbar. Hier können effektive Monitoringlösungen einen wertvollen Beitrag leisten.

Das große Anwendungspotential des prototypisch zu entwickelnden Messsystems für insbesondere durch Schnee belastete Hallentragwerke wird nachfolgend anhand von aufgetretenen Schadensfällen aufgezeigt. Dies ist auch im Zusammenhang mit dem steigenden Risiko von Starkwetterereignissen zu sehen, die, ausgelöst durch den Klimawandel, zukünftig extremere Wetterbedingungen erwarten lassen [1,2,3].

Der Einsturz der Eislaufhalle Bad Reichenhall (Abbildung 1 links oben) ist wohl eines der bekanntesten Beispiele eines Halleneinsturzes in Deutschland in den vergangenen Jahren. Bei dem Einsturz am 2. Januar 2006 kamen auf tragische Weise 15 Personen, darunter 12 Kinder und Jugendliche, ums Leben und weitere 34 Personen wurden teils schwer verletzt [4,5]. Besonders tragisch ist, dass sich das Unglück nur kurz vor einer geplanten Beräumung des Dachs ereignete. Trotz der verschiedenen Versagensursachen und der verletzten Sorgfaltspflichten beteiligter Parteien hätten durch eine messdatenbasierte, kontinuierliche Überwachung des Tragwerks in Kombination mit einem effektiven Alarmsystem unter Umständen Menschenleben gerettet werden können. Nur wenige Tage nach dem Unglück von Bad Reichenhall ereignete sich im am 28. Januar 2006 im polnischen Katowice eine ähnliche Tragödie. Beim Einsturz einer Messehalle kamen 66 Menschen ums Leben und weitere 170 Personen wurden verletzt [6].

Insbesondere nach dem Halleneinsturz von Bad Reichenhall in dem schneereichen Winter 2005/2006 gelangte das Thema Standsicherheit von Hallentragwerken in die öffentliche Wahrnehmung. Die Frage nach der Tragfähigkeit von Hallen unter den auftretenden Schneebelastungen wurde vielerorts gestellt. Existierende Hallentragwerke sollten daraufhin bezüglich ihrer Standsicherheit überprüft werden.

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Normen, welche auch eine Anpassung der Lastniveaus einschloss, kam es zur Überarbeitung der DIN 1055 Teil 5 Schneelasten [7], die im Juli 2005 ausgegeben und zum 1. Januar 2007 verbindlich eingeführt wurde. Durch die überarbeitete Norm wurden in der Regel höhere Schneelasten bemessungswirksam. Starkwetterereignisse wurden bei der Normenanpassung durch die Berücksichtigung zusätzlicher außergewöhnlicher Lastfallkombinationen, wie beispielsweise für das Norddeutsche Tiefland, berücksichtigt. Als Anwendungsschwerpunkt sind daher Bestandbauwerke zu nennen, da diese im Gegensatz zu Neubauten nicht für die erhöhten Schneelasten ausgelegt wurden.

Untersuchungen des TÜV Rheinland und der Landesgewerbeanstalt Nürnberg (LGA) förderten 2007 zu Tage, dass lediglich ein Drittel der 700 auf ihre Standsicherheit geprüften Hallen, darunter Sporthallen, Lagerhallen, Industrieanlagen, Hallenbäder, Schuldgebäude und Einkaufsmärkte, keine oder nur geringe Mängel aufwiesen [8]. Eine zeitnahe Sanierung wurde für 140 Hallen und eine Sperrung für 35 Hallen empfohlen [8]. Diese alarmierenden Zahlen zeigen das große Anwendungspotential für sensorbasierte Messsysteme zur Tragwerksüberwachung, welche sowohl bei sanierungsbedürftigen Hallen zum Einsatz kommen können als auch bei der Überwachung von Bestandstragwerken, welche keine Tragreserven für die durch die Normenanpassung erhöhten Schneelasten besitzen.

Die VDI-Richtlinie 6200 [9] empfiehlt eine regelmäßige Überprüfung von Bestandsbauwerken zur Gewährleitung der Standsicherheit. Zur Ermittlung einer Zustandsprognose wird darin die messtechnische Überwachung des Tragwerks im Rahmen eines Bauwerksmonitorings genannt. Letztere kann durch ein geeignetes Monitoringsystem, hier insbesondere auf Basis von Neigungssensoren, gewährleistet werden. Die prototypische Entwicklung eines solchen Messsystems auf Basis von Neigungssensoren und dessen Praxistest ist Ziel des vorliegenden Projekts.

Wie zahlreiche Hallensperrungen in dem schneereichen Winter 2010 zeigen [10-13], wurde das Problem bisher nicht ausreichend adressiert und bisher kaum Monitoringsysteme zur Tragwerksüberwachung an Bauwerken wie Hallen installiert. Sofortmaßnahmen wie kostenintensive Beräumungen [14] bei bereits geringen Schneehöhen sind teilweise noch immer das Mittel der Wahl. Ein Monitoringsystem, mit dessen Hilfe die tatsächlichen Beanspruchungen des Tragwerks ermittelt werden können, könnte zu einer messwertbasierten Festlegung der Notwendigkeit von Beräumungen und Sperrungen beitragen, wodurch temporäre Nutzungseinschränkungen der Gebäude gegebenenfalls minimiert werden könnten.



Abbildung 1: Halleneinstürze in Bad Reichenhall [B1] (links oben), in Česká Třebová [B2] (rechts oben), in Payette, Idaho, USA [B3] (links unten) und in Bend, Oregon, USA [B4] (rechts unten)

Auch im Bearbeitungszeitraum des Projektes wurden insbesondere im Winter Anfang 2017 Halleneinstürze im Ausland bekannt, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind. So kam es beispielsweise in der tschechischen Kleinstadt Česká Třebová zum Einsturz der rekonstruierten Dachkonstruktion einer zur Sporthalle umgenutzten Industrieanlage. Noch vor der offiziellen Neueröffnung kam es während einer Sportveranstaltung zum plötzlichen Versagen der Dachbinder (siehe Abbildung 1 rechts oben). Anwesende Personen verließen unter Panik die Halle, deren Dach nur mit einer dünnen Schneeschicht bedeckt war. Der Einsturz ist daher mutmaßlich in einer fehlerhaften Planung oder Bauausführung und nicht durch eine Überlastung der Tragkonstruktion zu begründen. Diese Art von plötzlichem Versagen kündigt sich gegebenenfalls nur durch geringe Tragwerksverformungen an, jedoch kann durch ein mit einem sensorbasierten Monitoringsystem gekoppelten Alarmsystem schneller und vor allem deutlicher eine Evakuierung des Gebäudes eingeleitet werden, als es im Vergleich dazu durch ein sichtbares Versagen möglich ist. Weitere bekannte Einstürze sind an weitgespannten Hallentragwerken und Flugzeughangars in den USA aufgetreten [15-17] (siehe Abbildung 1 unten).

Der Anlass zur sensorbasierten Überwachung von Hallen kann sich auch aus anderen Herausforderungen im Betrieb der Bauwerke ergeben. Für die in Abbildung 2 dargestellte Industrieanlage ergeben sich infolge von An- und Aufbauten veränderte Lastsituationen. Durch den Anbau einer zweiten Halle an die bestehende Anlage besteht die Gefahr von Schneesackbildung aufgrund des geschaffenen Höhensprungs in der Dachebene (Abbildung 2 links). Zusätzliche Dachaufbauten, wie in Abbildung 2 rechts gezeigt, führen zu einer erhöhten Dachlast, die eine Nachrechnung der Tragkonstruktion erforderlich machen. Kann die Tragfähigkeit unter den erhöhten Lasten bei einer nachträglichen statischen Berechnung nicht nachgewiesen werden, kann dies in beiden Fällen ein Auslöser für eine sensorbasierte Überwachung sein, um kostenintensive Verstärkungsmaßnahmen zu vermeiden.



Abbildung 2: Industriehalle mit Risikopotential für Schneeanwehung beziehungsweise Schneesackbildung am Höhensprung (links) und zusätzliche Dachaufbauten (rechts)

Ziel dieses Projektes ist es, ein sensorbasiertes Messsystem zu entwickeln, das zukünftig für die Tragwerksüberwachung von Industriehallen, öffentlichen Gebäuden und anderen Versammlungsstätten eingesetzt werden kann, um rechtzeitig Warnungen vor Überbelastungen infolge hoher Schneelasten zu erhalten.

Neben dem breiten Anwendungsspektrum für Bestandshallen kann eine sensorbasierte Überwachung auch für Gebäude eingesetzt werden, bei denen das Risiko vom Untergrund ausgeht. Bekanntester Versagensfall ist dabei das Kölner Stadtarchiv (Abbildung 3 links), das aufgrund der nahegelegenen Tiefbauarbeiten gefährdet wurde und infolge einer Fehlstelle in der Schlitzwand einstürzte. Als ein weiteres Anwendungsfeld für neigungsbasiertes Bauwerksmonitoring wurden historische Bauwerke, insbesondere Türme (siehe Abbildung 3 rechts), identifiziert, bei denen die Ermittlung von Neigungsverläufen über lange Messzeiträume von Interesse sind.



Abbildung 3: Einsturzstelle des Kölner Stadtarchiv [B5] (links); Schiefer Turm von Bad Frankenhausen [B6] (rechts)

## 3.2 Einsatzszenarien

Es wurden zunächst mögliche Einsatzszenarien und Aufgaben im Zusammenhang mit der neigungsbasierten Bauwerksüberwachung identifiziert. Aus den jeweiligen Einsatzszenarien lassen sich wiederum typische Bauwerke ableiten, bei denen der Einsatz eines alternativen Messsystems auf Basis von Neigungsmessungen eine Vereinfachung und Effizienzsteigerung in der Überwachung dieser Bauwerke erwarten lässt. Es erfolgt hier eine Fokussierung auf drei Anwendungsszenarien:

### - Einsatz zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Bestandsgebäuden

Typische Anwendungsfälle:

- Industrie- und Produktionshallen, Lagerhallen
- Versammlungshallen
- Sporthallen, Schwimmbäder
- Einkaufsmärkte
- Tribünendächer

#### - Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse

Typische Anwendungsfälle:

- bei nahegelegenen Tiefbaumaßnahmen: Baugruben, Tunnelbauten
- bei geologischen Besonderheiten des Baugrundes: Gefahr von Hangrutschungen, Erdfällen oder Bodenbewegungen (Hebungen oder Senkungen des Bodens)

#### - Einsatz an historischen Bauwerken

Typische Anwendungsfälle:

- bei auftretenden Schiefstellungen, Deformationen an bestehenden Bauwerken: Kirchen, Dome und Türme

#### 3.2.1 Einsatz zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs

Der Überwachung von weitgespannten Hallentragwerken wurde bis vor wenigen Jahren nur eine geringe Bedeutung beigemessen. Nach dem Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall hat sich dies geändert. Der sichere Betrieb von Hallentragwerken, wie Versammlungshallen, Sporthallen und Schwimmbädern, ist mittlerweile deutlich stärker in der öffentlichen Wahrnehmung.

Bei Schadensereignissen in der Vergangenheit war in der Regel ein Versagen der Dachkonstruktion weitgespannter Tragwerke zu beobachten. Der Einsturz von Hallen- und Tribünendächern kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden:

- Überbelastung infolge erhöhter Schneelasten durch stärkere Schneeereignisse,
- Lastkonzentrationen durch Schneeanwehungen an Höhensprüngen oder Dachaufbauten,
- Eindringen von Wasser in die Unterkonstruktion (Holztragwerke),
- Verstopfte Abläufe für Regenwasser beziehungsweise Tauwasser,
- Materialermüdung / Materialalterung,
- Versagen von Verbindungen, beispielsweise Klebeverbindungen an Holzkonstruktionen.

Zur Überwachung weitgespannter Tragwerke sollen die Verformungen des Tragwerks während des Betriebs ermittelt werden. Die Mittendurchbiegung der Dachkonstruktion kann dabei mit den Verdrehungen an den Auflagern in Zusammenhang gebracht werden (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Statisches System einer typischen Dachkonstruktion (Mittendurchbiegung  $w_m$ , Auflagerverdrehung  $\Delta \varphi$  eines Einfeldträgers)

Mithilfe der ermittelten Durchbiegungen beziehungsweise Verdrehungen kann auf den Beanspruchungszustand des Tragwerks geschlossen werden. Ein Monitoringsystem an Hallentragwerken soll kritische Verformungs- beziehungsweise Beanspruchungszustände detektieren. Es kann gegebenenfalls durch eine Alarmfunktion erweitert werden, welche die Nutzer und Betreiber des Gebäudes bei Erreichen von definierten Grenzwerten rechtzeitig warnt.

### 3.2.2 Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse

Die Anwendung in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse schließt sowohl Gebäude in der Umgebung von Tiefbaumaßnahmen als auch Standorte mit spezifischen Baugrundcharakteristiken (siehe detaillierte Auflistung in Abschnitt 3.2) ein. Beobachtete Schadensereignisse sind Gebäudesetzungen, -neigungen und -einstürze.

Sowohl Gebäude in der Nähe von Tiefbaumaßnahmen als auch in Gebieten mit einem hohen Risiko von Erdbewegungen infolge geotechnischer Prozesse besitzen ein hohes Anwendungspotential für das Bauwerksmonitoring. Mittels einer neigungsbasierten Überwachung können die Schiefstellungen beziehungsweise Neigungsänderungen  $\Delta \varphi$  des Gebäudes infolge von Bodenbewegungen, wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt, detektiert werden.



# Abbildung 5: Neigung eines Gebäudes durch einseitige Baugrundsetzungen infolge von nahegelegenen Tiefbaumaßnahmen

Bei Schadensereignissen, wie einem Erdfall oder einer Hangrutschung (siehe Abbildung 6), soll bei Erreichen einer definierten Grenzneigung unmittelbar ein Alarm ausgelöst werden, um anwesende Personen unverzüglich zu warnen und um eine Eigenrettung zu ermöglichen. Dies unterstellt, dass sich Versagenszustände durch kurzfristige Verformungen ankündigen.



Abbildung 6: Schadensereignisse infolge geotechnischer Ereignisse: Erdfall in Schmalkalden im Oktober 2011 [B7] (links); Hangrutschung in Nachterstedt im Juli 2009 [B8] (rechts)

## 3.2.3 Einsatz an historischen Bauwerken

Eine Bauwerksüberwachung unter Anwendung von Neigungssensoren eignet sich ebenfalls für den Einsatz an historischen Bauwerken. Schadensereignisse wie Verformungen oder Schiefstellungen sind insbesondere an turmartigen Bauwerken zu beobachten. Neben dem Schiefen Turm von Pisa sind der Schiefe Turm in Bad Frankenhausen, der Pulverturm in Jena und die Suurhuser Kirche als Beispiele zu nennen. Eine Auflistung schiefer Türme in Deutschland findet sich in [18].

Mögliche Ursachen für Setzungen und gegebenenfalls fortschreitende Schiefstellungen der historischen Türme sind:

- besondere geotechnische Verhältnisse am Standort,
- Materialermüdung und Materialalterung infolge wechselnder Temperatur- und Windbeanspruchung,
- Schädigungsprozesse in der Bausubstanz.



Abbildung 7: Einsatzszenario historische Bauwerke: Einsatz an Türmen und Kirchtürmen Pulverturm, Jena [B9] (links); Schiefer Turm vom Bad Frankenhausen [B10] (Mitte); Suurhuser Kirche [B11] (rechts)

Zur Überwachung der turmartigen Bauwerke ist die globale Verformung beziehungsweise die Neigung des historischen Bauwerks zu ermitteln.



Abbildung 8: Schiefstellung eines Turmes um den Neigungswinkel  $\Delta \varphi$ : Orthofotoansicht des schiefen Turms von Bad Frankenhausen

## 4 Messtechnische Konzeption zur Tragwerksüberwachung

## 4.1 Einführung

Aktuelle Entwicklungen in der Sensortechnologie und bei der Mikrocontrollerhardware stellen die technische Grundlage zur Entwicklung eines neuartigen Messsystems dar. Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit sowie die günstige Preisentwicklung der Einzelkomponenten soll genutzt werden, um ein alternatives Messsystem für das Bauwerksmonitoring zu konzipieren, welches die Vorteile moderner MEMS-Sensorik, miniaturisierter Steuereinheiten und Datenlogger verbindet.

MEMS (mikro-elektromechanische Systeme) ist eine Schlüsseltechnologie, die heute bereits breite Anwendung in der Automobiltechnologie, im Konsumgüterbereich und in der Industrieautomation sowie in der Medizintechnik findet und eine wirtschaftliche Überwachung von unterschiedlichen Prozessen ermöglicht [19]. Dabei kommen hauptsächlich Beschleunigungs-, Drehraten- und Drucksensoren zum Einsatz. Diese wenige Millimeter großen Sensoren vereinen meist eine elektrisch-mechanische Signalwandlung und eine elektronische Auswerteschaltung auf einen Chip. Infolge des geringen Materialverbrauchs und der Massenproduktion sind MEMS-Sensoren in der Regel klein und kostengünstig.

Größter Vorteil des prototypisch entwickelten Messsystems auf Basis von MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern sind neben der Kompaktheit die im Vergleich zu industriellen Standardmesssystemen sehr geringen Kosten. Damit werden aufgrund der geringen Größe eine einfache Installation und eine redundante Auslegung ermöglicht, wobei letztere zu einer Steigerung der Ausfallsicherheit bei der Datenerfassung führt. Die Messsysteme sind weiterhin wartungsarm, da alle relevanten Einstellungen und Anpassungen des Systems per Fernzugriff durchgeführt werden können insofern eine Netzanbindung vorliegt.

## 4.2 Neigungsmessung

### 4.2.1 Anwendung von Beschleunigungssensoren zur Neigungsmessung

MEMS-Beschleunigungssensoren können zur Ermittlung von Neigungen eingesetzt werden. An Bauwerken auftretende Neigungen sind in der Regel auf einen Bereich von unter 5 Grad beschränkt (siehe Abschnitt 4.4). Neigungssensoren müssen daher nicht den gesamten Messbereich von beispielsweise  $\pm$  180°, sondern nur einen kleinen Ausschnitt davon abdecken. Hochgenaue MEMS-Sensoren sind die Basis zur Erfassung lokaler Verdrehungen an Tragwerken.

In Abbildung 9 ist das Prinzip der Neigungsmessung mit Beschleunigungssensoren dargestellt. Diese Sensoren messen die zur Erdnormalen gerichtete Erdbeschleunigung. Der vektorielle Anteil der Erdbeschleunigung, der auf die jeweilige Sensorachse wirkt, gibt direkten Aufschluss über die relativ zum Horizont orientierte Neigung  $\varphi$  des Sensors. Bei der Auslenkung des Sensors um den Winkel  $\varphi$  von der Nulllage wird eine Beschleunigung in den Sensorachsen (beispielsweise  $a_x$ ) messbar.



Abbildung 9: Prinzip der Neigungsmessung mit einem Beschleunigungssensor – Nulllage (links); um den Winkel  $\varphi$  verdrehte Lage (rechts)

## 4.2.2 Erforderliche Auflösung der Signalwandlung

Das Sensorelement als solches erfasst kontinuierlich den zeitlichen Verlauf einer physikalisch messbaren Größe. Der kontinuierliche Verlauf der gemessenen Größe, der auch als analoges Signal bezeichnet wird, ist zur rechentechnischen Datenerfassung in ein digitales Signal zu wandeln (AD-Wandlung). Die zeitliche Auflösung wird dabei von der Abtastrate bestimmt. Der Prozess der Wandlung eines analogen, zeitkontinuierlichen Signals in ein zeitdiskretes, digitales Signal wird auch Quantisierung genannt. In Abhängigkeit der Auflösung des Analog-Digital-Wandlers (AD-Wandler) kann das Messsignal nur mit einer begrenzten Anzahl an Werten abgebildet werden. Durch die Wandlung eringer werden.

In Abhängigkeit der Neigung, die mittels des Beschleunigungssensors aufzulösen ist, ergibt sich die erforderliche Auflösung bei der Wandlung des analogen in ein digitales Signal. Die erforderliche Auflösung ist immer auf einen bestimmten Messbereich bezogen. In Tabelle 9 ist unter Berücksichtigung eines typischen Messbereichs von  $\pm 5^{\circ}$  für verschiedene messtechnisch aufzulösende Winkel die erforderliche Auflösung der Analog-Digital-Wandlung angegeben. Für aufzulösende Winkel von 10 m<sup>°</sup> oder 1 m<sup>°</sup> sind beispielsweise Auflösungen von mindestens 10 bit oder 14 bit erforderlich. Durch verschiedene Effekte der Signalwandlung und -verarbeitung können sich höhere erforderliche Auflösungen ergeben.

Aufzulösender Neigungswinkel	Benötigte Auflösung der Beschleunigung	Erforderliche Auflösung * (Messbereich ±5°)
$\Delta \varphi$	$\Delta a_{erf} = \sin(\Delta \varphi)$	$r_{erf} = \ln \frac{2 \cdot 5^{\circ}}{\Delta \varphi} / \ln 2$
5 ° = 5000 m°	87,2 mg	-
1 ° = 1000 m°	17,5 mg	4 bit (3,4 bit)
0,5 ° = 500 m°	8,73 mg	5 bit (4,4 bit)
0,1 ° = 100 m°	1,74 mg	7 bit (6,7 bit)
0,01 ° = 10 m°	0,17 mg = 170 µg	10 bit (9,9 bit)
0,001 ° = 1 m°	0,017 mg = 17 μg	14 bit (13,3 bit)

Tabelle 1: Erforderliche Auflösung  $r_{erf}$  der AD-Wandlung bei der Neigungsmessung für unterschiedliche aufzulösende Winkel  $\Delta \varphi$  (unter der Annahme kleiner Neigungsänderungen)

\* bezüglich der Messung der Neigung; Erforderliche Auflösung als Ganzzahl in bit durch Aufrunden der berechneten Werte in Klammern

### 4.2.3 Ermittlung von Neigungsänderungen

Bei der Verwendung von Neigungssensoren beziehungsweise von Beschleunigungssensoren werden messtechnisch absolute Neigungen bezüglich des Horizonts ermittelt. Da das Sensorelement im Ausgangszustand in der Regel nicht exakt zum Horizont ausgerichtet sein wird, sind die gemessenen absoluten Neigungen bezüglich des Horizontes nicht von Interesse. Hingegen können durch Bezug auf eine Vorverdrehung  $\varphi_0$  Neigungsänderungen  $\Delta \varphi$  bezüglich eines Ausgangszustands erfasst und die tatsächlichen Tragwerksverformungen zugeordnet werden. Wie in Abbildung 10 dargestellt, ergibt sich die Neigungsänderung aus der Differenz der aktuellen Neigung und der Ausgangsneigung. Dieses Vorgehen darf angewendet werden, wenn sich der Sensor über den betroffenen Messbereich linear verhält. Dies bedeutet, dass im genutzten Messbereich des Sensors ein linearer Zusammenhang zwischen aufgebrachter Neigung und gemessener Neigung gelten muss.



Abbildung 10: Schematische Darstellung der Ermittlung von Neigungsänderungen

## 4.3 Tragwerksüberwachung

Schnee und Wind sind typische Einwirkungen auf Hallentragwerke, die neben Eigengewicht und Ausbaulasten zusätzliche, temporäre Verformungen des Tragwerks hervorrufen. Mithilfe moderner, hochgenauer MEMS-Beschleunigungssensoren sollen Verdrehungen an ausgewählten Tragwerkspunkten erfasst werden, um Verformungszustände von Tragelementen zu berechnen. Durch die Ausnutzung mechanischer Zusammenhänge kann auf diese Weise der Beanspruchungszustand (Schnittgrößen, Spannungen, etc.) indirekt ermittelt werden. Eine direkte Erfassung der Verformungen, wie im Zukunft Bau Forschungsprojekt "Kontinuierliche Verformungsüberwachung weitgespannter Hallentragwerke auf der Basis digitaler Bildverarbeitung" (F2828), findet nicht statt.

## 4.3.1 Deformationsbasierte Tragwerksüberwachung

Einerseits können bei einer deformationsbasierten Überwachung eines Bauwerks aus den messtechnisch aufgenommenen Verformungen indirekt die Beanspruchungen oder der aktuelle Zustand des Tragwerks ermittelt werden. Zulässige Verformungen eines definierten Grenzzustandes lassen sich andererseits aus Tragfähigkeitsberechnungen bestimmen. Durch den Vergleich von messtechnisch ermittelter Verformung und Grenzverformung können unerwartete, unter Umständen die Standsicherheit gefährdende Tragwerksverformungen detektiert und bei Erreichen festgelegter Schwellwerte gegebenenfalls Alarmfunktionen ausgelöst werden. Wesentlich ist im Kontext der hier verfolgten Messung mit Neigungssensoren, dass Verformungen ein integrales Abbild des gesamten Tragwerksverhaltens beziehungsweise des Bauteilverhaltens geben, wohingegen beispielsweise Dehnmessstreifen nur lokale Beanspruchungen aufzeigen können.

## 4.3.2 Grenzzustände

Bei der statischen Berechnung von Tragstrukturen werden in der DIN EN 1990 [20] zwei verschiedene Grenzzustände betrachtet: der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Für die Festlegung von Grenzwerten einer vorausschauenden Bauwerksüberwachung ist in der Regel der GZG maßgebend, da sich bei dessen Überschreitung Nutzungseinschränkungen ergeben können und ein Sicherheitsabstand zum Versagensniveau aufrechterhalten werden muss.

Für den GZG werden Grenzverformungen in Abhängigkeit der Bauweisen festgelegt. So gilt beispielsweise für Betonbauteile eine zulässige Grenzdurchbiegung von 1 / 250 der Spannweite unter einer definierten Lastfallkombination [21]. Dieser Grenzwert kann jedoch unter

Berücksichtigung des statischen Systems oder weiterer Forderungen (beispielsweise in Hinblick auf Ausbauten oder Anforderungen des Bauherrn) weiter einschränkt werden (z. B. 1 / 500 der Spannweite) [21]. Für Stahl- und Holztragkonstruktionen gelten ähnliche Anforderungen an die Grenzdurchbiegung im GZG [22,23].

Bei der Tragwerksüberwachung ist weiterhin zu beachten, dass zulässige Grenzdurchbiegungen Verformungen aus ständigen Lasten enthalten. Tragwerksverformungen, die aus Messdaten bestimmt wurden, beziehen sich in der Regel nur auf Verformungen aus veränderlicher äußerer Belastung, da Messsysteme typischerweise erst an fertiggestellten Tragkonstruktion angebracht werden. Eigengewichtsanteile in den aus Messungen ermittelten Verformungen können etwa aus der Installation von Aufbauten während der Messperiode entstehen und durch eine Neukalibrierung des Systems berücksichtigt werden.

# 4.3.3 Ermittlung von Beanspruchungen aus Neigungsmessungen bei bekannter Lastanordnung

Über die Nutzung mechanischer Zusammenhänge kann der Beanspruchungszustand aus messtechnisch erfassten Neigungen ermittelt werden. Für einfache Systeme können die Zusammenhänge analytisch aus den zugrunde liegenden Differentialgleichungen bestimmt werden. Statisch unbestimmte Systeme können mit der Finite-Elemente-Methode [24] oder geeigneten Energiemethoden [25] berechnet werden.

Nachfolgend ist die Ermittlung von Beanspruchungen und Verformungen aus Neigungsmessungen bei bekannter Lastanordnung beschrieben. Ist die Lastanordnung nicht bekannt, können Verfahren des Abschnitts 4.3.4 Anwendung finden.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methodik zur Identifikation kritischer Lastzustände aus Neigungsmessungen entwickelt. Diese Methodik berücksichtigt Unsicherheiten in der Lastverteilung bei Erreichen eines kritischen Zustandes und ist in Abschnitt 7 ausführlich dargestellt. Hier wird eine bekannte und nicht veränderliche Steifigkeitsverteilung unterstellt, so dass dieses Verfahren nicht ohne Weiteres auf geschädigte Tragwerke angewendet werden kann.

Am Beispiel des Einfeldträgers soll hier die Ermittlung des Beanspruchungszustandes aus einer Auflagerneigung  $\varphi$  gezeigt werden. Es gilt die Einschränkung auf rein linear-elastischen Materialverhaltens und einer konstanten Biegesteifigkeit entlang des schubstarren Trägers. Es wird eine gleichmäßig verteilte Streckenlast q angenommen, wie in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Einfeldträger unter konstanter Streckenlast q

Dazu kann aus der Bestimmungsgleichung für die Auflagerverdrehungen die zugehörige Belastung q ermittelt werden.

$$q = \frac{24 \, EI \tan(\varphi)}{L^3} \tag{1}$$

Dabei ist *EI* die Biegesteifigkeit und *L* die Spannweite des Trägers. Die Auflagerneigung  $\varphi$  ist in Grad anzusetzen. Die Mittendurchbiegung  $w_m$ , das maximale Biegemoment  $M_{max}$  und die maximale Randspannung des Trägers  $\sigma_{max}$  ergeben sich unter Verwendung von Gleichung (1) zu:

$$w_m = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{EI} = \frac{5}{16} \tan(\varphi) L$$
<sup>(2)</sup>

$$M_{max} = \frac{q L^2}{8} = \frac{3 EI \tan(\varphi)}{L}$$
(3)

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I}z = \frac{3 E \tan(\varphi)}{L} z$$
<sup>(4)</sup>

Der Zusammenhang zwischen dem Neigungsverlauf w'(x) und der Neigung  $\varphi$  am linken Auflager (x = 0) ergibt sich nach:

$$w'(x=0) = \tan(\varphi) . \tag{5}$$

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Neigungen w'(x) und der Durchbiegung w(x) entlang der Stabachse exemplarisch für einen Einfeldträger. Für eine konstante Streckenlast ergibt sich für die vertikale Verschiebung w(x) eine Funktion 4. Grades und für die Neigung eine kubische Gleichung. Die betragsmäßig größten Neigungen treten hier an den beiden Auflagern auf.



Abbildung 12: Qualitative Darstellung des Neigungsverlaufs w'(x) und Durchbiegungsverlaufs w(x) unter konstanter Streckenlast

Zur Ermittlung einer geeigneten Sensorposition ist der Neigungsverlauf w'(x) zu betrachten (siehe Abbildung 12). Positionen mit einer betragsmäßig großen Neigung eignen sich dabei besser als Messstelle als Positionen mit kleinen Neigungen. Bei der Bestimmung der optimalen Sensoranordnung sind Messunsicherheiten, die etwa aus Quantisierungsfehlern und Sensorrauschen resultieren, zu berücksichtigen. An einer Position mit einer betragsmäßig großen Neigung haben diese Effekte einen deutlich geringeren Einfluss auf das Messergebnis als an Stellen mit geringer Neigung, da das Verhältnis von Signal zu Störeffekt deutlich größer ist und somit die Neigung mit einer größeren Sicherheit aufgelöst werden kann. Für den betrachteten Einfeldträger sind die Neigungen daher vorzugsweise an den Endauflagern zu erfassen.

Analog können auch Rahmentragwerke betrachtet werden. Die Neigungsverläufe für einen eingespannten Rahmen und einen Zweigelenkrahmen sind in Abbildung 13 unter Berücksichtigung einer konstanten Streckenlast dargestellt. Die größten Verdrehungen an der Tragstruktur treten für die dargestellte Belastungssituation im Rahmenriegel mit einem Versatz zur Rahmenecke auf. Idealerweise sollten die Neigungen an diesen Stellen messtechnisch erfasst werden.

Der diskutierte Effekt der Messunsicherheit bei der Bestimmung von Tragwerksbeanspruchungen aus Neigungsmessungen wird im Zusammenhang mit der Ermittlung optimaler Sensoranordnungen in Abschnitt 7.5.2 dargestellt.



Abbildung 13: Qualitative Darstellung des Neigungsverlaufs w'(x) für einen eingespannten Rahmen (links) und einen Zweigelenkrahmen (rechts) unter konstanter Streckenlast q

4.3.4 Ermittlung von Beanspruchungen aus Neigungsmessungen bei unbekannter Lastanordnung

Die Ermittlung von Beanspruchungen und Verformungen einer Struktur kann bei unbekannter Lastanordnung ausgehend von gemessenen Neigungen mittels verschiedener Methoden erfolgen. Nachfolgend werden drei Verfahren betrachtet, die auf der Auswertung des Krümmungsverlaufs des betrachteten Bauteils beruhen:

- Verfahren nach Xingmin [26]
- Verfahren nach Bolle [27]
- Verfahren auf Basis nichtlinearer Berechnungen von Stahlbetonbauteilen (Modifizierte Stahlkennlinie) [28].

Bei dem Verfahren nach Xingmin wird der Neigungsverlauf über ein Polynom n-ter Ordnung angenähert. Durch Integration dieser Näherungsfunktion ergibt sich der Durchbiegungsverlauf. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass mehrere Neigungssensoren am betrachteten Bauteil angebracht sind. Mit dem Verfahren nach Bolle wird abschnittsweise die mittlere Krümmung berechnet und durch Integration nach dem Prinzip der virtuellen Kräfte (PvK) die gesuchte Verformung bestimmt. Beanspruchungen wie Biegemomente können auf gleiche Weise ermittelt werden.

Für die Verfahren nach Xingmin (auf Basis der Biegelinie) und nach Bolle (auf Basis der mittleren Krümmungen) ist es nicht erforderlich, das statische System, die Material- und Geometrieparameter beziehungsweise die Belastung zu kennen. Diese Verfahren beruhen auf der Erfassung des Neigungsverlaufes durch die Applizierung mehrerer Sensoren an der Tragstruktur. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit der nach Xingmin ermittelten Verformungen erheblich von der Wahl des Polynoms, welches den Neigungsverlauf abbildet, sowie von der Wahl der Sensorlage abhängig ist. Die gewählte Sensorlage hat ebenfalls beim Verfahren nach Bolle einen Einfluss auf die Genauigkeit der Verformungs-ermittlung [28].

Die beiden oben benannten Verfahren sind universell einsetzbar. Das Verfahren auf Basis nichtlinearer Berechnungen (modifizierte Stahlkennlinie) eignet sich nur für Stahlbetonbauteile, da es explizit dessen nichtlineares Materialverhalten berücksichtigt. Die Methode beruht ebenfalls auf dem Zusammenhang zwischen dem Krümmungsverhalten der Struktur und der Biegelinie. Aus der mittleren Krümmung des gerissenen Betonbauteils wird durch Integration der Momenten-Krümmungsbeziehung die gesuchte Verformung berechnet. Zur Anwendung dieser Methode ist lediglich ein Neigungssensor erforderlich, um die Verformung zwischen zwei benachbarten Auflagerpunkten zu ermitteln. Es ist jedoch zu beachten, dass hierfür zunächst das Trag- und Verformungsverhalten, unter Berücksichtigung der Rissbildung und Mitwirkung

des Betons in den gerissenen Bereichen (Tension Stiffening), realistisch simuliert werden muss [28].

Die erforderlichen Eingangs- und Einflussparameter für die verschiedenen Verfahren sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2:	Gegenüberstellung	der	verschiedenen	Verfahren	und	deren	Einflussparamete	۰r
	[28]							

Verfahren	Erforderliche Eingangsparameter	Mögliche Einflussparameter	
nach Xingmin [26]	<ul> <li>gemessene Neigungen</li> <li>Lage der Neigungssensoren</li> <li>Annahme der Näherungs- funktion</li> </ul>	– Grad des Polynoms – Anzahl der Neigungssensoren	
nach Bolle [27]	<ul> <li>gemessene Neigungen</li> <li>Lage der Neigungssensoren</li> </ul>	<ul> <li>Lage der Neigungssensoren</li> </ul>	
Nichtlineare Berechnungen [28] (Stahlbetonbauteile)	<ul> <li>gemessenen Neigungen</li> <li>Lage der Neigungssensoren</li> <li>statisches System</li> <li>Material- und Querschnitts- parameter</li> <li>Belastungssituation /-dauer</li> </ul>	<ul> <li>Lagerungsbedingungen</li> <li>Laststellung</li> <li>Material- und</li> <li>Geometrieparameter</li> </ul>	

## 4.4 Anforderung an die Messung

Die Anforderungen an die Messung sind separat für die verschiedenen Einsatzszenarien zu betrachten. Dabei ist unter anderem zu definieren, mit welcher Auflösung und an welchen Stellen Neigungen zu erfassen sind. Bei allen Einsatzszenarien wird dabei eine dauerhaft kraftschlüssige Verbindung des Sensors zum Tragwerk unterstellt.

Die nachfolgenden Ausführungen beinhalten die Annahme, dass eine Einzelmessung aufgrund des Sensorrauschens Messunsicherheiten aufweist. Durch Mittelung von Messdaten kann dieser Effekt minimiert werden.

# 4.4.1 Einsatzszenario 1: Einsatz zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Gebäuden

Für Tragwerke entsprechend Einsatzszenario 1 können die auftretenden Neigungen mithilfe des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit (GZG) abgeschätzt werden. Für diesen Zustand gelten Grenzverformungen, die in der Regel zwischen 1/250 bis 1/500 der Spannweite liegen, insofern keine strengeren Vorgaben durch den Bauherrn oder den Nutzer gemacht wurden.

Am Beispiel eines einfachen statischen Systems soll der Bereich der auftretenden Neigungen verdeutlicht werden. Dazu wird der in Abbildung 11 dargestellte Einfeldträger gewählt, der durch eine Gleichlast belastet wird. Mithilfe der mechanischen Zusammenhänge am linear-elastischen System kann der Zusammenhang zwischen Grenzdurchbiegung in Trägermitte  $w_m$  und der Auflagerneigung  $\varphi$  am schubstarren Balken gefunden werden, welcher in Abbildung 14 für einen schlanken Träger mit konstanter Biegesteifigkeit dargestellt ist.



Abbildung 14: Abhängigkeit der Auflagerverdrehung  $\varphi$  von der Grenzdurchbiegung  $w_m$  in Trägermitte eines Einfeldträgers unter Gleichlast und mittiger Einzellast

Die Auflagerneigungen nehmen im Bereich geringer Durchbiegungsbeschränkung stark zu und im Bereich strikter Beschränkungen flacht die Kurve zunehmend ab. Für den typischen Bereich der Grenzdurchbiegungen (1/250 bis 1/500 der Spannweite) ergeben sich daher Auflagerneigungen zwischen 0,73° bis 0,36° bei einer Gleichlast. Für deutlich striktere Anforderungen an die zulässigen Durchbiegungen, beispielsweise 1/1000 der Spannweite, sind die Auflagerneigungen kleiner als 0,2°zu erwarten. Zum Vergleich ist der Zusammenhang ebenfalls für eine Belastung durch eine mittige Einzellast gegeben, wobei sich bei gleicher Durchbiegung etwas geringere Auflagerneigungen ergeben.

Es ist zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Neigungen um Verformungen aus der vollständigen Belastung handelt, das heißt, dass der Anteil aus Eigengewicht und Ausbaulasten darin eingeschlossen ist. Da Überwachungssysteme in der Regel nur die relativen Verformungen in der Nutzungsperiode erfassen (siehe Abschnitt 4.3.2), sind die von einem Messsystem zu erfassenden Neigungen geringer als die oben dargestellten Neigungen, je nach Bauweise und Geometrie des Tragwerks. Es kann jedoch abgeschätzt werden, dass die auftretenden Neigungen, die beispielsweise durch Schneelasten hervorgerufen werden, bis zu 500 Milligrad im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit betragen. Eine Auflösung im Bereich von kleiner 5 m° ist daher bei der Tragwerksüberwachung in Einsatzszenario 1 erforderlich.

Lokale Verformungen sind dabei idealerweise an Positionen zu erfassen, an denen die größten Neigungen auftreten, um die höchstmögliche Genauigkeit der Messung zu erhalten (siehe Abschnitt 4.3.3) und um die maximal auftretende Neigungsänderung am Bauteil zu erfassen. Unter Berücksichtigung einer möglichen Unsicherheit in der tatsächlich auftretenden Belastung können mehrere Messstellen außerdem helfen, die Unsicherheit bei der Identifikation von auftretenden Mittenverformungen oder Biegemomenten zu verringern. Dies ist im Zusammenhang mit dem prototypisch zu entwickelnden Messsystem zu betrachten, welches aufgrund der geringen Kosten eine Installation mehrerer Sensoren an einem Bauteil erst ermöglicht.

Die auftretenden Lasten können als quasi-statisch betrachtet werden, da sich beispielsweise infolge Schneefall die Lasten nicht plötzlich ändern, sondern über einen bestimmten Zeitraum aufbauen. Die Erfassung einzelner Messwerte kann daher mir einer moderaten Abtastrate erfolgen. Dabei ist die Ermittlung eines abgesicherten Messwerts je Minute ausreichend. Die "Absicherung" kann dabei durch Mittelwertbildung oder Filterung erfolgen, um so den Effekt des Sensorrauschens zu eliminieren. Zur Ermittlung eines abgesicherten Messwerts je Minute wird

eine Abtastrate von 1 Hz als sinnvoll erachtet, da der Durchschnitt aus 60 Einzelmesswerten gebildet werden kann.

Bei Installation eines Überwachungssystems an balkenartigen Tragwerkselementen ist die Erfassung der Neigungen in einer Achse ausreichend.

Die Praxistauglichkeit eines prototypisch entwickelten Messsystems auf Basis von Mikrocontrollerhardware und MEMS-Neigungssensoren (siehe Abschnitt 5) wird an einem Hallentragwerk untersucht und in Abschnitt 11.5 ausführlich dargestellt.

## 4.4.2 Einsatzszenario 2: Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse

Besteht die Gefahr eines plötzlichen Eintretens von Neigungsänderungen durch natürliche oder durch den Eingriff des Menschen hervorgerufene Bewegungen im Baugrund, sind die Verdrehungen am Bauwerk in den beiden horizontalen Achsen mit hohen Abtastraten zu erfassen und die resultierende Neigung zu ermitteln. Dabei ist eine Erfassung eines abgesicherten Messwertes je Sekunde ausreichend. Die Ermittlung eines abgesicherten Messwertes kann, wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, mithilfe von Mittelwertbildung erfolgen, wobei die Abtastrate mindestens 20 Hz betragen sollte.

Ein Monitoringsystem, das für die Überwachung von durch Baugrundprozesse hervorgerufene Gebäudeneigungen eingesetzt wird, kann zweckmäßig auf der Bodenplatte des Gebäudes befestigt werden. Ist dies praktisch nicht umsetzbar, so ist auf möglichst geringe Differenzverformung zwischen Standort und Bodenplatte bzw. Fundament zu achten, d.h. nur quasi-starre Unterstützungskonstruktionen oder Bodenaufbauten zuzulassen. Ein auf einer Grundplatte installiertes Messsystem zur Überwachung einer Gebäudeneigung ist in Abbildung 15 dargestellt.

Bei Installation des Messsystems sollte weiterhin auf externe Störquellen geachtet werden. In Gebäudekellern sind oftmals Waschmaschinen, Trockner oder Tiefkühlgeräte vorhanden, die unter Umständen einen störenden Einfluss auf die Messwerte haben. Bei der Festlegung eines Grenzwertes ist daher gegebenenfalls der Einfluss dieser externen Störquellen zu berücksichtigen.



Abbildung 15: Messsystem zur Überwachung der Gebäudeneigungen auf einer Grundplatte im Keller eines Wohnhauses

Ein Überwachungssystem, das die Neigungen kontinuierlich erfasst und abgesicherte Messwerte ermittelt, muss mit einem Alarmsystem gekoppelt sein, um die Bewohner beziehungsweise Nutzer des Gebäudes bei Überschreitung eines kritischen Grenzwertes rechtzeitig zu warnen.

Es wird davon ausgegangen, dass geringe Rotationen der Bodenplatte vor dem tatsächlichen Versagen des Baugrundes das Eintreten eines kritischen Zustandes ankündigen, sodass eine

Warnung der Nutzer möglich ist. Diese Neigungen sind maßgebend für die Definition der Warngrenze.

Die zu detektierenden Neigungen für Gebäude in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse sind von Fall zu Fall in Abhängigkeit des Gebäudes von einem Fachmann zu beurteilen. In einem konkreten Einsatzfall, bei dem die Neigung eines Wohngebäudes in einem Risikogebiet für Erdfälle messtechnisch erfasst wird, wurde ein Grenzwert von 50 m° festgelegt. Die kritischen Neigungen können durchaus auch im Bereich größer 10 m° liegen. Neigungen sollten daher mit einer Genauigkeit von kleiner 2 m° erfasst werden.

### 4.4.3 Einsatzszenario 3: Einsatz an historischen Bauwerken

Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Einsatzszenarien ist bei der Neigungsüberwachung an historischen Bauwerken nicht die Identifikation einer kritischen Neigung das Ziel, sondern die Erfassung eines Verlaufs der Neigungsänderung über einen langen Zeitraum. Dabei soll über den Verlauf von mehreren Jahren eine Neigungstendenz ermittelt werden, um beispielsweise die Ursachen der Schiefstellungen besser zu verstehen. Die Neigungsänderungen bezüglich einer Ausgangslage sind dabei in den beiden horizontalen Achsen zu ermitteln, um eine Hauptkipprichtung aus den beiden richtungsbezogenen Neigungsmessungen bestimmen zu können.

In der Regel handelt es sich um turmartige Bauwerke, deren bereits vorhandene Schiefstellung zu überwachen ist. Die globale Schiefstellung, die an realen Bauwerken beobachtet werden kann, beträgt zwischen 1° und 6,7° bei einem Überhang der Turmspitze von bis zu 4,60 m [18]. Trotz relativ großer globaler Schiefstellungen sind jedoch langsame und kleine Neigungsänderungen zu erwarten. Bei der Erfassung von relativen Neigungsänderungen sind daher Genauigkeiten im Bereich um 1 - 2 Milligrad notwendig.

Da es sich um langfristig angelegte Messkampagnen handelt und in der Regel keine plötzlichen Neigungsänderungen zu erwarten sind, wird es typischerweise ausreichend sein, einen abgesicherten Messwert je 10 Minuten zu ermitteln. Dabei können 10-Minuten-Mittelwerte aus Messungen mit weniger als einem Messwert je Sekunde berechnet werden. Jedoch ist die genaue Messaufgabe für jedes Bauwerk einzeln zu definieren, da es gegebenenfalls standortspezifische Anforderung geben kann.

Bei der Durchführung von Langzeitmessungen ist insbesondere der Drift der Sensorik bei der Auswertung der Messergebnisse zu beachten. Ohne eine geeignete Berücksichtigung bzw. Kompensation von Temperatureffekten und des Sensordriftens kommt es zu Fehlinterpretationen des Langzeitverhaltens der betrachteten Turmstruktur. Um eine valide Kompensation des Langzeitdrifts durchzuführen, ist daher die Kenntnis über den Drift der eingesetzten Sensorik notwendig.

Bei der Betrachtung der Schiefstellung von Türmen ist ebenfalls zu beachten, dass sich das Bauwerk nicht notwendigerweise als Ganzes neigt, sondern sich gegebenenfalls nur einzelne Bauwerksteile schiefstellen. Dies kann insbesondere bei Kirchen der Fall sein, bei denen der Kirchturm beziehungsweise die Kirchtürme auf einem Sockel ruhen und nur der obere turmartige Teil eine Schiefstellung erfährt (siehe Abschnitt 11.3).

Weiterhin ist bei der Festlegung der Messstelle zu beachten, dass über die Höhe des Turmes verschiedene Neigungen auftreten können. Teilweise können an existierenden Bauwerken mit bloßem Auge Abknickungen festgestellt werden. Daher kann es unter Umständen erforderlich sein, an mehreren Positionen die Neigungsänderungen zu erfassen.

Die Installation der Sensorik an historischen Bauwerken kann an Wänden oder an massiven Zwischendecken erfolgen. Eine Installation auf leichten Holzbalkendecken ist nicht zweckmäßig. Bei der Befestigung an Natursteinwänden ist darauf zu achten, dass die Sensorik nicht nur an einem einzelnen Gesteinsblock befestigt wird. Um eine Aussage über das globale Verhalten des Bauwerks zu erhalten, ist eine Verbindung zu einem größeren Wandbereich zu schaffen. Dies kann beispielsweise mithilfe von Traversen erfolgen, die über einen Bereich mehrerer Steinreihen mit dem Bauwerk verankert sind.

Als Referenzobjekt für dieses Einsatzszenario wurde ein Kirchturm gewählt. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 11.3 detailliert dargestellt. Dabei wird auch auf die Befestigung der Sensorik an der Kirchturmwand unter Verwendung einer Stahltraverse eingegangen.

In Kirchtürmen sind oftmals Läuteanlagen für Glocken vorhanden. Die in den Kirchturm eingetragenen Schwingungen infolge des Glockenläutens, die in der Regel dominant in einer Messachse auftreten, sind bei der Datenauswertung zu berücksichtigen. In Einzelmessungen mit hoher Abtastrate kann der Effekt des Läutens auf die gemessenen Neigungen bestimmt werden.

## 5 Prototypisches Messsystem auf Basis von Mikrocontrollern

Für die messtechnische Erfassung von Neigungsänderungen wurde während des Bearbeitungszeitraumes ein prototypisches Messsystem, bestehend aus Mikrocontroller und MEMS-Beschleunigungssensor, entwickelt. Dieses Messsystem ist kostengünstig und stellt eine Alternative zu den kostenintensiven, proprietären Lösungen, bestehend aus hochpräziser Sensorik, Datenlogger und der entsprechenden Datenerfassungssoftware, dar. Das Messsystem vereint Prozesse der Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung in einem System. Der Vorteil des alternativen Messsystems liegt einerseits in der Größe und der Modularität, die eine einfache Installation ermöglichen, andererseits wird durch die deutlich geringeren Kosten eine redundante Auslegung ohne großen finanziellen Aufwand möglich. Insbesondere sollen durch die geringeren Kosten neue Anwendungsgebiete erschlossen werden, sodass zukünftig Tragwerke von Industriehallen, historischen Bauwerken und Gebäuden in Risikogebieten verlässlich überwacht werden können.

Neben der Auswahl geeigneter Mikrocontroller-Hardware wurde während der Projektlaufzeit ein softwareseitiges Rahmenkonzept für die Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung entwickelt, implementiert und ausgiebig getestet.

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Auswahl der Mikrocontroller, die softwareseitige Integration der Sensorik, die Datenerfassung und -verarbeitung sowie deren Umsetzung diskutiert und beschrieben.

## 5.1 Mikrocontroller

Ein Mikrocontroller ist ein Einplatinencomputer, bei dem alle Komponenten auf einer einzelnen Platine enthalten sind. Dies führt zu einer sehr kompakten Bauweise. Aufgrund der geringen Kosten und der geringen Stromaufnahme eignen sich Mikrocontroller für den Einsatz im sensorbasierten Bauwerksmonitoring, da selten rechenintensive Prozesse nötig sind. Kleine Systeme können mit Batterie betrieben werden und liefern eine sehr hohe Flexibilität beim mobilen Einsatz.

In Systemen des sensorbasierten Bauwerksmonitorings sind verschiedene Ansätze beim Design der Controller Hardware möglich. Ein Ansatz besteht darin, den Sensorknoten, das heißt den Sensoren und der direkt verbundenen Hardware, nur die unmittelbar nötige Leistungsfähigkeit zu geben, um Daten aufzunehmen und an eine zentrale Verarbeitungsstelle weiterzuleiten, welche dann mit den Daten aller Sensoren die erforderlichen Berechnungen und Simulationen durchführt. Ein anderer Ansatz versorgt die einzelnen Sensorknoten mit genügend Rechenleistung, um ihnen auch Aufgaben der Datenauswertung zu überlassen. An dieser Stelle wurde sich für den zweiten Ansatz entschieden, da oft kleine Sensorsysteme aus einem einzelnen Sensorknoten verwendet werden und auf diese Weise wie ein größeres System genutzt werden können. Aus diesem Ansatz lassen sich Anforderungen an die Hardware für die Sensorknoten ableiten. Ein wichtiges Kriterium für dieses Projekt ist der Preis der Komponenten. Zielstellung ist es, eine Alternative zu hochpreisigen, proprietären Lösungen zu schaffen, indem auf offene und etablierte Soft- und Hardware gesetzt wird. Zusätzlich zu den preislichen Vorteilen hat man so Zugang zu Ressourcen, die durch eine sehr aktive Open Source Community geschaffen wurden. [29]

Um die verschiedenen Mikrocontroller zu vergleichen, wurden folgende projektrelevante Kriterien ausgewählt:

- Preis
- Betriebssystem
- Hauptprozessor (CPU)
- Hauptspeicher (Arbeitsspeicher)
- Festspeicher
- GPIO (Schnittstelle zur Anbindung von Sensorik)
- Netzwerkfähigkeit
- Anschlüsse f
  ür weitere Ger
  äte
- unterstütze Programmiersprachen.

Die GPIO-Schnittstelle ermöglicht dabei die Kommunikation mit extern verbunden Geräten und Sensoren über die Bus-Systeme SPI (Serial Peripheral Interface) oder I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated-Circuit). In Tabelle 3 werden die verschiedenen Mikrocontroller bezüglich der benannten Kriterien verglichen. Es wird eine Auswahl vorhandener Mikrocontroller dargestellt, die zu Projektbeginn im Oktober 2015 auf dem Markt waren.

Es ist anzumerken, dass die Auflistung der verschiedenen Mikrocontroller in Tabelle 3 nicht vollständig ist. Aufgrund der fortschreitenden Weiterentwicklungen ändert sich das Angebot stetig und das Spektrum ist deutlich breiter als hier dargestellt.

Unter Berücksichtigung der Anforderung an Leistungsfähigkeit und Preis scheiden sowohl Arduino Mega 2560 als auch BeagleBone aus. Raspberry Pi 2 Modell B, Banana Pi 2 und ODROID C1+ sind ähnlich und unterscheiden sich hauptsächlich in Leistungsfähigkeit des Prozessors und im Preis. Alle drei Plattformen besitzen bereits Quad-Core-Prozessoren, die die Bearbeitung gleichzeitiger Prozesse ermöglichen. So können beispielsweise gleichzeitig Daten gelesen, ausgewertet und gespeichert werden. Der Banana Pi ist so konzipiert, dass er mit dem Raspberry Pi kompatibel ist [30]. Aufgrund eigener Erfahrungen und des Umstandes, dass es die weitaus größte Online Community für den Raspberry Pi gibt, wurde der Raspberry Pi als Plattform gewählt.

Während der Projektlaufzeit ist der Markt der Mikrocontroller beständig gewachsen und hat leistungsfähigere Hardware hervorgebracht. Im Februar 2016 ist die dritte Generation des Raspberry Pis auf den Markt gekommen ist. Der Raspberry Pi 3 Modell B unterscheidet sich von seinem Vorgängermodell durch ein integriertes Funk-Modul für WLAN und eine höhere Prozessorleistung (4x1200 MHz). Trotzdem ist der Raspberry Pi 3 für unter 40 € erhältlich. Der Raspberry Pi 3 ist in Abbildung 16 gezeigt. Die einzelnen Komponenten an Ober- und Unterseite sind in Abbildung 17 gekennzeichnet.



Abbildung 16: Raspberry Pi 3 Modell B Mikrocontroller [B12]

Eine aktuelle Marktübersicht mit dem Stand Oktober 2017 ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt. Deutliche Verbesserungen sind bei den verbauten Prozessoren und im Arbeitsspeicher zu bemerken. So kommen in den aktuellen Mikrocontrollern, die bis zu 2 GB Arbeitsspeicher besitzen, standardmäßig bereits Vierkern- bis hin zu Acht-Kern-Prozessoren mit bis zu 1.800 MHz zum Einsatz. Teilweise werden auch 64-bit Betriebssysteme unterstützt. Die Mini-PCs unterscheiden sich häufig in der Anzahl der verschiedenen Anschlüsse, wie USB, HDMI und Ethernet.

Die bekanntesten Mikrocontroller sind der Raspberry Pi und die Arduino Plattformen. Die neu auf dem Markt erscheinenden Mikrocontroller wie der Orange Pi oder das Asus Tinker Board ähneln dem Raspberry Pi sehr stark. Im Konkurrenzkampf mit dem Marktführer Raspberry Pi warten Banana Pi, Orange Pi und Tinker Board mit schnelleren Prozessoren und mehr Arbeitsspeicher auf.



Abbildung 17: Kennzeichnung der einzelnen Bauteile des Raspberry Pi 3 Modell B an Oberund Unterseite [oben: B12, unten: B13]

Die steigende Leistungsfähigkeit der Mikrocontroller ist dabei im Zusammenhang mit dem Messprozess zu sehen. Eine größere Prozessorleistung ermöglicht auf der einen Seite schnelleres Abarbeiten von Prozessen. Auf der anderen Seite ermöglichen Mehrkernprozessoren das Ausführen paralleler Prozesse ohne gegenseitige Beeinflussung. Das ist insbesondere wichtig, wenn Messung und Auswertung der Daten gleichzeitig erfolgen soll. Rechenintensive Prozesse, wie die Mittelung großer Datenmengen, haben auf diese Weise keine Störeffekte auf eine aktive Langzeitmessung.

	Raspberry Pi 2 B	Arduino Mega 2560	BeagleBone	Banana Pi 2	Odroid-C1+
Hersteller	Raspberry Pi Foundation	Arduino	Beagle Board Foundation	Lemaker.org	Hardkernel
Preis	40€	18€	89€	20€	50€
Betriebssystem	Div. Linux Distributionen,	Keins, nur programmierbar	Div. Linux Distributionen	Div. Linux Distributionen	Div. Linux Distributionen
Hauptprozessor	4 x 900 MHz ARM-V7	16 MHz	1x1000MHz ARM Cortex-V8	4 x 1000 MHz ARM Cortex-A7	4 x 1500MHz ARM V7
Hauptspeicher	1024MB	8 KB	256MB	1024MB	1024MB
Festspeicher	Micro SD Karte	256 KB	Micro SD Karte	Micro SD Karte	Micro SD Karte
GPIO Schnittstelle	40 Pins	54 Pins	2 x 46 Pins	40 Pins	40 Pins
Netzwerkfähigkeit	Ethernet Anschluss, WLAN USB Stick	Nur externe Module	Ethernet Anschluss, WLAN USB Stick	Ethernet Anschluss, WLAN	Ethernet Anschluss, WLAN USB Stick
Anschlüsse für weitere Geräte	4 x USB	16 analoge Pins	1 x USB	4 x USB	4 x USB
Unterstützte Programmiersprachen	C++, C, Python, 	Arduino Language basiert auf C/C++	C++, C, Python,	C++, C, Python, 	C++, C, Python, 

## Tabelle 3:Vergleich verschiedener Mikrocontroller Hardware mit Stand zu Projektbeginn [29, B14 – B18]

## Tabelle 4:Vergleich verschiedener Mikrocontroller Hardware mit Stand zu Projektende – Teil 1 [B19 – B22]

	Rasbperry Pi 3 B	Banana Pi M3	Arduino Uno	Odroid-C2
Hersteller	Raspberry Pi Foundation	Le Maker	Arduino	Hardkernel
Preis	35€	80€	20€	60€
Betriebssystem	Div. Linux Distributionen, Windows 10 IoT Core	Div. Linux Distributionen	Keins, direkte Ausführung des Codes	Div. Linux Distributionen
Hauptprozessor	ARM V8-A 4 x 1200 MHz	ARM A7 8 x 1600 MHz	16 MHz	AmLogic S905 A53 (ARMv8,64 Bit) 4 x 1750 MHz
Hauptspeicher	1 GB	2 GB	2 kB	2 GB
Festspeicher	Micro SD Karte	Micro SD Karte	32 kB	Micro SD Karte
GPIO Schnittstelle	40 Pins	40 Pins	16 Pins	40 Pins
Netzwerkfähigkeit	Ethernet + WLAN	Ethernet + WLAN	Nur externe Module	Ethernet
Anschlüsse für weitere Geräte	4 x USB, HDMI	3 x USB	6 analoge Pins	5 x USB
Unterstützte Programmiersprachen	C++, C, Python,	C++, C, Python,	Arduino Language (C Derivat)	C++, C, Python,

## Tabelle 5:Vergleich verschiedener Mikrocontroller Hardware mit Stand zu Projektende – Teil 2 [B23 – B26]

	BeagleBone Black	Asus Tinker Board	Orange Pi Plus 2	Intel Galileo Gen2
Hersteller	Beagle Board	Asus	Orange Pi	Intel
Preis	45€	50€	50€	80€
Betriebssystem	Div. Linux Distributionen	Tinker OS (Debian Derivat) Android 6.01	Div. Linunx Distributionen	Keins, direkte Ausführung des Codes
Hauptprozessor	AM3358/9 1 x 1000 MHz	RK3288 ARM Cortex-A17 32-bit 4 x 1800 MHz	H3 Cortex-A7 4 x 1500 MHz	Intel Quark X1000 32-bit 1 x 400 MHz
Hauptspeicher	512 MB	2 GB	2 GB	256 MB
Festspeicher	Micro SD Karte	Micro SD Karte	Mico SD Karte SATA	8 MB + Micro SD Karte
GPIO Schnittstelle	46 Pins	40 Pins	40 Pins	Keine
Netzwerkfähigkeit	Ethernet	Ethernet + WLAN	Ethernet + WLAN	Ethernet
Anschlüsse für weitere Geräte	USB, Micro HDMI	USB	5 x USB	PCle + USB
Unterstützte Programmiersprachen	C++, C, Python,	C++, C, Python, 	C++, C, Python, 	C++, C, Python, Arduino Language,
## 5.2 Entwicklung eines prototypischen Sensorboards

Zum Anschluss der Sensorik wurde während der Projektlaufzeit ein prototypisches Sensorboard entwickelt, um die MEMS-basierten Neigungssensoren des Projektpartners First Sensor mit einfachen Steckverbindern anschließen zu können. Diese Sensoren stellen eine digitale Schnittstelle über SPI bereit.

Über die entsprechenden GPIO-Pins können die Sensoren an den Raspberry Pi (Pi) angeschlossen werden. Ohne weiteren technischen Aufwand kann nur ein SPI Sensor über die vorhandenen GPIO-Pins angebunden werden. Um den gleichzeitigen Anschluss mehrerer Sensoren an einem Pi zu ermöglichen, wurde ein Sensorboard entwickelt, welches über die GPIO-Kontakte auf das Raspberry aufgesteckt werden kann. Das entwickelte Board ist in Abbildung 18 gezeigt.



Abbildung 18: Sensorboard (Aufsteckplatine) mit Echtzeituhr zum Anschluss mehrerer Neigungssensoren

Alle GPIO-Pins werden vom Pi durchgeleitet, sodass alle Anschlüsse weiterhin nutzbar sind. Die benötigten SPI-Kanäle (MISO, MOSI, SLK, CS) sowie Spannung und Masse werden über interne Leiterbahnen des Boards an die vier Sensoranschlüsse verteilt. In der Standard-konfiguration besitzt das Raspberry Pi zwei Chip-Select-Pins (CS), weshalb nur maximal zwei Sensoren angeschlossen werden können. Durch weiteren Aufwand ist es möglich, die Funktion verschiedener GPIO-Pins durch Anpassungen der Grundeinstellungen ebenfalls als Chip-Select für die Kommunikation über SPI zu verwenden. Innerhalb des Projektes ist es ausreichend, zwei Sensoren mit einem Mikrocontroller zu verbinden. Die Änderung der Pinbelegung wurde daher im Projekt nicht getestet.

Der Raspberry Pi besitzt eine interne Uhr, die auf Basis eines schwingenden Kristalls funktioniert. Diese Uhr gibt die lokale Systemzeit wieder. Diese wird jedoch bei jedem Neustart zurückgesetzt. Eine Referenzierung zur tatsächlichen Zeit, inklusive Datum und Uhrzeit, kann erst durch eine Abfrage der Atomuhr via Internetverbindung erreicht werden. Bei typischen Einsätzen der mikrocontroller-basierten Messsysteme ist oftmals keine Internetanbindung vorhanden. Da insbesondere während einer laufenden Messung auch bei Neustarts der Mikrocontroller eine eindeutige zeitliche Zuordnung der Messwerte gegeben sein muss, wurde auf dem Sensorboard weiterhin eine Echtzeituhr (Real-time clock) integriert. Diese soll eine akkurate Referenzierung der Messzeit bezüglich einer Globalzeit ermöglichen. Diese Uhr ist batteriegepuffert und wird im Ruhezustand des Pis über eine Knopfzelle mit Spannung versorgt, welche ebenfalls auf dem Board integriert ist. Diese Uhr ist vor Beginn der Messung einmal zu

stellen. Die zeitliche Synchronisation kann bereits im Vorhinein im Büro über eine Internetverbindung erfolgen.

In Tests wurde versucht, den Drift des inneren Taktgebers zu quantifizieren. Der integrierte Zeitgeber driftet bei Dauerbetrieb innerhalb eines Monats teilweise um mehrere Sekunden in der lokalen Systemzeit. Bei einer Referenzmessung über 100 Tage mit sechs gleichartigen Raspberry Pis konnte ein Drift zwischen 0,2 Sekunden und 1,0 Sekunden beobachtet werden, wobei der Drift von vier der sechs Pis im Bereich zwischen 0,58 und 0,69 Sekunden lag. Eine allgemeingültige, quantitative Aussage über der Drift der internen Uhr kann an dieser Stelle nicht angegeben werden. Das Langzeitverhalten der auf den Pis integrierten Uhren ist größeren Streuungen unterworfen und von den Fertigungsprozessen des schwingenden Quartz sowie von der Temperatur abhängig. An unterschiedlichen Pis können daher unterschiedliche Drifts für die internen Zeitgeber bestimmt werden.

Der Drift der verbauten Echtzeituhr (NXP Semiconductor PCF2129), welche über I2C integriert wird, besitzt eine Temperaturkompensation. Die Genauigkeit wird vom Hersteller mit  $\pm 3$  ppm im Temperaturbereich von -20°C bis +70°C angegeben [31]. Das heißt, der Drift kann bis zu  $\pm 0,25$  Sekunden je Tag betragen. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich um einen Maximalwert für den Drift handelt, der von allen Echtzeituhren des gleichen Modells nicht überschritten wird. Es ist zu erwarten, dass der tatsächliche Drift deutlich geringer ausfällt.

Die Form des Sensorboards wurde so gewählt, dass die Abmaße mit den Abmessungen des Raspberry Pis übereinstimmen. Über Abstandshalter und unter Nutzung der vorhandenen Bohrungen kann das Sensorboard fest mit der Grundplatine des Mikrocontrollers verbunden werden, wie in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 19: Raspberry Pi mit Sensorboard

### 5.3 Software

Die softwareseitige Umsetzung wird auf Basis des verwendeten Betriebssystems, des entwickelten Software-Frameworks, der Sensorkonfiguration sowie der Durchführung von Messungen beschrieben. Weiterhin wird auf das verwendete Dateiformat der Messdateien sowie Übermittlung der Messdateien auf einen Speicher-Server eingegangen.

#### 5.3.1 Betriebssystem

Für den Raspberry Pi existiert eine speziell angepasste Version von Debian Linux, genannt Raspbian [32], die vom Hersteller offiziell empfohlen wird. Es werden zwar mehrere verschiedene Betriebssysteme für den Raspberry Pi entwickelt, Raspbian bietet jedoch die beste Unterstützung für die spezielle Hardware-Ausstattung des Pis, hat eine große Software-Bibliothek, die einfach genutzt werden kann, und ist sehr stabil. Besonders die Langzeitstabilität des Systems war bei der Auswahl wichtig, da die Messsysteme für eine größere Dauer am Bauwerk installiert werden und vermeidbare Wartungsanfahrten zusätzlichen Aufwand verursachen.

Als vollwertige Linux Distribution erlaubt Raspbian die Verwendung aller gängigen Programmiersprachen und Bibliotheken. Die Verwendung von Netzwerkverbindungen, entweder lokal oder über das Internet, beseitigt den Bedarf zusätzlicher Steuerungshardware, da der Raspberry Pi direkt angesprochen, verbunden und kontrolliert werden kann. Messdaten können so direkt an einen Server versandt werden und stehen zeitnah zur Auswertung zur Verfügung.

#### 5.3.2 Software-Framework

Der Rasbperry Pi bietet diverse Anschlussmöglichkeiten für verschiedene Arten von Hardware (siehe Abbildung 17). Über diese Schnittstellen und unter Verwendung von Kommunikationsprotokollen wird Sensorhardware mit dem Pi verbunden. Um eine einfache und modulare Nutzung verschiedener Sensoren zu ermöglichen, wurde ein Software Framework zur Kommunikation mit verschiedener Sensorhardware entwickelt. Dieses Framework bietet eine einheitliche Schnittstelle für alle unterstützten Sensortypen. Der Vorteil dabei liegt darin, dass eine implementierte Messsoftware unabhängig vom verwendeten Sensor funktionieren kann und der Benutzer allein über eine Konfiguration regeln kann, welcher Sensor zu verwenden ist. Dabei wird nicht nur der Sensortyp angegeben, sondern je nach verwendetem Sensor auch die entsprechenden Parameter, die den Sensor konfigurieren. Diese können sowohl den Betrieb des Sensors beeinflussen, wie die Abtastrate oder welche Achse gemessen werden soll, als auch zur Übergabe von sensorspezifischen Kalibrierparametern dienen, wodurch eine on-board Kalibrierung der Messwerte erfolgen kann. Dies ist insbesondere wichtig, wenn ein angekoppeltes Alarmsystem in annähernd Echtzeit die tatsächlichen Neigungen benötigt, um diese mit festgelegten Grenzwerten zu vergleichen.

Ein weiteres Ziel bei der Entwicklung des Frameworks war es von Beginn an eine einfache Erweiterung des Frameworks vorzusehen. Eine häufige Aufgabe ist die Unterstützung neuer Sensortypen. Dies geschieht durch das Hinzufügen eines Software-Moduls, das die definierten Schnittstellen und Datenaustauschformate implementiert und in seiner Funktion einem Gerätetreiber entspricht. Durch das Vorhalten eines übergeordneten Frameworks besteht keine Einschränkung bezüglich anzubindender Sensorik. Eine unkomplizierte Integration neuer Sensorik ist auch für die Zukunft gegeben. So ist zum Beispiel vorstellbar, dass auch durch zusätzliche Temperatursensoren oder Dehnmesstreifen hilfreiche Informationen gesammelt werden können, die eine Bewertung des Bauwerkszustandes erlauben. Das Framework wurde in der Programmiersprache Python implementiert, einer universellen, interpretierten höheren Programmiersprache. Sie erfreut sich vor allem in den letzten Jahren großer Beliebtheit und gehört zu den meist genutzten Programmiersprachen. Im wissenschaftlichen Bereich wird sie häufig als eine Alternative zu proprietären Hilfsmitteln wie Matlab oder MS Excel verwendet. In der Open Source Scene rund um den Raspberry Pi ist Python weit verbreitet und bildet die Grundlage für viele Projekte. Darüber hinaus sind für Python zahlreiche Bibliotheken für die Auswertung von Messdaten und deren Visualisierung verfügbar.

Im Rahmen dieses Projektes wurde das Framework um einen Treiber ergänzt, der die Steuerung von MEMS-basierten Neigungssensoren von First Sensor ermöglicht. Das Plug-in spricht den Sensor mithilfe des SPI-Protokolls an, konfiguriert den Steuerungschip (ASIC) des Sensors und liest die Messwerte aus. Das Plug-in musste nur dem Framework hinzugefügt werden und erlaubt sofort, die Sensoren von First Sensor mit schon bestehenden Programmen zu verwenden. Die Kommunikation über das SPI-Protokoll erfolgt zwischen einem steuernden Gerät, dem Pi (Master), und einem oder mehreren angeschlossenen Geräten, den Sensoren (Slave), über die Kanäle MISO, MOSI und CLK sowie einer Datenleitung (siehe Glossar).

Zusätzlich zu dem implementierten Treiber wurde das Framework um weitere Funktionen ergänzt, die für die Anforderungen des Projektes wichtig sind. Dazu gehören die Definition und Umsetzung von Datenformaten, in denen Messergebnisse gespeichert werden können, ein Konverter für die verschiedenen Datenformate und eine Server-Anwendung, die die Steuerung des Messsystems über ein Netzwerk erlaubt. Diese Funktionen wurden für das Projekt benötigt, gehören nun zum Framework und können auch in anderen Projekten weiterverwendet werden. Die Software-Architektur ist in Abbildung 20 in Form eines UML-Klassendiagramms dargestellt.

Um die Anforderungen an Langzeitstabilität und Verlässlichkeit zu erfüllen, wurden mehrere automatische Software-Tests installiert, die bei jedem Update der Software prüfen, ob die Funktionalität der einzelnen Bestandteile und der Software als Ganzes erhalten bleibt. Diese sogenannten Modultests (Unit-Tests) sind Stand der Technik und wichtiger Bestandteil der Qualitätskontrolle innerhalb der Softwareentwicklung des Messsystems.

#### 5.3.3 Konfiguration des Sensors und Abfragen von Messwerten

Wenn eine Messung mit dem Neigungssensor von First Sensor durchgeführt werden soll, ist zuerst ein Setup und eine initiale Konfiguration nötig. Im Setup werden die Konfigurations-Speicher-Register mit etablierten Standardwerten beschrieben. Diese garantieren eine grundlegende Funktionalität des Sensors. Um die Einstellungen auf den speziellen Sensor und die spezielle Messaufgabe anzupassen, müssen die Parameter entsprechend angepasst werden. Wichtige Parameter dabei sind GAIN (Vorverstärkung), OFFSET (absolute Verschiebung des Messwertes), OBW (Bandbreite für das Ausgangssignal) und CSEL (Auswahl der Messachse). Die Werte dieser Parameter sind für jeden Sensor verschieden und müssen individuell in Labortests ermittelt werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden die individuellen Sensorparameter von First Sensor als Konfigurationsregister zur Verfügung gestellt.

Um Messwerte vom Sensor zu erhalten, muss dessen Speicherregister ausgelesen werden. Dieses enthält an der ersten Stelle ein so genanntes "Data Ready Bit". Ist dieses gesetzt, ist ein neuer Messwert verfügbar, ist es nicht gesetzt, ist der Sampling-Vorgang noch nicht abgeschlossen und es muss kurz gewartet werden. Ist das Bit gesetzt, kann der Rest des Speicherregisters (insgesamt 4 Byte) in einen Messwert umgewandelt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Sensor Werte mit Vorzeichen ausgibt und dies entsprechend berücksichtigt werden muss.



Abbildung 20: UML-Klassendiagramm

#### 5.3.4 Steuerung und Messablauf

Die zentrale Steuerung des Systems erfolgt über die Benutzung einer Client-Software, die auf einem lokalen Computer ausgeführt wird. Das Kommunikationsprotokoll ist über eine XML-RPC-Schnittstelle definiert, einem Protokoll zum Aufruf einer Prozedur von einem entfernten Rechner (Remote Procedure Call, RPC), das auf das XML-Datenformat aufbaut. Einzelne Knoten im Messnetzwerk führen jeweils eine Server-Software aus, die ein entsprechendes Interface zur Bearbeitung der Sensorkonfigurationen und der Messsteuerung zur Verfügung stellt.

RPC-Kommandos werden über HTTP via POST-Requests (POST-Anfragen) abgesetzt. Die Übertragung der Messdateien erfolgt über HTTP via GET-Requests. In der aktuellsten Version der Mess-Software wird ein modifizierter Linux-Kernel eingesetzt, welcher für Soft-Real-TimeAnwendungen entwickelt wurde [33]. Eine Anfrage an der RPC-Schnittstelle zum Starten einer Messung startet einen dedizierten Messprozess. Daraufhin signalisiert der zentrale Steuerungsprozess dem Kernel, dass der Messprozess mit höherer Priorität ausgeführt werden soll. Die Verwendung des Real-Time-Kernels mit der entsprechenden Prozess-Priorität garantiert eine maximale Latenz von kleiner als 200 Mikrosekunden zwischen dem Auslösen eines Timer-Interrupts und der tatsächlichen Ausführung durch den Prozess-Scheduler des Betriebssystems. Der Messprozess fragt den Sensor mit der definierten Abtastrate ab, fragt daraufhin das Betriebssystems nach dem aktuellen Zeitstempel und schickt die Daten über einen Inter-Process-Communication-Kanal (IPC Kanal) an den Steuerungsprozess. Ein dedizierter Thread des Steuerungsprozesses kann die Daten daraufhin in regelmäßigen Abständen abholen und weiterverarbeiten. Aktuell wird die Weiterverarbeitung darauf beschränkt, die erhobenen Messdaten in einem Binärformat zu speichern.

Eine typische Kommandosequenz zum Einrichten, Starten und Auswerten einer Messung über einen verbundenen Computer via XML-RPC-Schnittstalle sieht folgendermaßen aus:

Sensorspezifische Konfigurationsparameter können auf einfache Weise bei der Einrichtung des Sensors übergeben werden. Dies ist wichtig, da für den Neigungssensor eine Vielzahl an Parametern zu übergeben sind. Dazu zählen neben der Abtastrate und der Definition der Messachse auch Angaben zu Verstärkungsfaktoren (Gain), Offsetkorrekturen, Referenzspannungen und Filtereinstellungen.

Die erstellte Messdatei kann nach Ablauf einer Einzelmessung per HTTP von dem Knoten an den Client übertragen werden. Die Knoten speichern die Messwerte in einem eigens entwickelten Binärformat.

#### 5.3.5 Binärformat der Messdateien

Bei dem verwendeten Binärformat handelt es sich um eine leicht veränderte Variante des BinaryCSV-Formats. Der Header (Dateikopf) beinhaltet die Datentypen, in denen die Messwerte abgespeichert sind, die Namen der entsprechenden Messkanäle und Metadaten zur entsprechenden Messung. Darauf folgt der eigentliche Datenblock, der in fester Datenbreite einen lokalen Zeitstempel und die Messwerte zu diesem Zeitstempel abbildet.

Die Vorteile des Binärformats liegen primär in der reduzierten Dateigröße im Vergleich zu CSV-Dateien. Die erstellten Messdateien sind im Durchschnitt zirka 35% kleiner als im CSV-Format. Eine zusätzliche Komprimierung der Dateien um bis zu 70% kann mit Dateikomprimierung (gzip) erreicht werden.

=====	======	=======	========================	=======================================
Offset	Length	Example Value	Value	Description
			=======================================	
0x0000	1	0xEB	**0xEB**	Magic byte 1
0x0001	1	0xFF	**0xFF**	Magic byte 2
0x0002	1	0	0x00	Major version number
0x0003	1	4	0x04	Minor version number
0x0004	8	1.485965E9	0xAF 0x5F 0x85 0x1E 0x22	UTC date of file generation
0x000C	4	350	0x5e 0x01 0x00 0x00	Length of metadata string
0x000E	4	5	0x05 0x00 0x00 0x00	Length of types char array
0x0014	4	60	0x3c 0x00 0x00 0x00	Length of units string
0x0018	4	90	0x5a 0x00 0x00 0x00	Length of column names
0x001C	350	"metadata"	0x6d 0x65 0x74 0x61	Metadata string
0x017A	5	dddiB	0x64 0x64 0x64 0x69 0x42	char array of data types
0x017F	60	"dt64 LSB"	0x64 0x74 0x36 0x34	Units string
0x01BB	90	"time accx"	0x74 0x69 0x6D 0x65	Column names string
0x0232	29	""		Start of data block
0x024F	29	""		Next data entry

Das Binärformat ist folgendermaßen spezifiziert worden:

Die Länge des Metadaten-Felds ("metadata'...') ist variabel und wird unter anderem dafür benutzt, Messparameter, Sensor-Konfigurationseinstellungen oder Umgebungsparameter abzuspeichern. Das Dateiformat kann mit Hilfe eines Konvertierungsprogramms zu einem menschen- und maschinenlesbaren CSV-Format umgewandelt werden. Eine konvertierte csv-Datei besitzt einen Header (Dateikopf, Zeilen 1-7) und einen Datenblock (von Zeile 8), in dem die Messwerte durch Semikolon separiert werden. Als Dezimaltrennzeichen wird ein Punkt benutzt, um ein einfaches Einlesen in Standardanwendungen zur Datenauswertung zu ermöglichen. Die csv-Datei besitzt folgendes Aussehen:

- 1 # RaspyreFile 0.1
- 2 # Time 1488201843.464029
- 3 # configuration OBW 3, CSEL 1, DSE 0, OFTB 5616, OFTA 5673, GAIN1 2, GAIN2 7
- 4 # configuration GAIN1 2, GAIN2 7, ...
- 5 # datatypes ddd
- 6 # units dt64, LSB, LSB
- 7 # columns time, accx, temperature
- 8 1488201843.4640290; 423576; 8788
- 9 1488201843.4739845; 423532; 8788
- $10 \ 1488201843.4836516; \ 423621; \ 8789$
- 11 1488201843.4933448; 423566; 8789
- $12 \ 1488201843.5031607; 423532; 8789$
- 13 .....

#### 5.3.6 Langzeitmessungen und Datenübertragung zu einem Speicher-Server

Bei Langzeitmessungen werden die Rohdaten der Beschleunigung und der Temperatur vom Sensor kontinuierlich mit einer definierten Abtastrate erfasst. Die Messdaten werden in einer Datei im Binärformat blockweise (siehe Abschnitt 5.4) auf dem lokalen Speicher des Messsystems in einer strukturierten Form abgelegt. Bei den Langzeitmessungen erfolgt eine redundante Speicherung auf einem USB-Speicher.

Für Langzeitmessungen erfolgt die Übertragung der Messdaten automatisiert in regelmäßigen Abständen zu einem entfernten Speicher-Server. Zusätzlich werden Vitalwerte des Systems übertragen, wie Temperatur, CPU-Auslastung, Arbeitsspeicherauslastung sowie freier Speicherplatz. Auf dem zentralen Speicher-Server werden die Messdaten automatisiert vom Binärformat in das CSV-Format konvertiert.

Um dauerhaft genügend Speicherplatz auf dem Messsystem vorzuhalten, verbleiben die Messdaten nur für eine bestimmte Zeit auf dem Raspberry Pi. Messdaten, die ein bestimmtes Alter überschreiten, beispielsweise drei Monate, werden vom Speicher des Messsystems gelöscht.

Da jegliche Kommunikation zu den Messsystemen unverschlüsselt stattfindet, wird das Netzwerk der Messknoten bei den Installationen an den Referenzbauwerken durch ein VPN (Virtual Private Network) isoliert. Der zentrale Speicher-Server, der an einem von dem Installationsort entfernten Ort steht, baut in regelmäßigen Abständen eine Verbindung zum VPN-Concentrator auf, um über den resultierenden Tunnel die Messdaten abzuholen. Die Implementierung der Datensynchronisation wird mit Hilfe des Linux-Synchronisationswerkzeugs "rsync" realisiert [34]. Die Daten auf dem Messknoten werden anhand ihrer Dateigröße und einer Prüfsumme auf Änderungen überprüft und gegebenenfalls zum Zentralserver übertragen. Die zeitbasierte regelmäßige Ausführung dieser Aufgabe wird durch die Benutzung von Cronjobs erreicht [35].

Bei entfernten Installationen, an denen nur sehr schlechte Konnektivität, beispielsweise nur durch ein UMTS-Modem, vorhanden ist und an denen nicht garantiert werden kann, dass die Verbindung stabil ist, findet die Verbindung zwischen Speicher-Server und Messknoten mithilfe eines SSH-Reverse-Tunnels statt. In diesem Szenario ist weiterhin nicht garantiert, dass die Messsysteme unter einer festen IP-Adresse erreichbar sind. Daher verbinden sich die Messknoten aktiv mit dem zentralen Server auf einem vorher festgelegten Port. Der zentrale Server verbindet sich dann mit dem Verbindungsendpunkt dieser rückwärts aufgebauten Verbindung, welche auf seiner eigenen IP-Adresse liegt. Für den Fall eines Verbindungs-abbruchs sieht die Konfiguration vor, dass die Messknoten in Abständen von 10 Minuten erneut versuchen eine Verbindung aufzubauen.

## 5.4 Softwareseitige Datenerfassung und Datenverarbeitung sowie Mittelwertbildung

#### 5.4.1 Anforderungen an die Datenerfassung und Datenverarbeitung

Allgemein wurden folgende Anforderungen an die Datenerfassung und die softwareseitige Datenverarbeitung gestellt:

- Kontinuierliche Erfassung von Messdaten für eine oder mehrere Achsen (Neigung)
- Kontinuierliche Erfassung der Umgebungstemperatur
- Ermittlung temperaturkompensierter Neigungen (wenn notwendig)
- Mittelwertbildung innerhalb definierter Zeitintervalle
- Abspeichern der Messdaten in definierten Zeitblöcken in einer strukturierten Form, gegebenenfalls Mittelwertbildung
- Online-Zugriff auf Messdaten und/oder Abspeichern der Messdaten auf externem Server
- Zeitlich begrenzter Verbleib der Rohdaten im lokalen Speicher des Messsystems
- Online-Zugriff auf das Messsystem mit Möglichkeit zur Anpassung von Parametern zur Optimierung der Performance und der Datenauswertung
- Filterung der Daten je nach Notwendigkeit

 Gegebenenfalls Einbindung des Messsystems in ein vorhandenes Datenmanagementsystem.

Weiterhin ist eine kontinuierliche Überwachung des Tragwerks beziehungsweise des Bauwerks zu gewährleiten. Bei Ausfall des Messsystems oder der Sensorik soll eine Benachrichtigung der verantwortlichen Personen erfolgen, beispielsweise via Email. Gleiches gilt bei Erreichen bestimmter Schwellwerte und festgelegter Grenzwerte der erfassten Neigungen.

#### 5.4.2 Datenerfassung und Mittelwertbildung

Die Messwerte werden kontinuierlich mit einer definierten Abtastrate erfasst. Jedem Neigungswert ist eine entsprechende Messzeit zugeordnet. Die während einer Messung auflaufenden Rohdaten werden ohne eine Umrechnung in eine Neigung kontinuierlich als Ganzzahlen in LSB gespeichert.

Die Größe der Messdateien ist von der gewählten Abtastrate und von der zugeordneten Messdauer abhängig. Die Messdauer ist in Abhängigkeit der Wichtigkeit der einzelnen Messdatei in Bezug zur Gesamtmessung zu wählen. Dabei ist die Frage zu beantworten, wie viele Messdaten welcher Messdauer im Falle eines Systemausfalls, beispielsweise infolge eines kurzzeitigen Stromausfalls oder eines Systemabsturzes, maximal verloren gehen dürfen. Für die messtechnische Erfassung der Neigungen unter quasi-statischen Lasten kann softwareseitig eine beliebige Messdauer für die abzuspeichernden Blockdateien gewählt werden. In Abhängigkeit der Anwendung sind jedoch unterschiedliche Größen beziehungsweise eine unterschiedliche Granularität für die einzelnen Dateien sinnvoll. Für Messungen an historischen Gebäuden, an denen sich nur sehr geringe Neigungsänderungen einstellen, kann das Messintervall in der Regel größer gewählt werden als für Neigungsmessungen in geotechnischen Risikogebieten, bei denen eine schnelle Auswertung der Messergebnisse notwendig ist. Unabhängig davon ist der Messzeitraum in jedem Fall mit dem Nutzer des Messsystems abzustimmen oder von diesem zu definieren. In Abbildung 21 ist die Aufteilung eines kontinuierlichen Signals in mehrere Zeitabschnitte schematisch dargestellt. Die Größe der Blockdateien ist dabei von der gewählten Gesamtdauer der Blockdatei sowie von der zugehörigen zeitlichen Auflösung abhängig.

Die Erfassung der Rohdaten in einer hohen Abtastrate ist insbesondere dann wichtig, wenn ein plötzliches Versagen des Tragwerks nicht ausgeschlossen werden kann und eine dauerhafte Überwachung von Grenzwerten in annähernd Echtzeit zu gewährleisten ist. Durch den Vergleich von in Neigung umgerechneten Rohdaten mit Grenzneigungen, denen das Tragwerk maximal ausgesetzt werden darf, kann das Erreichen eines kritischen Zustandes detektiert werden. Die Erkennung einer Überschreitung beziehungsweise eines kritischen Zustandes sollte an ein Alarmsystem gekoppelt sein.

Die Rohdaten werden auf dem lokalen Speicher des Messsystems vorgehalten. Für die Langzeitüberwachung von Tragwerken sind die Messdaten jedoch nicht in der vollen zeitlichen Auflösung erforderlich. Daher wurde weiterhin ein Algorithmus implementiert, der die Rohdaten über einen definierten Zeitraum in weitere Blöcke zusammenfasst und mittelt. Durch Vergrößerung der Granularität der Messdateien und die Mittelung können Messdateien zu größeren Blöcken, wie beispielsweise Tages- und Monatsdateien, zusammengefasst werden, wie in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 21: Schematische Darstellung der Aufteilung eines kontinuierlichen Signals in Blockdateien

Für die Messungen an den Referenzobjekten hat sich eine Blockgröße von zehn Minuten als praktikabel erwiesen.

Die Blockdateien mit den Rohdaten können zu Tagesdateien zusammengefasst werden, welche lediglich die Mittelwerte der einzelnen Minuten enthalten. Unter Berücksichtigung einer Abtastrate von 10 Hz sind beispielsweise 144 Blockdateien mit jeweils 6.000 Messwerten notwendig, um die Minutenmittel für einen einzigen Tag zu ermitteln. Die Dateigröße kann dabei um ein Vielfaches reduziert werden. Dies ist insbesondere vorteilhaft, wenn eine Internet-verbindung in der Bandbreite oder im Datenvolumen begrenzt ist. In diesem Fall können dann nur die gemittelten Messdateien zu einem Server übertragen werden und nur bei Bedarf werden die Rohdaten zentral abgelegt, um eine Auswertung eines bestimmten Zeitpunkts zu ermöglichen.



Abbildung 22: Erstellung von Tages- und Monatsdateien aus den Blockdateien mit Rohdaten

Ein weiterer Vorteil der Mittelung der Daten ist die Erhöhung der Genauigkeit der Messergebnisse, da durch Mittelung der Einfluss des Sensorrauschen annähernd eliminiert wird.

## 5.5 Datenfluss

Der Datenfluss von Sensor zum Speicher-Server bei Langzeitmessungen wird mithilfe von Abbildung 23 verdeutlicht. Die Rohdaten der Neigungen und der Temperatur werden am Sensor mithilfe der implementierten Algorithmen erfasst. Die Kommunikation zwischen Sensor und Framework erfolgt dabei über SPI. Die entsprechenden Leitungen sowie Spannungs- und Masseanschluss werden am entwickelten Sensorboard zur Verfügung gestellt. Die jeweiligen Leitungen werden im Sensorboard durchgeleitet und über den GPIO-Port mit dem Raspberry Pi verbunden.

Die auflaufenden Daten werden im Arbeitsspeicher des Raspberry Pis gesammelt und anschließend als Blockdatei auf einem lokalen Speicher (USB-Speichermedium) abgelegt. Über eine Netzwerkverbindung wird der Zugriff eines Servers auf den Raspberry Pi ermöglicht. Eine Datenübertragung nicht zuvor synchronisierter Dateien wird durch die Anfrage eines Servers initiiert (siehe Abschnitt 5.3.6).



Abbildung 23: Schematische Darstellung des Datenflusses vom Sensor zu einem lokalen oder entfernten Speichermedium

# 6 Anpassung der Sensorik für den Einsatz am Bauwerk

Die Arbeiten zur Anpassung der Sensorik für den Einsatz an Bauwerken gliedert sich in zwei Abschnitte. Zum einen wurden die Sensoren als Einzelbauteil, gelötet auf Leiterplatten, getestet. Im Zeitraum bis Juli 2016 lag der Schwerpunkt darin, technische Fragestellungen bezüglich der Sensorik zu bearbeiten. Im Vordergrund stand zunächst die erreichbare Datenqualität, die im Wesentlichen durch die Auflösung, den Skalierungsfaktor (Scale-Faktor) und die Nullpunktverschiebung (Bias) gekennzeichnet ist. Zum anderen wurden im zweiten Projektabschnitt die Sensoren einschließlich Leiterplatten in zwei verschiedene Gehäusevarianten integriert, um dadurch ein zuverlässiges Hausen der Komponenten zu gewährleisten und Untersuchungen auf den Einfluss der Langzeitstabilität durchzuführen.

## 6.1 Funktionsprinzip der Sensorik

Abbildung 24 zeigt das Blockschaltbild des Sensor-ASIC-Systems. Dieses besteht aus einem mikromechanischen Sensorelement, welches mit der patentierten AIM-Technologie gefertigt wird. Diese Technologie wird bereits erfolgreich bei der Herstellung von Präzisionsneigungssensoren und Beschleunigungssensoren angewendet. Vorteile dieser Technologie sind neben den relativ geringen Kosten ein sehr geringer Temperaturdrift, ein geringes Rauschen, eine hohe Empfindlichkeit durch große Strukturhöhen und dadurch ein hohes Aspektverhältnis. Des Weiteren werden Standard-Siliziumwafer verwendet: die mikromechanische Struktur ist aus einkristallinem Silizium und alle Funktionskomponenten sind schichtfrei. Somit sind keine zusätzlichen Schichten im System vorhanden, die zu abscheidungsbedingten Spannungen oder unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten führen können. Alle Funktionsstrukturen sind durch einen Luftspalt voneinander isoliert, wodurch sich sehr geringe parasitäre Kapazitäten ergeben. Das Sensorelement liefert als Ausgangssignal eine analoge Kapazitätsänderung, welche proportional zur wirkenden Kraft (Beschleunigung, Schwerkraft) ist. Die kapazitive Änderung wird mittels Auswerteelektronik (siehe Teil "ASSP for Signal Conditioning" in Abbildung 24) in ein digitales Ausgangssignal gewandelt.



Abbildung 24: Blockdiagramm des Sensor-ASIC-Systems

Der eingesetzte Auswerteschaltkreis ist sehr flexibel, so dass sich die analogen, kapazitiven Signale des mikromechanischen Sensorelementes effektiv weiterverarbeiten lassen. Dies wird durch eine Kapazität-Spannungs-Wandlung (C2V), einer Analog-Digital-Wandlung (ADC), der Filterung der digitalisierten Signale sowie eine Temperaturkompensation durchgeführt.

Beide Komponenten werden mittels Aufbau- und Verbindungstechnik in ein Gehäuse (siehe Abbildung 25) integriert und bilden die Basis des im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau umzusetzenden Messsystems zur Überwachung von Bauwerken.



#### Abbildung 25: Gehaustes Sensor-ASIC-System und geometrische Beschreibung des eingesetzten Gehäuses

Die Sensoren verfügen über ein digitales Ausgangssignal  $Out_{raw}$ , welches in LSB (least significant bit) ausgedrückt wird. Das Ausgangssignal beschreibt eine lineare Kennlinie in Abhängigkeit der wirkenden Beschleunigung. Dabei wird der Anstieg der Kennlinie als Scale-Faktor  $K_1$  (in LSB/g) und der Achsenabschnitt als Bias  $K_0$  (in LSB) bezeichnet:

$$Out_{raw}(Acc) = K_1 \cdot Acc + K_0 \tag{6}$$

Die Neigungsmessung ist eine Sonderform der Beschleunigungsmessung, da hier die Gravitationskraft genutzt wird, um den Neigungswinkel (Tilt) des Sensors im Erdschwerefeld zu bestimmen (siehe Abschnitt 4.2.1):

$$Tilt = \arcsin\left(\frac{Acc}{1g}\right) \tag{7}$$

Sowohl der Skalierungsfaktor (Scale-Faktor) als auch die Nullpunktverschiebung (Bias) lassen sich direkt aus der Kennlinie der Sensorsysteme bestimmen. Dazu sind mindestens zwei Messpunkte (Winkelstellungen beziehungsweise Beschleunigungswerte) notwendig, welche vom Absolutbetrag identisch sein müssen. Die Winkelstellungen am Testsystem sollten so gewählt werden, dass dadurch der zu erwartende Messbereich (z.B.  $\pm 5^{\circ}$ ,  $\pm 10^{\circ}$  oder  $\pm 30^{\circ}$ ) abgedeckt wird:

$$K_1 = \left(\frac{Out_{raw,max} - Out_{raw,min}}{Acc_{max} - Acc_{min}}\right)$$
(8)

$$K_0 = \left(\frac{Out_{raw,max} + Out_{raw,min}}{2}\right) \tag{9}$$

#### 6.2 Laborversuche zur erreichbaren Sensordatenqualität

In hausinternen Untersuchungen, Hardware-Tests und Laborexperimenten soll die erreichbare Datenqualität in verschiedenen Ausbaustufen des Sensors, der Sensorboards (Sensor gelötet auf Leiterplatte, siehe Abbildung 35) sowie der Integrationsvarianten (Sensorboards im Gehäuse) ermittelt werden, da jede physische Änderung am Sensor selbst oder dessen Aufbaukonzept direkte Auswirkungen auf die Kernparameter hat. Über diese Versuche sollen

Kompensationsfaktoren vor allem für Temperatureinwirkungen ermittelt werden. Systematische und zufällige Fehler sind dabei zu minimieren, um eine Langzeitstabilität des Sensors beziehungsweise der Daten zu gewährleisten (z.B. Minimierung des Langzeit-Drifts). Eine onchip- beziehungsweise onboard-Kompensation der Sensordaten soll implementiert und getestet werden.

### 6.2.1 Eingesetzte Messtechnik

Um die Kennlinien der Sensoren zu bestimmen, wurde ein Motion-Simulator (Turn-Table) eingesetzt, welcher in Abbildung 26 dargestellt ist. Der Positionierweg beträgt 360° und die Positioniergenauigkeit beträgt 15 Bogensekunden, was ca. 4,2 m° entspricht. Auf Grund der spezifischen Anforderungen im Rahmen des Projektes ist die Genauigkeit des Messsystems grenzwertig, da diese im Bereich der aufzulösenden Winkeländerungen am Bauwerk liegt. Der Messfehler kann jedoch durch Wiederholungsmessungen reduziert werden, so dass dies eine entsprechende Bewertung der Ergebnisse zulässt.

Der Turn-Table ist in einer Temperaturkammer der Firma Vötsch (Model7004) integriert, so dass sich Messungen der Kennlinien in einem Temperaturbereich zwischen -50 °C bis 115 °C durchführen lassen. Die Stabilität beträgt dabei ±0,5 K bei einer Homogenität innerhalb der Temperaturkammer von ca. ±1,5 K.



Abbildung 26: Eingesetztes Messsystem AC1120S V2.0 + V2.3 der Firma Acutronic einschließlich Messrechner (1), Temperaturkammer (2), Bedienpanel (3), Turn-Table für horizontale und vertikale Richtungen (4), Druckluftanschluss mit Druckbehälter (5), Entfeuchter (6) und Prüfkammer (7)

#### 6.2.2 Bestimmung von Scale-Faktor und Bias

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, erfolgt zunächst die Bestimmung des Scale-Faktors und des Bias anhand der Kennlinien. Vier Kennlinien der zu untersuchenden Neigungssensoren sind exemplarisch in Abbildung 27 für den Messbereich von ±5° dargestellt. Der Verlauf der Kurven kann mit einer linearen Funktion angenähert werden. Die Geradengleichungen sind angegeben. Der unterschiedliche Anstieg der Geraden wird durch den Skalierungsfaktor (Scale-Faktor) beschrieben und nimmt für die untersuchten Samples einen Wert zwischen 77.000 LSB/° und 87.000 LSB/° an. Das bedeutet, dass eine aufgebrachte Verdrehung von 1° eine Veränderung

des digitalen Ausgangssignals von 77.000 LSB bis 87.000 LSB zur Folge hat. Umgekehrt betrachtet beschreibt die kleinstmögliche Änderung im digitalen Signal von 1 LSB für Sample 5 eine theoretische Winkeländerung von zirka 0,012 m° (1/82.082 Grad). Die Verschiebungen der Geradengleichungen vom Nullpunkt werden durch den Bias repräsentiert, welcher für die dargestellten Sensoren mit Ausnahme von Sample 7 bei ca. 1,5 Millionen LSB liegt.



Abbildung 27: Kennlinie von vier typischen Neigungssensoren im Messbereich ±5°

Durch Bestimmung der Nichtlinearität (Abweichung der Sensorsignale von der idealen Geraden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate - Best Fit Straight Line) wird deutlich, dass in der Nähe des Nullpunktes eine Unstetigkeit im Anstieg für Sample 7 zu erkennen ist. Die Nichtlinearitäten in Abhängigkeit der Turn-Table-Stellung sind in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Nichtlinearität von vier typischen Neigungssensoren im Messbereich ±5°

Die Samples 4, 5 und 6 weisen dabei im Messbereich  $\pm 5^{\circ}$  jeweils eine maximale Nichtlinearität von  $\pm 5 \text{ m}^{\circ}$  auf, was einer Nichtlinearität von 0,1 % (bezogen auf den Messbereich  $\pm 5^{\circ}$ ) entspricht. Vergleichsweise haben am Markt verfügbare Sensoren eine Nichtlinearität von ca. 0,5 % - 1,0 %. Werden die Sensoren im Bereich  $\pm 30^{\circ}$  betrieben, wird eine Nichtlinearität von ca. 0,4 % beziehungsweise  $\pm 120 \text{ m}^{\circ}$  erzielt. Dabei ist zwar der Anteil der nichtlinearen Kapazitätskennlinie dominant, kann jedoch auf Grund des physikalischen Zusammenhangs einfach korrigiert werden.

Des Weiteren wurde bei Sample 7 eine größere Nichtlinearität von ±10 m° bestimmt. Wie bereits beschrieben, kann eine Nichtlinearität prinzipiell auch durch den Einsatz von Polynomkorrekturen verbessert werden, jedoch ist die Unstetigkeit in der Nähe des Nullpunkts nicht korrigierbar. Dieser Effekt konnte auf einen Linearisierungsfehler innerhalb der ASIC-Architektur zurückgeführt werden. Da dieser Fehler nur in der Nähe des digitalen Nullpunktes auftritt, wurde durch die flexiblen Einstellmöglichkeiten am ASIC ein kapazitiver Offset eingeführt. Daher sind die Kennlinien der Samples 4, 5 und 6 in Abbildung 27 zwischen 1.000.000 LSB bis 2.000.000 LSB (linke Ordinate) und die Kennlinie von Sample 7 zwischen -500.000 LSB bis 500.000 LSB (rechte Ordinate).

Der Restfehler (bei den Samples 4, 5 und 6) lässt sich auf die differentielle Nichtlinearität (DNL) des ASICs zurückführen, welche ca. 100  $\mu$ V beträgt. Die DNL wirkt dabei nur bei der Digitalisierung der analogen Spannungswerte. Vorher wird jedoch das analoge, kapazitive Signal des mikromechanischen Sensorelements in eine Spannung gewandelt. Diese Wandlung erfolgt in Abhängigkeit des C2V-Gains (Gain1, Gain2, Messspannung). Der Wert der DNL ist dabei unabhängig von den Gain-Einstellungen. Die Gain-Einstellungen der Messwerte entsprechen den Standard-Werten (Gain1 = 11 und Gain2 = 5), welche für einen Messbereich von  $\pm 30^{\circ}$  eingesetzt werden. Da dieser Winkelbereich beim Einsatz an den Bauwerken nicht notwendig ist und der Messbereich auf  $\pm 5^{\circ}$  beschränkt werden kann, wurden die Gain-Werte entsprechend angepasst. Durch die Verstärkung des Spannungssignales verbessert sich damit das Verhältnis DNL zu Nutzsignal ca. um Faktor 3,5, wodurch im Einsatz am Bauwerk eine maximale Nichtlinearität über den Messbereich von ca.  $\pm 1,5$  m<sup>°</sup> zu erwarten ist.

## 6.2.3 Bestimmung des Temperatureinflusses auf Scale-Faktor und Bias

Ein weiterer kritischer Punkt betrifft die Temperaturstabilität der Messwerte, da diese neben der Linearität einen großen Einfluss auf den resultierenden Messfehler hat. Zur Bestimmung der Temperaturkoeffizienten für den Scale-Faktor  $K_1$  und den Bias  $K_0$  wurden die Versuche im Temperaturbereich zwischen 25°C bis +80°C durchgeführt und die jeweiligen Temperaturkoeffizienten der Parameter  $K_1$  und  $K_0$  berechnet. Die Ergebnisse sind in den Histogrammen in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt. Aus diesen Darstellungen ergibt sich ein Temperaturkoeffizient des Scale-Faktors von 30 ppm/K bis 120 ppm/K sowie ein Temperaturkoeffizient von ca. ±10 m°/K.

Die Ergebnisse aus Abbildung 29 und Abbildung 30 stammen zum Teil aus Versuchen mit Vorgängerversionen des aktuellen Sensor-ASIC-Systems und wurden daher nochmals über einen Temperaturbereich zwischen -15°C bis 65°C wiederholt. Die Ergebnisse für 5 exemplarisch aufgetragene Kennlinien des Scale-Faktors und des Bias über Temperatur sind in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Dabei werden die Vorversuche weitestgehend verifiziert und ein Temperaturkoeffizient des Scale-Faktors von 82 ppm/K (Sample 2) bis 164 ppm/K (Sample 9) ermittelt. Der Einfluss des Scale-Faktors von der Temperatur ist dabei auf die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls von Silizium zurückzuführen. Der E-Modul wird mit zunehmender Temperatur geringer und damit die Federsteifigkeit kleiner. Daraus folgen wiederum eine größere Auslenkung der seismischen Masse und ein größerer Scale-Faktor. Der

Temperaturkoeffizient des Bias hat dagegen eine zufällige Abweichung. Die ermittelten Werte sind -2,3 m°/K (Sample 10) bis 4,2 m°/K (Sample 9) und betragsmäßig -0,3 m°/K (Sample 2).



Abbildung 29: Verteilung des Temperaturkoeffizienten des Scale-Faktors K<sub>1</sub>



Abbildung 30: Verteilung des Temperaturkoeffizienten des Bias K<sub>0</sub>



Abbildung 31: Änderung des Scale-Faktors K<sub>1</sub> in Abhängigkeit der Temperatur



Abbildung 32: Änderung des Bias K<sub>0</sub> in Abhängigkeit von der Temperatur

Wie in den vorangegangen Abbildungen dargestellt, ist der Einfluss der Temperatur auf den Scale-Faktor und den Bias in erster Näherung linear, wodurch eine einfache lineare Kompensation der Sensoren möglich ist.

#### 6.2.4 Stabilität und Auflösung

Zur Bestimmung der erreichbaren Genauigkeit (unabhängig von allen weiteren, äußeren Einflüssen) wurden die Sensoren bei verscheidenen Messfrequenzen getestet, das Rauschen bestimmt und daraus eine Auflösung bei 1 Hz Messfrequenz bestimmt. Für einen Einsatz am Bauwerk ist eine Messfrequenz von 1 Hz ausreichend, da hier lediglich quasi-statische Effekte betrachtet werden. Die Ergebnisse bezüglich der Rauschmessung sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Aus der Verteilung geht hervor, dass die zu erzielende Auflösung im Bereich von 0,2m° bis 0,6m° liegt. Alle Werte wurden dabei während eines HTOL-Tests (high temperature operating life) nach DIN EN 60749-23 [36] bestimmt:

- Dauer 1000 Stunden bei konstanter Temperatur von ca. 80°C
- Permanente Speisung mit 5 V Betriebsspannung
- Regelmäßige Überprüfung der Funktionalität durch Bestimmung des Rauschens
- Umfang 30 Sensoren, dabei keine Ausfälle

Durch den Test HTOL lassen sich ebenfalls Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Sensoren führen. Die Sensoren werden dabei sowohl durch die Betriebsspannung als auch die erhöhte Temperatur beansprucht. Dadurch wird eine beschleunigte Alterung der Sensoren simuliert. Der Acceleration-Faktor AF wird durch die Gleichung (10) bestimmt:

$$AF = exp\left[\left(\frac{E_A}{k}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{T_{USE}}\right) - \left(\frac{1}{T_{STRESS}}\right)\right)\right]$$
(10)

Unter Berücksichtigung der Aktivierungsenergie  $E_A = 0.7$  eV, der Boltzmann-Konstante  $k = 8,621 \cdot 10^{-5}$  eV und einer angenommenen, mittleren Arbeitstemperatur  $T_{USE} = 25^{\circ}$ C ergibt sich ein Acceleration-Faktor von 69,8. Der Acceleration-Faktor ist ein Maß für die Beschleunigung des Alterungsprozesses der Sensorik durch die Beanspruchung bei erhöhten Temperaturen. In dem durchgeführten Test wird eine äquivalente Lebensdauer von ca. 8 Jahren mit einer Zuverlässigkeit von 97% erreicht.



Abbildung 33: Auflösung bei einer Messfrequenz von 1 Hz über die Lebensdauer während eines HTOL-Tests



Abbildung 34: Drift des Bias K<sub>0</sub> über die Lebensdauer während eines HTOL-Tests

Des Weiteren wurde während des HTOL auch die Stabilität des Bias untersucht. Die Ergebnisse sind für drei ausgewählte Sensoren in Abbildung 34 dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass sich die verschiedenen Sensoren durchaus unterschiedlich verhalten. In Abhängigkeit von der Dauer ergeben sich Abweichungen des Bias  $K_0$ , welche letzlich eine Abweichung in den identifizierten Neigungen bedeuten. Jedoch wurde während des HTOL-Tests keine äußere Verdrehung aufgebracht. Dieses zeitliche Weglaufen des Messwerts wird als Drift bezeichnet. Im HTOL-Test ergeben sich ein Drift von zirka 30 m° für Sample 1, zirka 40 m° für Sample 3 sowie ein Drift von ungefähr 10 m° für Sample 2 über die Dauer von 1.000 Stunden, wobei letzterer ein anderes Vorzeichen besitzt. Der Drift kann nicht pauschal für die Sensoren angegeben werden, sondern ist sensorspezifisch zu definieren. Es ist weiterhin zu untersuchen, ob das Driftverhalten durch eine lineare Funktion angenähert werden kann.

#### 6.2.5 Zusammenfassung der erreichbaren Sensordatenqualität

Bezüglich der Untersuchungen an Sensoren, welche noch nicht in ein Gehäuse integriert wurden, sind die zu erwartenden Kennwerte und die erreichbare Datenqualität nachfolgend aufgelistet:

- Die Auflösung der Sensoren beträgt 0,4 ± 0,2 m° (verifiziert über Langzeitstabilität)
- Der Temperaturkoeffizient des Scale-Faktors  $K_1$  beträgt 90 ± 50 ppm/K (der Einfluss des E-Moduls von Silizium ist dominant),
- Der Temperaturkoeffizient des Bias  $K_0$  beträgt typisch ±2,5 m°/K (maximal bis zu ±10m°/K, wobei die Streuung hauptsächlich auf die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der eingesetzten Materialien zurückzuführen ist),
- Die Nichtlinearität im Messbereich ±5° beträgt ±5 m° und kann durch Einstellungen am Sensor-ASIC-System bis auf einen Restfehler von ±1,5 m° optimiert werden,
- Ein Driften der Sensorik ist zu beobachten. Das Driftverhalten ist von Sensor zu Sensor unterschiedlich und kann in entgegengesetzte Richtungen orientiert sein.

## 6.3 Überarbeitung der Hardware

### 6.3.1 Anpassungen der Sensorboards

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Anpassung der Hardware des Sensors an die zukünftigen Einsatzgebiete. Die vor Projektbeginn "offenen" Sensoren sind auf die mechanische Robustheit zu untersuchen und zu optimieren. Eine entsprechende Kapselungstechnologie (z.B. gegenüber Feuchtigkeit, Verschmutzung, Erschütterung beziehungsweise Stoß) ist zu entwickeln und mit Blick auf den Einfluss auf die Datenqualität zu untersuchen. Dies erfolgte in einem iterativen Prozess in mehreren Ausbaustufen. Dazu wurden die Sensorboards (siehe Abbildung 35) verkleinert, um die Integration in Gehäuse zu ermöglichen.





Abbildung 35: Anpassung der Sensorboards zur Integration in Gehäuse: Sensorboard "alt" mit Maßen von 30 x 35 mm (links) und Sensorboard "neu" mit Maßen von 20 x 25 mm (rechts)

### 6.3.2 Auswahl geeigneter Gehäuse zur Kapselung der Sensorik

In Abschnitt 6.2 wurde die erreichbare Datenqualität untersucht. Um diese auch langzeitstabil und reproduzierbar zu erreichen, wurden im Rahmen des Projektes die Möglichkeiten zur Integration der Sensoren in Gehäusen untersucht. Dazu wurden verschiedene Gehäusetypen recherchiert und die Integrationsvarianten geprüft. Im Projekt wurden auf Grund der Priorisierung der Performance nur hermetische Packages und Aluminiumgehäuse für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. In Abbildung 36 sind die beiden Gehäusevarianten dargestellt. Ein prinzipieller Vergleich zwischen hermetischen Package und Aluminiumgehäuse gibt Tabelle 6.

Die Integration der Sensorboards in das hermetische Gehäuse ist in den Abbildung 37 bis Abbildung 39 genauer beschrieben.



Hermetisches Hybridgehäuse



Aluminiumgehäuse

Abbildung 36: Mögliche Gehäusevarianten: hermetisches Gehäuse wie von Electrovac [B27] oder Technotron (links) und Aluminiumgehäuse mit Schutzklasse besser oder gleich IP66 von Bopla [B28] und Rolec (rechts)

Auswahlkriterien	Hermetisches Package	Aluminiumgehäuse
Dichtheit (Schutzart)	++	+
Robustheit (Art des Einsatzes oder der Applikation)	++	+
Handling (Design, Fertigung, Zugänglichkeit)	-	++
Temperaturverhalten (Materialanforderung)	++	+
Kosten, Flexibilität (Wirtschaftlichkeit)		++

Tabelle 6: Vergleich hermetisches Package und Aluminiumpackage bezüglich verschiedener Auswahlkriterien

Die Befestigung der Sensoren am Gehäusedeckel erfolgte über eine Punktklebung an der Unterseite des Sensorboards (siehe Abbildung 39). Die sechs Sensorkontakte wurden über die Kontaktstifte einer Deckelseite an die Außenseite geführt. Die Kontaktstifte sind elektrisch vom Gehäuse getrennt. Das hermetische Package besteht aus Kovar, einer Legierung mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Mit einem typischen Wärmeausdehnungskoeffizienten von 5 ppm/K ist das Kovarmaterial gut für den geplanten Einsatz geeignet. Im Vergleich zu normalem Baustahl ist der Temperatureinfluss auf die Dehnungen um den Faktor 2,4 geringer.

Die Integration der Sensorboards in Aluminiumgehäuse wurde durch Einschrauben der Boards auf einer in das Gehäuse integrierten Grundplatte durchgeführt und ist in Abbildung 40 dargestellt.



Abbildung 37: Eingesetztes, hermetisches Package TH\_343\_130\_010\_00 von Technotron (Zeichnung nicht maßstäblich, Maße in mm)



Abbildung 38: Eingesetzter Deckel TB\_3333\_012\_020\_00 von Technotron einschließlich elektrischer Kontaktierung der Sensorboards (Zeichnung nicht maßstäblich, Maße in mm)



Abbildung 39: Integrationsstufen zur hermetischen Kapselung der Sensorboards (links: Deckel, Mitte: Deckel einschließlich Sensorboard, rechts: abgeschlossenes Gehäuse)





Abbildung 40: Varianten der eingesetzten Aluminiumgehäuse: Gehäuse von Bopla einschließlich Controlboard von First Sensor (links), kleineres Gehäuse von Rolec mit zwei integrierten Sensorboards (rechts); jeweils Darstellung ohne elektrische Kontaktierung Da es bei den Untersuchungen keine Unterschiede bezüglich der Art und Größe der Aluminiumgehäuse gab, wird im Folgenden nicht zwischen den beiden Varianten unterschieden, sondern diese werden nur als Aluminiumgehäuse bezeichnet.

Für die Einhausung der Sensorik mit Aluminiumgehäusen standen zwei verschiedene Gehäuse zur Verfügung: ein größeres Gehäuse von Bopla, welches die Integration eines Controlboards von First Sensor erlaubt, und ein kleineres Gehäuse, welches lediglich Platz für zwei Sensoren bietet. Da im vorliegenden Projekt ein Messsystem entwickelt wurde, das die Sensoren selbst konfigurieren und abfragen kann, wurde an dieser Stelle die zweite Variante für weitere Untersuchungen ausgewählt. Im Vergleich zum hermetischen Gehäuse ist das Aluminiumpackage deutlich größer. Der Unterschied besteht neben dem Material und der Größe vor allem in der Anzahl der integrierbaren Sensoren.

#### 6.3.3 Untersuchung der erreichbaren Datenqualität der gehausten Sensoren

Im zweiten Abschnitt des Projektes von Juli 2016 bis November 2017 wurden die Arbeiten zu den technischen Fragestellungen bezüglich der erreichbaren Datenqualität der Sensorik fortgesetzt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei auf den beiden Integrationsvarianten. Die Tests zu den gehausten Systemen wurden dabei analog zur Herangehensweise der "offenen" Sensoren durchgeführt (siehe Abschnitt 6.2).

Zur Bewertung der Stabilität des Ausgangssignales wurde wiederum ein HTOL (siehe Abschnitt 6.2.4) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten nach der Integration der Sensorboards in Aluminiumgehäuse. Wie in Abbildung 41 dargestellt, wurden dafür 12 Sensoren genutzt und dabei eine maximale Drift des Bias von zirka ±50 m° bestimmt. Die Ergebnisse sind damit vergleichbar zu den Tests ohne entsprechende Hausung der Sensoren. Da beim Aluminiumgehäuse kein hermetischer Verschluss der Sensoren möglich ist, lässt sich daraus schlussfolgern, dass hier gleiche Alterungseffekte beziehungsweise Umwelteinflüsse auftreten wie im ungehausten Zustand. Die Untersuchungen zu den hermetischen Gehäusen konnten aus Zeitgründen nicht im Labor durchgeführt werden, sondern werden bei den Messungen am Referenzobjekt Kirchturm in Freyburg (siehe Abschnitt 11.3) bewertet.

In Abbildung 41 lässt sich, wie schon für die ungehausten Sensoren in Abbildung 34 (siehe Abschnitt 6.2.4), erkennen, dass der Sensordrift nicht einheitlich für verschiedenen Sensoren ist, sondern sensorspezifisch. Es treten sowohl entgegengesetzte Richtungen auf als auch Drifts in unterschiedlicher Größe. Teilweise sind nur geringe zeitabhängige Abweichung des Bias zu beobachten, teilweise treten jedoch in beiden Richtungen Driften von bis zu 50 m° auf. Dieses zeitabhängige Verhalten muss bei der Auswertung von Langzeitmessungen berücksichtigt werden. Dazu sind geeignete Modelle zu finden, die das Driftverhalten abbilden. Aufgrund der dargestellten Testergebnisse des HTOL kann ein lineares Driften der Sensorik angenommen werden. Diese Annahme ist durch die an den Referenzobjekten gesammelten Messdaten zu verifizieren.

Analog zur Bewertung der Sensoren im ungehausten Zustand wurden die Systeme über Temperatur- und Messbereich getestet, um die Kalibrierung für den Einsatz an den Referenzobjekten durchzuführen. Die Kalibrierparameter bezüglich Skalierungsfaktor und Bias wurden dem Projektpartner übergeben. Wie in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt, weisen die Sensoren unabhängig von der Integrationsvariante Temperaturabhängigkeiten auf. Der Temperaturkoeffizient des Bias (siehe Abbildung 43) ist dabei ebenfalls linear, aber betragsmäßig größer als bei den ungehausten Sensoren. Der Temperaturkoeffizient des Skalierungsfaktors (siehe Abbildung 42) der Sensoren, welche in einem Aluminiumgehäuse integriert wurden, ist ebenfalls linear. Bei den hermetisch gehausten Sensoren gibt es jedoch signifikante Abweichungen von einer Geraden, was eine effektive Temperaturkompensation erschwert. Genauere Untersuchungen zur Ursache konnten jedoch im Rahmen des Projektes nicht mit statistischer Sicherheit durchgeführt werden. Da die hermetische Hausung von Sensoren jedoch als langzeitstabiler betrachtet wird, sollten hier noch weitere Tests folgen.



Abbildung 41: Bias Drift über die Lebensdauer während eines HTOL-Tests (Durchführung mittels Integration der Sensorboards in ein Aluminiumgehäuse)



Abbildung 42: Änderung des Skale-Faktors  $K_1$  in Abhängigkeit der Temperatur und des eingesetzten Gehäusematerials



Abbildung 43: Änderung des Bias  $K_0$  in Abhängigkeit der Temperatur und des eingesetzten Gehäusematerials

## 6.3.4 Zweiachsige Abtastung des Sensors

Die Filterarchitektur des ASSPs (anwendungsspezifischer Schaltkreis) hat eine Verzögerung (Delay), so dass die beiden orthogonalen Achsen des Sensorelementes nicht parallel beziehungsweise gleichzeitig ausgelesen werden können. Es muss daher ein Umschalten zwischen den Achsen erfolgen. Im Rahmen des Projektes wurde die Delay der Sensoren untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Delay von den jeweiligen Filtereinstellungen abhängig ist. Der Decimation Filter (siehe Abschnitt 6.1) besteht aus drei Stufen, wovon zwei Stufen deaktiviert werden können. Der Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhalten ist zu untersuchen. Die Auswahl der Filterstufen erfolgt über das Register "DOS". Nachfolgend sind die drei Möglichkeiten aufgelistet:

- Register Value = "0": Standard-Filter-Einstellung (Voreinstellung), alle Stufen sind aktiv
- Register Value = "1": Droop Correction Filter (DCF) deaktiviert
- Register Value = "2": Half Band Filter (HBF) deaktiviert.

Zur Bewertung des Einflusses der Filtereinstellungen bezüglich der Delay wurden die Daten mit dem Control-Board abgefragt und mit einem Logic Analyzer ausgelesen, da die Übertragungsrate des Control-Boards via USB limitiert ist. Die Ergebnisse bei verschiedenen Filtereinstellungen sind in Abbildung 44 dargestellt.

Aus den Messungen ergibt sich durch das Abschalten von Filterstufen eine minimale Delay von ca. 4 ms und eine maximal erreichbare Bandbreite von 250 Hz, was bei Untersuchungen an Bauwerken ausreichend ist. Durch die Verringerung des Filter Decimation Faktors wird das Rauschen des Sensorsignales erwartungsgemäß größer. Da beim Monitoring von Bauwerken Frequenzen kleiner als 10 Hz und Änderungen von Neigungen statische Vorgänge sind, lässt sich das Ausgangssignal entsprechend mitteln, um die Auflösung zu verbessern. Eine zweiachsige Messung an den Bauwerken ist damit gegeben. Der wesentliche Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass die beiden Sensorachsen lithografisch um 90° gedreht und damit ideal auf einem Siliziumchip ausgerichtet sind sowie keine Ausrichtungsfehler (Alignment Error) zwischen den einzelnen Achsen des Sensors auftreten.



Abbildung 44: Einfluss der Filtereinstellungen des ASICs auf die Verzögerung (Delay) beim Umschalten zwischen beiden Sensorachsen

#### 6.3.5 On-Chip Temperaturkompensation

Der anwendungsspezifische Schaltkreis (ASSP) bietet die Möglichkeit eine on-Chip Temperaturkompensation auf Basis eines Polynoms zweiten Grades durchzuführen. Bezüglich Sensoren, bei denen keine Temperaturkompensation durchgeführt wird, ist der zu erwartende Fehler über Temperatur bei einem Messbereich von ±30° und im Temperaturbereich von -15 °C bis 65 °C in Abbildung 45 dargestellt. Wird eine Temperaturkompensation angewendet, sind die Fehler zwischen den einzelnen Kennlinien bei verschiedenen Temperaturstufen wesentlich geringer (siehe Abbildung 46). Der Restfehler ist für die präzisen Messungen von kleinsten Neigungsänderungen jedoch zu groß, da die Nichtlinearität des Ausgangssignales dominiert. Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Linearität beziehungsweise zur Anpassung an die Applikation Bauwerksmonitoring wurde bereits in Abschnitt 6.2.2 diskutiert. Die Kompensation der Nichtlinearität des Ausgangssignales lässt sich auf die nichtlineare Kapazitätskennlinie der Sensorelemente zurückführen. Diese sich auf Grund lässt des physikalischen Zusammenhanges durch geeignete Kompensationsverfahren minimieren, welche jedoch nicht im ASSP implementiert sind.

#### 6.3.6 Weiterführende Ansätze zur Bias-Stabilität

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zur Langzeitstabilität des Ausgangssignales der Sensoren zeigen, ist bei dem Drift des Bias der größte Einfluss zu erwarten. Insbesondere Abbildung 41 zeigt einen zufälligen Drift des Bias. Wenn die Sensoren als Sensorarray ausgewertet werden, lässt sich dadurch eine Mittelung der Abweichungen erzielen, wodurch die Langzeitstabilität des Ausgangssignales verbessert werden kann. In Abbildung 46 ist der Bias Drift während eines HTOL-Tests dargestellt. Die Sensorsignale wurden dabei als Sensorarray, bestehend aus vier Sensoren, ausgewertet. Erwartungsgemäß wird dadurch eine Verbesserung um den Faktor 2 erreicht.



Abbildung 45: Fehler des Ausgangssignals in Abhängigkeit der Temperatur und über Messbereich – ohne Temperaturkompensation



Abbildung 46: Fehler des Ausgangssignals in Abhängigkeit der Temperatur und über Messbereich – bei Anwendung der on-Chip Temperaturkompensation

Wie ebenfalls in Abbildung 46 dargestellt, weist der Drift der Sensoren einen linearen Zusammenhang zur Alterung auf. Es ist daher denkbar, dass die Sensoren im Rahmen eines Burn-In-Tests [36] charakterisiert und gezielt entsprechend ihres Driftverhaltens miteinander kombiniert werden können. Dies wurde im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt, gilt jedoch als Ansatz zur weiteren Minimierung des Bias Drift und damit zur weiteren Verbesserung der Langzeitstabilität.



Abbildung 47: Bias Drift über die Lebensdauer während eines HTOL-Tests (Durchführung mittels Integration der Sensorboards in ein Aluminiumgehäuse), Sensorsignalverarbeitung mittels Sensorarray

Ein weiterer Ansatz zur Minimierung von Driftfehlern des Bias besteht in der Nutzung des Prinzips der Umschlagsmessung. Die Umschlagsmessung wird bei der Ermittlung der Nullpunktabweichung von Neigungsmessgeräten eingesetzt [37]. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass Einflüsse wie Temperaturänderungen oder Drift eliminiert werden. Das Prinzip wurde mittels Labormessung und der Verwendung des horizontalen Turn-Tables des Motion-Simulators getestet. Dabei wurden Messwerte im Temperaturbereich von -15 °C bis 65 °C erfasst. Da die Neigung des Motion-Simulators und dessen Turn-Table dabei nicht verändert wird, ist der Erwartungswert 0°. Im Diagramm der Abbildung 48 sind die Ergebnisse des Tests dargestellt:

- Die orange Kennlinie zeigt das Ausgangssignal eines unkompensierten Sensors. Die Abweichungen der gemessenen Neigung reduzieren sich dabei auf die Temperaturabhängigkeit des Bias  $K_0$ . In der Messung wird eine scheinbare Änderung des Neigungswinkels von ±340 m° über den gesamten Temperaturbereich bestimmt.
- Die grüne Kennlinie zeigt das Ausgangssignal eines temperaturkompensierten Sensors. Der Effekt der Temperaturabhängigkeit des Bias K<sub>0</sub> wird dadurch signifikant verringert. Die Abweichungen des Sensors über den genutzten Temperaturbereich von -15 °C bis 65 °C betragen dabei 15 m° RMS und ca. ±40 m° als maximale Abweichung.
- Die blaue Kennlinie zeigt dabei das Ausgangssignal unter Nutzung der Umschlagsmessung (UP). Die Abweichungen betragen dabei 1,4m° RMS und ca. ±3,5 m° als maximalen Fehler. Unter Berücksichtigung des angegebenen Wobbles (Abweichung von idealem Rundlauf) des Turn-Tables (< 3 m° maximal) wird der Erwartungswert von 0° bestätigt.</li>



Abbildung 48: Vergleich der Änderung des Bias *K*<sub>0</sub> in Abhängigkeit der Temperatur (orange) mit der Messung der Nullpunktabweichung des Messgerätes nach dem Prinzip der Umschlagsmessung UP (blau)

Zusammenfassend besteht die Möglichkeit, die Umschlagsmessung auch in ein entsprechendes Gehäuse zu integrieren. Dafür sind jedoch grundlegende Untersuchungen zur Integration von Aktoren notwendig. Insbesondere ist dabei ein exaktes Verdrehen um 180° und zurück zur Ausgangsstellung notwendig. Diese Zustellgenauigkeit ist für die gesamte Lebensdauer beziehungsweise über die Wartungsintervalle und insbesondere auch unter Temperaturänderungen, welche wiederum zusätzliche Dehnungen und Stauchungen des Materials zur Folge haben, zu gewährleisten. Weiterhin ist eine gesonderte Stromzufuhr für die Aktoren vorzuhalten und die Aktorik ist vor Verschmutzung zu schützen. Die Aktorik ist daher gemeinsam mit dem Sensor in ein Gehäuse zu integrieren. Schmierstoffe sind speziell auszuwählen, um das einwandfreie Funktionieren des Verdrehmechanismus zu gewährleisten und um ein Verhaken der Mechanik zu verhindern.

Die Entwicklung einer Aktorik und die Zusammenführung mit der Sensorik in einem geeigneten Gehäuse waren im Rahmen des Projektes nicht möglich. Die Entwicklung eines solchen Systems erfordert einen großen Entwicklungsaufwand. Am Markt gibt es bereits einen Neigungssensor, der das Prinzip der Umschlagsmessung nutzt. Dieser kostet jedoch mehrere Tausend Euro und wird hauptsächlich zur Überwachung großer Infrastrukturbauwerke verwendet.

Die Entwicklung eines Konkurrenzproduktes war nicht Ziel dieses Projektes, sondern die Entwicklung eines kostengünstigen Messsystems auf Basis von MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern, um eine Anwendung an konventionellen Bauwerken zu ermöglichen. Die Kosten der MEMS-Neigungssensoren betragen zirka 100 € bei einer Massenproduktion. Damit sind deutlich günstigere Messsysteme möglich, die eine gewisse Unschärfe in der Messung beinhalten. Die sinnvolle Anwendung solcher Sensoren wird in diesem Projekt untersucht.

## 6.4 Fazit und Ausblick zur eingesetzten Sensorhardware

Im Rahmen des Projektes wurden die von First Sensor zu Verfügung gestellten Sensoren bis in den Grenzbereich und darüber hinaus betrieben und untersucht. Die statischen Ergebnisse bezüglich Auflösung und Rauschen sind im Vergleich zum internationalen Wettbewerb als äußert positiv zu bewerten. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt bestand in der Bewertung der Stabilität des Ausgangssignales über den zu erwartenden Mess- und Temperaturbereich sowie in Untersuchungen bezüglich der Langzeitstabilität. Zusammenfassend konnte dabei festgestellt werden, dass der Drift des Bias beziehungsweise die Temperaturabhängigkeit des Bias signifikant zum Gesamtfehler des Sensors beitragen und eine Absolutmessung der am Bauwerk auftretenden relativen Neigungsänderungen über längere Zeiträume als sehr herausfordernd zu bezeichnen ist. Des Weiteren wurden Ansätze zur Verbesserung der Langzeitstabilität untersucht und dargestellt. Ohne weitere detailliertere Material- und Komponentenoptimierungen beziehungsweise ohne den Einsatz alternativer Methoden zur inrun Bias Kompensation wird die Gesamtgenauigkeit der eingesetzten Sensoren nicht besser als ca.  $\pm 50$  m<sup>°</sup> sein.

Für den Einsatz am Bauwerk, bei dem Verdrehungen im Bereich weniger Milligrad über einen langen Zeitraum sicher zu detektieren sind, ist der Drift zur Zeit noch zu groß. Weitere Untersuchungen und Anpassungen sind notwendig.

Die Ursache des Drifts konnte abschließend noch nicht eindeutig geklärt werden. Der Drift ist sehr wahrscheinlich auf Alterungseffekte aller nicht einkristallinen Materialien zurückzuführen, das heißt, dass das Sensorelement (Siliziumchip) selbst keinen Anteil am Drift hat, da einkristallines Silizium als quasi ermüdungsfrei betrachtet wird. Um den Drift weiter zu minimieren, ist dabei die Frage zu klären, welche Komponenten innerhalb des Sensors den größten Einfluss haben. So könnten gegebenenfalls die Alterungseffekte des Klebers, mit dem der Siliziumchip mechanisch angekoppelt ist, zu Lageänderungen innerhalb des Sensors führen. Des Weiteren könnten Alterungseffekte der Elektronik im ASIC, der für die Signalverarbeitung zuständig ist, unter anderem in Form von Leckströmen und Übergangswiderständen der analogen und digitalen Blöcke auftreten. Das Package der Sensoren sollte hermetisch dicht sein, so dass das eingeschlossene Mikroklima konstant ist und nicht von Ablagerungen an den Drahtbonds (Verbindungen zwischen Sensorelement und ASIC sowie vom ASIC zum Package) auszugehen ist. Möglicherweise gibt es dennoch Ausgasungen aus den verwendeten Klebern, die sich auf die beiden Chips sowie deren Kontaktierung auswirken und zum Beispiel veränderliche Kapazitäten durch Ablagerungen an den Drahtbonds verursachen.

Über die Spannungsversorgungsanschlüsse des ASIC fließt Strom, so dass möglicherweise Elektromigration eine Rolle spielt. Ebenfalls kann das verwendete Leiterplattenmaterial zu signifikanten Änderungen führen. Leiterplatten aus Standard FR4 Material können durchaus Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben oder die gelöteten Kontakte vom Sensor zur Leiterplatte altern.

Weitere Untersuchungen zur Ursache des Drifts und der Minimierung des zeitabhängigen Drifts sowie die Möglichkeit einer geeigneten Kompensation des Drifts sind weiterhin durchzuführen, um die Langzeitstabilität zu erhöhen und die an Bauwerken auftretenden Neigungen mit hoher Genauigkeit zu erfassen.

# 7 Identifikation kritischer Lastzustände

Im folgenden Abschnitt wird eine Methodik zur Bewertung der Messqualität verschiedener Sensoranordnungen vorgestellt, die auf der Identifikation von mechanischen Zielgrößen, wie Biegemomenten, Spannungen und Durchbiegungen aus leicht messbaren Verformungsgrößen basiert. Dabei kann mithilfe der Zielgrößen das Erreichen eines kritischen Zustandes beschrieben werden. Die Definition eines Qualitätsmaßes berücksichtigt dabei die Unsicherheit in den auftretenden Lasten. Unterschiedliche Sensoranordnungen werden an zwei statischen Systemen untersucht.

Die Methodik wurde allgemein für die Identifikation von Zielgrößen aus messbaren Verformungen aufgestellt und kann daher für verschiedene Messgrößen verwendet werden. Im vorliegenden Fall sollen aber Neigungsmessungen betrachtet werden, anhand derer Zielgrößen des Tragwerks identifiziert werden. Diese Zielgrößen können dabei wiederum verschiedene Beanspruchungen, wie beispielsweise Durchbiegungen, Schnittgrößen oder Spannungen sein, wobei für den vorliegenden Fall Biegemomente als Zielgröße verwendet werden.

Die nachfolgend beschriebene Methodik zur Identifikation kritischer Lastzustände wurde innerhalb des Projektzeitraumes entwickelt und als Fachartikel veröffentlicht [38].

## 7.1 Überblick

In den vergangenen Jahren sind extreme Wetterbedingungen immer häufiger zu beobachten, wodurch die bestehenden, alternden Tragwerke möglicherweise größeren Belastungen ausgesetzt sind, als jene, für die sie ursprünglich ausgelegt wurden. Dies wird auch in den angepassten Normen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.1). Bei einer Tragwerksüberwachung werden typischerweise Verformungen des Tragwerks gemessen. Jedoch sind diese gemessenen Größen nicht die Größen, anhand derer die statische Beurteilung stattfindet. Beispielsweise können Neigungen erfasst werden, aber zur Beurteilung des baulichen Zustands und der Standsicherheit werden Zielgrößen, wie Spannungen, Durchbiegungen oder Rissweiten, benötigt. Nachfolgend wird daher zwischen Messgrößen und Zielgrößen unterschieden.

Lokale Rotationen an einer lastbeanspruchten Struktur können mittels Neigungssensoren messtechnisch erfasst werden. Unter der Annahme, dass das mechanische Verhalten einer Struktur bekannt ist, können aus den gemessenen Neigungen die gewünschten Zielgrößen berechnet werden. Dieses Vorgehen führt auf ein Identifikationsproblem, wobei Biegemomente, Durchbiegungen oder Spannungen aus messbaren Verformungen zu ermitteln sind. Bei der Ermittlung der Zielgrößen hat insbesondere die Belastung und die Unsicherheit der tatsächlichen Belastungsform und -stellung eine entscheidende Rolle. Sowohl Unsicherheiten in der Größe der Last als auch Unsicherheit in der Verteilung der Lasten führen zu einer Unsicherheit in den identifizierten Zielgrößen. Nachfolgend wird gezeigt, wie mithilfe dieser Unsicherheit die Eignung verschiedener Messsysteme (Setup) zur Ermittlung kritischer Lastzustände auf Basis eines Qualitätsmaßes festgestellt werden kann. Dieses Qualitätsmaß berücksichtigt dabei die Unsicherheit in der identifizierten Zielgröße.

## 7.2 Ermittlung kritischer Lastzustände aus Verformungsmessungen

In Abschnitt 4.3.3 wurde gezeigt, dass für einen Einfeldträger unter einer Gleichlast aus einer einzelnen Auflagerneigung am linear-elastischen System und unter Kenntnis über das mechanische Verhalten des schubstarren Trägers die Zielgrößen Biegemoment und Spannung ermittelt werden können. Dabei ist die Verteilung der Last bekannt. In praktischen Anwendungen bei der Langzeitüberwachung sind in der Regel die tatsächlichen Lasten beziehungsweise deren Lastverteilung nicht bekannt und die Beanspruchung des Tragwerks muss aus den gemessenen Größen ermittelt werden. Die Lastverteilung hat jedoch einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Beanspruchung des Tragwerks.

Der Einfluss der Unsicherheit in der Belastung wird an einem Einfeldträger dargestellt, der durch vier Einzellasten beansprucht wird. Das statische System und die Verteilung der Lasten sowie Momenten- und Neigungsverlauf sind in Abbildung 49 gezeigt. In einem Referenzlastfall sind die vier Punktlasten gleich groß, so dass sich in Trägermitte das Biegemoment  $M_c$  ergibt. Die Auflagerverdrehungen  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  sind unter dieser symmetrischen Belastung gleich groß. In Tabelle 7 sind weitere Lastkombinationen gegeben, welche identische Auflagerverdrehungen erzeugen wie die Referenzbelastung, aber infolge unterschiedlicher Lastanordnung unterschiedliche Biegemomente hervorrufen. Es gilt die Einschränkung auf positive Lastmagnituden. Es ist zu erkennen, dass das resultierende Biegemoment in Trägermitte  $M_c$ zwischen den einzelnen Lastkombinationen variiert. Dabei ist das kleinste Biegemoment  $M_{C,Min}$  um zirka 21% geringer und das maximale ermittelte Biegemoment  $M_{C,Max}$  um zirka 18% größer als das Referenzbiegemoment  $M_{C,ref}$ .



Abbildung 49: Einfeldträger mit 4 Punktlasten sowie Verlauf von Biegemoment und Neigung

Tabelle 7:Auswirkung verschiedener Lastkombinationen auf das Biegemoment  $M_c$  des<br/>Trägers. (Alle Kombinationen haben identische Auflagerverdrehungen;<br/> $F_i/F_{ref} = [-]; M_i/M_{C,ref} = [-])$ 

$F_1/F_{ref}$	$F_2/F_{ref}$	$F_3/F_{ref}$	$F_4/F_{ref}$	$M_C/M_{C,ref}$	Anmerkung
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	$M_C = F_{ref}L/2$
0,780	1,103	1,103	0,780	1,022	beliebige Laststellung
2,023	0,523	0,523	2,023	0,898	beliebige Laststellung
0	2,200	2,200	0	1,179	M <sub>C,Max</sub>
3,145	0	0	3,145	0,786	M <sub>C,Min</sub>

Dieses Beispiel zeigt, wie die Unsicherheit in der Belastung zu einer Unsicherheit in der identifizierten Zielgröße führt. Hierbei ist zu beachten, dass zwei gemessenen Auflagerneigungen vier unbekannte Lasten gegenüberstehen. Mit einem Messsystem, welches eine den unbekannten Lastgrößen identische Anzahl an lokalen Neigungsmessungen integriert, entfallen diese Unsicherheiten. Ziel ist jedoch die Entwicklung eines Konzeptes zur Beurteilung der Eignung verschiedener Sensorsetups zur Ermittlung kritischer Lastzustände unter Berücksichtigung der Unsicherheit in den Lasten bei limitierter Anzahl an Sensoren.

Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass ein Messsystem an ein Alarmsystem gekoppelt ist, welches zuverlässig Überbelastungen des Tragwerks erkennen soll. Dazu ist die Definition eines Grenzwertes erforderlich, bei der ein Alarm auszulösen ist. Dieser Grenzwert kann durch den Grenzzustand der Tragfähigkeit oder den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gegeben sein und wird durch die Eurocodes definiert. Als kritische Größen können je nach Grenzzustand Verformungen, Spannungen oder Schnittgrößen an der maßgebenden Stelle im Tragwerk festgelegt werden. Dieser Grenzwert kann gegebenenfalls weiterhin durch Sicherheitsfaktoren abgemindert sein. Als Grenzwert der Zielgröße *T* wird  $T_{crit}$  festgelegt.

## 7.3 Interpretation möglicher Lastzustände und entwickelte Methodik

Ein Identifikationsprozess verknüpft die Messgrößen M und die Zielgrößen T. Um das mechanische Verhalten in diesem Prozess abzubilden, muss das statische System bekannt sein. Wenn sowohl die Größe der Last als auch deren Verteilung bekannt ist, dann gibt es zu jeder Messgröße eine zugehörige Zielgröße. Unter Berücksichtigung der Lastunsicherheiten ist der Identifikationsprozess nicht länger eindeutig, d.h. eine Messgröße kann nicht länger zu einer einzelnen Zielgröße zugeordnet werden. Es ergibt sich ein Zielgrößenbereich, der durch einen kleinstmöglichen Wert  $T^{min}$  und einen größtmöglichen Wert  $T^{max}$  der Zielgröße bestimmt ist (siehe Abbildung 50). Basierend auf dem Zielgrößenbereich und einem festgelegten Grenzwert, bei dessen Überschreiten eine Überbelastung des Tragwerks eintritt, kann der Zustand des Tragwerks interpretiert werden. Wie in Abbildung 50 dargestellt, können drei mögliche Zustände – sicher, unsicher und möglicherweise unsicher – identifiziert werden, in Abhängigkeit davon, ob der Grenzwert  $T_{crit}$  größer als  $T^{max}$ , kleiner als  $T^{min}$  ist oder innerhalb der Bereichsgrenzen der Zielgröße liegt.



Abbildung 50: Verbindung von Mess- und Zielgrößen unter Berücksichtigung von Lastunsicherheiten und Interpretation des Tragwerkszustandes

Die entwickelte Methodik zur Identifikation kritischer Lastzustände und deren Annahmen sind nachfolgend zusammengefasst:

- (1) Das Messsystem soll verlässlich das Erreichen eines kritischen Zustandes detektieren. Dabei ist das Nichterkennen eines kritischen Zustandes nicht tolerierbar.
- (2) Ein kritischer Zustand wird durch eine interne mechanische Zielgröße  $T_{crit}$ , wie Spannung, Schnittgröße an einer bestimmten Stelle des Tragwerks, ausgedrückt.
- (3) Das Überwachungssystem basiert auf Sensoren, die Verformungsgrößen, wie lokale Neigungen, messen.
- (4) Es gilt die Annahme, dass das mechanische Verhalten bekannt ist. Unsicherheiten auf Seiten des Materials werden nicht berücksichtigt.
- (5) Weiterhin wird von einer idealen Messung der Verformungsgröße ausgegangen. Messunsicherheiten werden vorerst nicht berücksichtigt.
- (6) Die Lastunsicherheit wird durch eine Variabilität der Lastenverteilung berücksichtigt.
- (7) Auf Basis eines Analyse-Frameworks, das numerische Simulationen des mechanischen Verhaltens einer Struktur integriert, und mathematischer Optimierung werden Antwortflächen berechnet, die Kombinationen von Messgrößen mit dem Zielgrößenbereich, definiert durch  $T^{min}$  und  $T^{max}$ , verknüpfen.
- (8) Die Antwortflächen sind dann im Zusammenhang mit der Erkennung kritischer Zustände zu interpretieren. Kombinationen von Messwerten, für die  $T^{max}$  kleiner als  $T_{crit}$  ist, beschreiben einen sicheren Zustand, wohingegen für Kombinationen, bei denen  $T^{min}$  größer als  $T_{crit}$  ist, der Tragwerkszustand als unsicher betrachtet werden muss.
- (9) Der Fokus liegt dabei auf der Region, für den die kritische Zielgröße im Bereich zwischen minimal und maximal möglicher Zielgröße T<sup>min</sup> und T<sup>max</sup> liegt. Die Unsicherheit der Belastung führt hier zu einer Unsicherheit in der Interpretation des Tragwerkszustandes. Der Zustand ist möglicherweise sicher, möglicherweise unsicher und somit nicht eindeutig bestimmbar.
- (10) Zur Bewertung der Eignung eines Überwachungssystems wird die minimal mögliche Zielgröße T<sup>min</sup> innerhalb der Kernregion verwendet. Dieser Wert im Verhältnis zur kritischen Zielgröße eignet sich, um die Identifikationswahrscheinlichkeit eines Überwachungssystems zu charakterisieren, da durch T<sup>min</sup> der kleinstmögliche Beanspruchungszustand ausgedrückt ist, bei dem die Struktur bereits einen kritischen Zustand erreicht haben kann (möglicherweise unsicher) und ein Alarm im Sinne von Punkt (1) auszulösen ist.
- (11) Für den Vergleich verschiedener Überwachungssysteme (Sensorsetups) gilt: Je eher ein Messsystem das Tragwerk, das bei einer steigenden Last einem kritischen Zustand immer näher kommt, als unsicher klassifizieren muss, desto geringer die Qualität des Messsetups.

Die Methodik soll zur Bewertung der Qualität verschiedener Sensoranordnungen herangezogen werden. Mithilfe des Analyse-Frameworks wird eine Zielgröße basierend auf einer beliebigen Menge an Messgrößen berechnet. Unter Verwendung mathematischer Optimierung werden der minimale und maximale Wert der Zielgröße  $T^{min}$  und  $T^{max}$  bestimmt. Der folgende Abschnitt beschreibt die Ermittlung von Antwortflächen und die Bestimmung eines Qualitätskriteriums, wie in den Punkten (8) und (9) beschrieben.

#### 7.4 Antwortflächen und Definition eines Qualitätsmaßes

#### 7.4.1 Bestimmung einer Kernfläche

Die Bestimmung der Antwortflächen wird beispielhaft für den in Abbildung 49 dargestellten Einfeldträger, welcher durch vier Einzellasten beansprucht wird, aufgezeigt. Die gemessenen

Größen sind die Neigungen des Trägers  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  an den beiden Auflagern. Als Zielgröße wird das maximale Biegemoment festgelegt, das an jeder Position entlang des Balkens auftreten kann. Hier sei bemerkt, dass auch jede andere Größe, die den Zustand des Tragwerks beschreibt, verwendet werden kann, wie zum Beispiel Spannungen oder Durchbiegungen an einer bestimmten Position. Wie in Abschnitt 7.1 gezeigt, kann ein Paar an Auflagerneigungen durch unterschiedliche Lastmuster erzeugt werden. Die Unsicherheit in der Lastverteilung führt dabei zu einem möglichen Bereich des Biegemoments, welcher hier durch  $M^{min}$  und  $M^{max}$ beschrieben wird. Die beiden Extremwerte werden auf Basis einer gegebenen Kombination an Auflagerverdrehungen ( $\varphi_1, \varphi_2$ ) berechnet. Durch die Berechnung einer Vielzahl an Kombinationen erhält man Antwortflächen des entsprechenden minimalen oder maximalen Biegemoments *M<sup>min</sup>* und *M<sup>max</sup>*. In Abbildung 51 sind Antwortflächen der beiden Extrema in Relation zum kritischen Biegemoment M<sub>crit</sub> gezeigt. Die durch Variation der Lasten ermittelten Biegemomente unterliegen Beschränkungen der Lasten. Es werden nur positive Lasten (minimale Last  $F_i \ge 0$ ) zugelassen und die maximal aufgebrachte Last darf die Last eines Referenzscenarios (gleichgroße Lasten) nicht um das 2,5-fache überschreiten. Aufgrund der Einschränkung der Lasten durch einen oberen und unteren Grenzwert ist auch der Lösungsraum begrenzt. Dieser Bereich ist in Abbildung 51 mit D bezeichnet.



Abbildung 51: Antwortfläche für das minimale (links) und maximale (rechts) Biegemoment  $M^{min}$  und  $M^{max}$  in Relation zum kritischen Biegemoment  $M_{crit}$ 

Valide Lösungen ergeben sich für die Bereiche A, B und C. Dabei markiert B den unsicheren Tragwerkszustand, da das kleinstmögliche Biegemoment  $M^{min}$  das kritische Biegemoment überschreitet, wohingegen der Bereich C einen sicheren Zustand beschreibt, da das größtmögliche Biegemoment  $M^{max}$  nicht größer als das kritische Biegemoment wird. In Region A ist der Zustand als möglicherweise unsicher zu klassifizieren, weshalb im Sinne von Punkt (1) ein Alarm ausgelöst werden muss. Region A eignet sich daher, um verschiedene Sensoranordnungen zu vergleichen, da eine Bewertung dieser auf Basis, wie zeitig ein Alarm ausgelöst werden muss, stattfinden kann.

Durch die beiden Grenzlinien ( $M/M_{crit} = 1$ ), bei denen entweder das minimale Biegemoment oder das maximale Biegemoment dem kritischen Biegemoment entspricht, ist mit Region A eine Kernfläche definiert. Diese Kernfläche ist für die beiden Extrembiegemomente in Abbildung 52 gemeinsam mit den Schnitten E-E und F-F dargestellt. Die Antwortflächen verdeutlichen die von der Lastanordnung abhängige Verteilung der Zielgröße Biegemoment innerhalb der zu untersuchenden Region. Die zusätzlich dargestellten Schnitte zeigen die nichtlineare Verteilung und den veränderlichen Bereich der Zielgrößen *M* im Lösungsraum.


Abbildung 52: Antwortfläche der Kernfläche für das minimale und maximale Biegemoment  $M^{min}$  und  $M^{max}$  in Relation zum kritischen Biegemoment  $M_{crit}$  (oben) und sowie die Darstellung des Bereiches des Biegemomentes in den Schnitten E-E und F-F (unten)

#### 7.4.2 Definition eines Qualitätsmaßes

Um verschiedene Sensoranordnungen quantitativ in deren Fähigkeit, kritische Zustände verlässlich zu detektieren, vergleichen zu können, wird ein Qualitätsmaß benötigt. Dabei ist der Kernbereich zu betrachten, in dem möglicherweise unsichere Zustände auftreten. Je eher dieser Zustand eintritt, in dem gleichzeitig der Zustand aber auch noch sicher sein könnte, desto geringer sollte die Qualität sein. Die Qualität eines Überwachungssystems wird daher durch das Verhältnis von minimaler Zielgröße  $T^{min}$  innerhalb der Kernfläche zu kritischer Zielgröße  $T_{crit}$  definiert:

$$Q = \frac{T^{min}}{T_{crit}}.$$
(11)

Dabei nimmt die Qualität Q Werte zwischen 0 und 1 an. Werden Biegemomente als Zielgröße bei einem neigungsbasierten Überwachungssystem festgelegt, ergibt sich die Qualität entsprechend nach Gleichung (11) in Abhängigkeit von  $M^{min}$  und  $M_{crit}$ .

$$Q = \frac{M^{min}}{M_{crit}}.$$
(12)

Im Folgenden werden die aus den Messgrößen ermittelten Zielgrößen mit einer Referenzzielgröße verglichen, da gegebenenfalls Sicherheitskoeffizienten bei der Bemessung der Struktur beziehungsweise des Monitoringsystems berücksichtigt werden.

### 7.5 Berechnung der Zielgrößen

Der Identifikationsprozess von Zielgrößen aus gemessenen Verformungen basiert auf numerischen Simulationen des mechanischen Verhaltens und der mathematischen Optimierung zur Ermittlung der Antwortflächen. Hierbei wird physikalische sowie geometrische Linearität des Systems vorausgesetzt. Die numerische Analyse basiert auf einem Finite-Elemente-Ansatz, bei dem die Auflagerneigungen auf die Struktur eingeprägt werden, bevor die Zielgrößen berechnet werden. Mithilfe der mathematischen Optimierung können durch die Variation der Lastmuster die Extremwerte der gewünschten Zielgröße ermittelt werden. Die Lasten können dabei generell durch obere und untere Grenzwerte eingeschränkt werden, aber auch eine gegenseitige Beschränkung benachbarter Lasten ist möglich. Da Einschränkungen an die Variationsparameter (Lasten) bestehen, ergibt sich ein nichtlineares Optimierungsproblem mit Beschränkungen.

#### 7.5.1 Einfluss von Lastbeschränkungen

Die ermittelte Qualität eines Sensorsystems ist abhängig von den getroffenen Beschränkungen der Lasten. Durch die Festlegung von Unter- und Obergrenzen können sinnvolle Bereiche für die einzelnen Lasten beziehungsweise globale Lastbereiche berücksichtigt werden.

Der Einfluss der Lasteinschränkungen wird beispielhaft für den Einfeldträger aus Abbildung 49 dargestellt, für den die unteren Grenzwerte der Einzellasten variiert werden. Messgrößen sind die beiden Auflagerneigungen  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$ . Die ermittelten Antwortflächen sind in Abbildung 53 gezeigt. Durch die Beschränkung der Lasten ergibt sich eine Reduktion der Kernfläche. Unter Berücksichtigung der Definition der Qualität in Gleichung (12) ist ein Ansteigen der Qualität bei Beschränkung der möglichen Lasten zu beobachten. Das heißt, dass bei großer Unsicherheit über die Lastverteilungen geringe Qualitäten zu erwarten sind.



Abbildung 53: Antwortflächen des minimalen (oben) und maximalen Biegemomentes (unten) in Abhängigkeit eine Lastuntergrenze mit Darstellung der kleinst- und größtmöglichen Verhältnisse von Biegemoment zu Referenzbiegemoment

#### 7.5.2 Einfluss von Messunsicherheiten und Vergleich verschiedener Sensorsetups

Die bisherigen Ausführungen nehmen eine ideale Messung ohne Berücksichtigung von Messunsicherheiten an. In der Realität sind die Messungen jedoch imperfekt, das heißt, sie sind durch Rauschen oder die begrenzte Auflösung der Sensorik beeinflusst. Nachfolgend wird der komplexe Sachverhalt der Messunsicherheit vereinfacht betrachtet. Dabei wird eine sensorspezifische auflösbare Neigungsänderung  $\Delta \phi$  definiert, um die eine gemessene Neigung  $\phi$  größer oder kleiner sein kann.

Der Effekt der Messunsicherheit wird für den zuvor betrachteten Einfeldträger mit vier Punktlasten verdeutlicht. Dabei wird eine begrenzte Neigungsauflösung  $\Delta \varphi$  von 5 m° angenommen. Unter einer Referenzbeanspruchung (vier gleichgroße Lasten) ergeben sich Auflagerverdrehungen von 115 m°. Die begrenzte Neigungsauflösung entspricht daher 4,4 % der Auflagerneigung. In Abbildung 54 ist der Einfluss der Messabweichung  $\Delta \varphi = 5$  m° auf die Kernfläche dargestellt. Die Kernfläche des minimalen Biegemomentes ist darin für eine ideale Messung und eine imperfekte Messung gezeigt. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit ist eine Aufweitung der Kernfläche zu beobachten. Dabei kommt es auch zu einer Aufweitung des Bereichs der möglichen Biegemomente, welche bildlich als Anpassung der Grenzlinien  $M/M_{ref}$  von 1,0 auf Werte unter 1,0 zu übersetzen ist. Es gilt, je größer die Messunsicherheit, desto geringer das minimale Biegemoment, desto geringer die Qualität des Messsystems.



Abbildung 54: Vergleich zwischen idealer Messung (links) und imperfekter Messung (rechts) anhand der Kernfläche des minimalen Biegemomentes

Der Effekt der Messunsicherheit ist für verschiedene Sensoranordnungen unterschiedlich groß. Die ermittelte Qualität von Messsystemen auf Basis von einem oder zwei Neigungssensoren ist für eine ideale Messung und für Messunsicherheiten von 5 m° und 20 m° in Abbildung 55 dargestellt. Prinzipiell haben Messsysteme mit zwei Neigungssensoren eine höhere Qualität als Messsysteme mit nur einem Neigungssensor. Anhand der Zuordnung der Qualität zu den möglichen Sensoranordnungen kann die Eignung verschiedener Setups zur Detektion von kritischen Lastzuständen verglichen werden. Unter Betrachtung des minimalen Biegemomentes ergibt sich für das Sensorsystem mit Neigungsaufnehmern an den Knoten 3 und 4 die größte Qualität. An diesen Stellen sind die lokalen Verdrehungen deutlich geringer als an den Auflagern (1) und (6). Wird die Messunsicherheit berücksichtigt, sinkt die Qualität an dieser Stelle deutlich mehr als an Positionen, an denen große Neigungen auftreten. Aus Abbildung 55 ist ersichtlich, dass es bei Berücksichtigung großer Messunsicherheiten Sensoranordnungen gibt, mit denen eine höhere Qualität erzielt wird als für die Anordnung an Knoten 3 und 4.



Abbildung 55: Vergleich der Qualität verschiedener Sensoranordnungen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit  $\Delta \varphi$ 

### 7.6 Erweiterung der Methodik

Die vorgestellte Methodik kann für beliebige statische System angewendet werden. Die Effektivität der Methodik soll exemplarisch an einen Durchlaufträger aufgezeigt werden.

Ein Zwei-Feldträger wird mit je drei Punktlasten in den Viertelspunkten des Feldes belastet. Das statische System und die Knotendefinition sowie die Verläufe von Biegemoment und Neigung sind in Abbildung 56 dargestellt. Die Belastung erzeugt Biegemomente unterschiedlichen Vorzeichens. Die Referenzbiegemomente werden in einem Referenzszenario festgelegt, in dem alle Lasten gleich groß sind. Der Verlauf des Biegemoments unter der Referenzbelastung ist ebenfalls in Abbildung 56 dargestellt. Es ergibt sich ein maximales Biegemoment je Feld max  $M_{span}$  und ein Stützmoment  $M_{supp}$  am mittleren Auflager. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit in der Belastung ergeben sich entsprechend andere Biegemomente im Feld und am Auflager.



Abbildung 56: Zweifeldträger mit möglichen Sensorpositionen (1-9) und dem Verlauf des Biegemoments und der Neigung

Das Konzept basiert auf der Identifikation der Extremwerte der Zielgröße, wie zuvor dargestellt. Im Falle von mehreren Zielgrößen können die jeweiligen Qualitäten  $Q_i$  einzeln berechnet werden. Die Qualität des Messsystems  $Q_{sys}$  muss sich dann unter Berufung auf Punkt (1) aus der geringsten Qualität der einzelnen Zielgrößen nach Gleichung (13) ergeben.

$$Q_{sys} = MIN(Q_i) \tag{13}$$

Im Allgemeinen können innerhalb dieser Methodik auch unterschiedliche Zielgrößen verwendet werden, jedoch wird hier die Qualität eines Messsystems bezüglich der beiden Zielgrößen maximales Biegemoment im Feld  $M_{span}$  und am Zwischenauflager  $M_{supp}$  bestimmt. Bei der Variation der Lasten gilt, dass die Lasten das Dreifache der Referenzlast nicht überschreiten dürfen und nur positive Lastmagnituden zulässig sind. Es werden verschiedene Sensoranordnungen untersucht, die zwei Neigungssensoren integrieren. Die Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 57 dargestellt. Es wird deutlich, dass es Sensoranordnungen gibt, für die die Qualität  $Q_{sys}$  klar durch das Feldmoment (1,9) oder durch das Stützmoment (2,5) bestimmt ist. Für Setup (1,4) und (1,5) ergeben sich die beiden Qualitätsanteile in etwa gleich. Zusätzlich ist der Effekt der Messunsicherheit  $\Delta \varphi = 5$  m° dargestellt. Für die Sensoranordnungen (1,5), (2,5) und (3,7) hat die berücksichtigte Messunsicherheit den größten Einfluss.



Abbildung 57: Qualität verschiedener Sensoranordnungen bei Auswertung der maximalen Biegemomente in Feld  $M_{span}$  und am Zwischenauflager  $M_{supp}$ 

### 7.7 Fazit

Mit der vorgestellten Methodik können Senoranordnungen guantitativ in deren Fähigkeit zur Identifikation kritischer Lastzustände verglichen werden. Das Konzept eignet sich für Monitoringsysteme auf Basis von Neigungssensoren. Dabei können unterschiedliche Zielgrößen, wie Schnittgrößen, Durchbiegungen und Spannungen aus Neigungsmessungen, ermittelt werden, wenn das mechanische Verhalten der Struktur bekannt ist. Unsicherheiten in der Lastanordnung sind in der Methodik berücksichtigt. Die Methodik eignet sich sowohl für statisch bestimmte als auch für statisch unbestimmte Systeme. Bei der Bewertung der Sensorsetups können ebenfalls Messunsicherheiten über einen vereinfachten Ansatz berücksichtigt werden. Mit dieser Methodik wird eine Möglichkeit zum Vergleich verschiedener Sensoranordnungen gegeben, die auch eine Berücksichtigung verschiedener kritischer Zustände zulässt. Durch Anpassung der numerischen Verfahren ist es darüber hinaus möglich, nichtlineares Materialverhalten zu berücksichtigen. Auch mögliche Unsicherheiten in den Materialkenngrößen, wie beispielsweise dem Elastizitätsmodul können in den Berechnungsalgorithmus integriert werden.

# 8 Experimentelle Laborversuche zum Messsystem

Mithilfe experimenteller Untersuchungen sollen einzelne Sensoren exemplarisch bezüglich verschiedener Kennwerte wie Linearität, Genauigkeit und Rauschverhalten untersucht werden. Des Weiteren werden praktische Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung von Neigungen gesammelt sowie die Funktionsweise des Messsystems überprüft und validiert. Dabei werden Messdaten generiert, an denen unterschiedliche Methoden der Datenauswertung erprobt werden.

# 8.1 Einführung

Zur Überprüfung der Funktionsweise des Messsystems wurden Neigungsmessungen am Neigungstisch in der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Am Neigungstisch können mithilfe zweier Mikrometerschrauben Neigungen in zwei Achsen aufgebracht werden.



Abbildung 58: Neigungstisch mit Mikrometerschrauben und Winkellibelle

Zum Aufbringen von Neigungen am Neigungstisch ist zuerst an der Winkellibelle manuell die gewünschte Neigung auf einer Skala (optisch) einzustellen. Anschließend wird der Neigungstisch durch das Einspielen der an der Winkellibelle befindlichen Röhrenlibelle mithilfe der Mikrometerschrauben in die gewünschte Position gebracht.

Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass das Einstellen kleiner Neigungsänderungen (1 m°) am Neigungsmesser recht mühsam und nur relativ ungenau durchgeführt werden konnte. Zur Untersuchung der Genauigkeit des Messsystems sind diese zufälligen Fehler bei der messtechnischen Erfassung zu vermeiden. Genauigkeitsuntersuchen in sehr kleinen Winkelbereichen (1m°) können daher nicht am Neigungstisch durchgeführt werden.

Daher wurden Untersuchungen zur Genauigkeit und Linearität mithilfe eines Tachymeters durchgeführt. Der Vorteil liegt darin begründet, dass sich Neigungen beziehungsweise Neigungsänderungen am Tachymeter mit einer hohen Genauigkeit einstellen lassen.

# 8.2 Untersuchungen zur Genauigkeit und Linearität des Sensors

Unter Verwendung eines Tachymeters soll die Genauigkeit und die Linearität der von First Sensor bereitgestellten Neigungssensoren untersucht werden. Dies erfolgt exemplarisch für ein Sensorboard. Aus den acht im Winter 2015 zur Verfügung gestellten Sensorboards wurde in Absprache mit dem Hersteller ein Sensorboard ausgewählt, welches ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis besaß.

### 8.2.1 Versuchsaufbau

Als Referenzsystem für die messtechnische Untersuchung des MEMS-basierten Sensors dient das Tachymeter Zeiss Elta S10. Es besitzt folgende Eigenschaften:

- − Genauigkeit: 1"  $\triangleq$  0,28 m°
- Einstellgenauigkeit: 0,5"
- Zweiachskompensator mit einem Arbeitsbereich von 5'  $\triangleq$  83 m° und einer Genauigkeit von 0,3"  $\triangleq$  0,08 m°
- Temperaturbereich: -20 °C bis +50 °C.

Der Tachymeter wurde auf einem Dreibein aufgestellt und horizontiert. Nachdem Tragegriff und Zielkollimator entfernt wurden, konnte das Sensorboard auf dem Fernrohr mittels Verschraubung angebracht werden. Der Versuchsaufbau und der aufgeschraubte Sensor sind in Abbildung 59 gezeigt.



Abbildung 59: Versuchsaufbau (links) und das auf dem Zielfernrohr aufgeschraubte Sensorboard (rechts)

### 8.2.2 Versuchsdurchführung

Der Sensor wurde mithilfe der von First Sensor zur Verfügung gestellten Controllerboards und Software ausgelesen. Der Messbereich des einachsigen Sensors wurde durch das Setzen von Registereinstellungen auf  $\pm 5^{\circ}$  eingeschränkt.

Die Messung erfolgte mit folgenden Parametern:

Messachse:	Achse B, einachsig
Gesamter Messbereich:	± 5°
Abtastrate:	100 Hz
Anzahl der Messwerte:	1000 Samples
Messdauer:	10 s

Ablauf der Messung:

- 1) Einstellung einer Neigung am Tachymeter mittels Feintrieb (manuell)
- 2) Protokollieren der eingestellten Neigung
- 3) Auslösen einer Messung über die Software des Herstellers
- 4) Abspeichern der Messdaten
- 5) Wiederholung der Schritte 1 bis 5 für verschiedenen Neigungen des Zielfernrohrs.

Zur Untersuchung der Genauigkeit wurden verschiedene Messbereiche untersucht:

- a) Neigungsänderungen um 10 m°
   Untersuchter Messbereich: 0 m° 90 m°
   Abfahren von 10 Neigungspositionen in einer Richtung
- b) Neigungsänderungen um 1 m°
   Untersuchter Messbereich: 0m° 9 m°
   Abfahren von 10 Neigungspositionen in einer Richtung
- c) Neigungsänderungen von 250 m°
   Untersuchter Messbereich: 4,5° bis + 4,5°
   Abfahren von 36 Neigungspositionen in zwei Richtungen, d.h. Hin- und Rückweg.

Anschließend wurden die Neigungen unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Skalierungsfaktoren (Sensitivität und Bias) aus den Messdaten ermittelt. Die Neigungsänderungen wurden nachfolgend aus den Differenzen der Mittelwerte der ermittelten relativen Neigungen berechnet. Der Versuch fand unter Mitwirkung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schwarz (ehemals Professur Geodäsie und Photogrammetrie, Bauhaus-Universität Weimar) statt.

### 8.2.3 Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden in einem Messlabor in unmittelbarer Nähe zu einer Straße durchgeführt. Abbildung 60 zeigt zwei Neigungsverläufe bei konstant gehaltener Neigung am Tachymeter. Es ist ein deutlicher Einfluss äußerer Erschütterungen in den Daten zu erkennen. Diese können beispielsweise durch vorbeifahrende Fahrzeuge verursacht worden sein. Aber auch Eigenschwingungen der Bodenplatte oder durch die anwesenden Personen verursachte Vibrationen können im Messsignal überlagert sein.

Für die jeweiligen Messreihen wurden die Eigenfrequenzen dieser Schwingungen aus dem Frequenzspektrum bestimmt. Unter Verwendung eines Bandsperrfilters (20 Hz bis 30 Hz) konnte die Standardabweichung der einzelnen Signale verringert werden. Jedoch ist in Abbildung 61 zu erkennen, dass die Signale nicht komplett auf das Rauschenlevel reduziert werden konnten.

In Abbildung 62 und Abbildung 63 sind die am Tachymeter eingestellten und die messtechnisch ermittelten Neigungsänderungen verglichen. Teilweise treten recht große Abweichungen auf.



Abbildung 60: Ungefilterte Messdaten für aufgebrachte Neigungsänderungen von 30 m° (schwarz) und 60 m° (blau)



Abbildung 61: Gefilterte Messdaten für aufgebrachte Neigungsänderungen von 30 m° (schwarz) und 60 m° (blau); ungefilterte Messdaten (grau hinterlegt)



Abbildung 62: Vergleich der ermittelten und am Tachymeter eingestellten Neigungsänderungen (Messintervall 1 m°)



Abbildung 63: Abweichung der messtechnisch identifizierten von den am Tachymeter eingestellten Neigungsänderungen (Messintervall 1 m°)

### 8.3 Messtechnische Untersuchungen zur Linearität

Weiterhin wurde die Sensorik auf die Linearität der ermittelten Neigungen innerhalb des eingeschränkten Messbereichs  $(\pm 5^{\circ})$  untersucht. Wie in Abschnitt 8.2 beschrieben, wurden Neigungsänderungen von 250 m° am Tachymeter aufgebracht. Abweichend von den Untersuchungen zur Genauigkeit wurde hierbei der Messbereich in zwei Richtungen abgefahren: Zuerst wurde auf dem Hinweg der Bereich von -4,5° bis + 4,5° aufgenommen und nachdem der Messbereich überdreht wurde, noch einmal von +4,5° zu -4,5° in Inkrementen zu 250 m° zurückgemessen. Auf diese Weise lassen sich Aussagen zur Linearität und zum Drift des Sensors ableiten.

Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die Korrelation zwischen eingestellter und messtechnisch ermittelter Neigungsänderung des Hin- und Rückwegs. Ein lineares Sensorverhalten ist deutlich zu erkennen. Die mittleren Abweichungen sind bei den Messungen des Rückwegs geringer als beim Hinweg.

Insbesondere für den Hinweg lässt sich ein linearer Trend bei den mittleren Abweichungen bemerken. Dies könnte gegebenenfalls auf eine gleichmäßige Temperaturänderung schließen lassen. Während der Neigungsmessung wurde auch die Temperatur erfasst. Die Differenzen der gemessenen, gemittelten Neigungsänderungen und der Temperaturunterschied zwischen Hin- und Rückweg werden in Abbildung 66 dargestellt. Der lineare Zusammenhang lässt auf ein temperaturbedingtes Driften des Signals schließen. Hierbei ist jedoch nicht mehr zu ergründen, ob beziehungsweise in welchem Maß sich die Raumtemperatur oder die Temperatur direkt am Sensorelement (infolge von Aufheizvorgängen) geändert hat.



Abbildung 64: Korrelation zwischen eingestellter und mittlerer gemessener Neigungsänderung und deren mittlerer Abweichung des Hinwegs (-4,5° bis 4,5°)



Abbildung 65: Korrelation zwischen eingestellter und mittlerer gemessener Neigungsänderung und deren mittlerer Abweichung des Rückwegs (+4,5° bis -4,5°)



Abbildung 66: Differenz der Neigungsänderung und der Temperatur zwischen der Messung des Hin- und Rückwegs (rot: Trendlinie der Neigungsänderung)

Die Notwendigkeit einer Temperaturkompensation bei der Anwendung der Sensorik am realen Objekt wird deutlich ersichtlich.

## 8.4 Überprüfung des Rauschverhaltens

Bei den Laborversuchen zur Genauigkeit und Linearität (siehe Abschnitt 8.2 und 8.3) konnten verschiedene Einflussgrößen – Vibrationen der Umgebung, Temperatur und Rauschen – auf messtechnisch ermittelte Neigungen identifiziert werden. In einem weiteren Versuch sollte das Rauschverhalten der Sensoren untersucht werden. Dazu sind die Untersuchungen an einem Ort mit möglichst konstanter Umgebungstemperatur und möglichst frei von externen Schwingungen durchzuführen.

Die Parkhöhle im Park an der IIm in Weimar eignet sich sehr gut für diese Untersuchung. Dort herrscht sowohl eine gleichmäßige Temperatur als auch eine konstante Luftfeuchtigkeit. Die Höhle befindet sich in ca. 12 m Tiefe und besitzt einen großen Abstand zur nächst gelegenen Straße, sodass bei den Messungen nur sehr geringe störende Einflüsse zu erwarten sind. Aus den vorgenannten Gründen ist die Parkhöhle Standort der seismischen Station des Erdbebenzentrums der Fakultät Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar, mit deren Hilfe weltweit auftretende Erdbeben aufgezeichnet werden können. Die Seismometer ist auf einem 9 m tief gegründeten Sockel befestigt und von der Bodenplatte in der Höhle entkoppelt. Die Messungen zur Bestimmung des Rauschverhaltens sollen auf diesem Sockel durchgeführt werden. In Abbildung 67 ist der Sockel mit dem Seismometer und der zu untersuchenden Sensorik gezeigt.



Abbildung 67: Parkhöhle Weimar - Sockel für Seismometer mit der zu untersuchenden Sensorik

### 8.4.1 Versuchsaufbau

Exemplarisch werden zwei Sensorboards bezüglich des Rauschens untersucht. Die Sensorik wurde auf einem Flachstahl befestigt und auf dem Sockel neben dem Seismometer angeordnet.

Die Sensorboards (Nr. 1 und 2) wurden in Absprache mit dem Hersteller ausgewählt. Nach internen Tests von First Sensor sollte Sensorboard 1 ein geringeres Rauschen zeigen als Sensorboard 2.

### 8.4.2 Versuchsdurchführung

Um störende Temperatureinflüsse zu vermeiden und um eine Akklimatisation der Messtechnik zu ermöglichen, wurde die Sensorik bereits einen Tag vor der Messung in der Parkhöhle platziert. Weiterhin wurden vor den eigentlichen Messungen 15-minütige "Warm-upMessungen" durchgeführt, um Aufheizeffekte des Sensors während der Messung zu vermeiden.

Mit beiden Sensorboards werden nacheinander Messungen mit unterschiedlichen Abtastraten und einer Dauer von 100 Sekunden durchgeführt. Dabei wird folgende Reihenfolge eingehalten:

100 Hz, 50 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 100 Hz (zum Vergl. mit erster 100 Hz Messung)

Dabei wird die Lage der Sensoren nicht verändert, d.h. es werden keine Neigungsänderungen aufgebracht. Die Messdaten werden mithilfe der von First Sensor zur Verfügung gestellten Controllerboards und Software erfasst.

Die Umgebungstemperatur betrug rund 8 °C und kann als konstant angesehen werden. Es ist anzumerken, dass es insbesondere während der Messung mit Sensorboard 2 vereinzelten Publikumsverkehr in der Parkhöhle gab.

8.4.3 Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden 6 Messungen je Sensor zu je 100 Sekunden durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Abtastrate ergibt sich bei gleicher Messdauer eine unterschiedliche Anzahl an diskreten Werten. Für die untersuchten Abtastfrequenzen werden daher zwischen 100 und 10.000 Werte je Messung ermittelt.

Aufgrund der oben genannten Bedingungen wurden konstante Messwerte mit einem überlagerten Rauschen ohne Trends und ohne überlagerte Schwingungen erwartet. In den zeitlichen Verläufen waren jedoch geringe (Sensor 1) bis deutliche Oberschwingungen (Sensor 2) zu erkennen. In Abbildung 68 sind exemplarisch die Zeitverläufe von Sensorboard 2 dargestellt.

Aus dem Frequenzspektrum wurden die Frequenzen der überlagerten Schwingungen ermittelt und anschließend verwendet, um die Ausgangssignale zu filtern. Die gefilterten Neigungsverläufe sind in Abbildung 69 dargestellt. Eine Abhängigkeit des Rauschens von der Abtastrate ist deutlich zu erkennen. Je geringer die Abtastrate, desto geringer die Rauschbreite. Dies ist teilweise mit der internen Signalaufbereitung der Sensorik zu begründen (siehe Abschnitt 6.1).



Abbildung 68: Zeitverlauf der Messwerte für Sensorboard 2 bei unterschiedlichen Abtastraten



Abbildung 69: Zeitverlauf der Neigungsänderung (grau: ungefiltert; schwarz: gefiltert)

In der 100 Hz Messung konnte eine kleinste Änderung der Neigung von ca. 0,01354 m° detektiert werden. Dies entspricht bei einem Messbereich von  $\pm$  5° einer Auflösung von 18,5 bit.

### 8.4.4 Quantifizierung des Rauschens

Aus den gefilterten Neigungsverläufen wurde anschließend das Rauschen unter der Annahme eines normalverteilten Rauschens in den einzelnen Messungen quantifiziert. In den Datenblättern von Sensorik wird das Rauschen in der Regel als RMS-Rauschen oder als Rauschdichte angegeben. Das RMS-Rauschen ergibt sich dabei aus dem quadratischen Mittel der Abweichungen. Die Rauschdichte berücksichtigt zusätzlich die Abhängigkeit der Messfrequenz. Ein Vergleich der in der Untersuchung erhaltenen Rauscheigenschaften beider Sensorboards ist in Tabelle 8 sowie in Abbildung 70 gegeben.

Abtastrate	[Hz]	100 (1)	50	10	5	1	100 (2)	Sensor
RMS Rauschen	[m°]	1,73	1,55	0,92	0,64	0,28	1,68	Sensor 1
	[m°]	2,56	2,65	2,24	1,82	1,43	2,63	Sensor 2
Rauschdichte	[m°/√Hz]	0,17	0,22	0,29	0,28	0,28	0,17	Sensor 1
	[m°/√Hz]	0,25	0,38	0,71	0,82	1,44	0,26	Sensor 2

Tabelle 8:Vergleich der Rauscheigenschaften von Sensor 1 und Sensor 2



Abbildung 70: Vergleich des RMS-Rauschens der beiden Sensoren in Abhängigkeit der Abtastrate

Sensor 1 besitzt gegenüber Sensor 2 ein deutlich geringeres Rauschen. Von First Sensor wird im Datenblatt eine Rauschdichte von <  $0.4 \text{ m}^{\circ}/\sqrt{\text{Hz}}$  angegeben. Diese kann für Sensorboard 1 bestätigt werden. Sensor 2 besitzt unter Berücksichtigung des betrachteten Bereichs der Abtastraten eine höhere Rauschdichte als erwartet. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Sensorelemente von Hand auf die Sensorboards gelötet wurden, wodurch das Sensorverhalten beeinflusst werden kann.

# 9 Bauteilversuche

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Sensoreigenschaften unter Laborbedingungen an geeigneten Testeinrichtungen bestimmt. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messsystems auf Basis von Mikrocontrollern und den MEMS-basierten Neigungssensoren wurde zur Vorbereitung des Einsatzes an Referenzbauwerken in einem zweiten Schritt in Bauteilversuchen getestet. Dazu wurden Belastungsversuche an zwei Stahlbetonbalken in der Versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Belastungsversuche an zwei gleichartigen Stahlbetonbalken fanden im Juli 2016 und im Januar 2017 statt.

## 9.1 Biegeversuch an einem Stahlbetonbalken

### 9.1.1 Versuchsaufbau

Der Stahlbetonbalken hat eine Breite von 12 cm, eine Höhe von 20 cm, ist mit einem Bewehrungsstab Ø14 bewehrt und besitzt eine Betongüte C25/30. Die Länge des Balkens beträgt 2,20 m und die Spannweite ist 2,00 m. Der Einfeldträger wird mittig mit einer Einzellast belastet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 71 schematisch dargestellt.

Die Lastaufbringung erfolgt über einen hydraulischen Prüfzylinder. Die Verformungen in Balkenmitte werden mit einem induktiven Wegaufnehmer (IWT) an der Unterseite des Stahlbetonbalkens aufgenommen. Die Verdrehungen des Balkens an den beiden Trägerenden infolge Lastaufbringung werden mittels Neigungssensoren gemessen.

Die Neigungen werden mit den MEMS-basierten Neigungssensoren von First Sensor aufgezeichnet, die direkt über den Auflagern auf dem Träger installiert sind. Zur Validierung der Messergebnisse werden weiterhin Referenzneigungssensoren angebracht. Diese Sensoren des



Abbildung 71: Versuchsaufbau des Bauteilversuchs und Querschnittsabmessungen



Abbildung 72: Versuchsaufbau: Stahlbetonbalken mit installierter Messtechnik und Prüfzylinder



Abbildung 73: Referenzneigungssensor (graues Gehäuse) und MEMS-Neigungssensor (grünes Sensorboard, ungehaust)

Typs LSOC-0120 besitzen einen Messbereich von  $\pm 3^{\circ}$  bei einer Auflösung von 0,1 Bogensekunden, was in etwa 0,278 m° entspricht. Sowohl die Referenzneigungssensoren als auch die MEMS-Sensoren wurden auf eine Grundplatte aufgeschraubt, die an der Oberseite mithilfe eines Zwei-Komponenten-Klebers starr an den Balken angeschlossen wurde.

### 9.1.2 Neigungsmessung mit dem entwickelten Messsystem

Für den Bauteilversuch wurden zwei Raspberry Pi Mikrocontroller verwendet, an dem jeweils ein Neigungssensor angeschlossen wurde. Die Stromversorgung der Mikrocontroller erfolgte mithilfe von Akkus (Powerbank). Da zu dem Zeitpunkt des ersten Balkenversuches die entwickelten Sensorboards (siehe Abschnitt 5.2) noch nicht zur Verfügung standen, wurden die Sensoren mit Jumperkabel an die GPIO-Pins des Raspberry Pis angeschlossen.

Die beiden Raspberry Pis wurden mithilfe einer kabelgebundenen Netzwerkverbindung über einen Router mit einem Laptop verbunden. Von dieser Steuereinheit aus wurden die Messungen mittels weniger Befehle (siehe Abschnitt 5.3.3) unter Verwendung der Client-Software ausgelöst und beendet. Die Konfigurationsdateien der Sensoren waren lokal auf den Raspberry Pis hinterlegt und konnten bei Einrichten des Sensors aufgerufen werden. Die Messung erfolgte als Dauermessung ohne eine Abspeicherung von Blockdateien.

Die MEMS-Sensorik wurde auf einen Messbereich von ±5° angepasst. Die Messdaten wurden mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst. Der Einfluss des Sensorrauschens wurde durch nachträgliche Mittelung über 10 Messwerte reduziert.

### 9.1.3 Versuchsdurchführung

Unter Verwendung einer Handpumpe wurde die Belastung mittels des hydraulischen Prüfzylinders schrittweise auf den Prüfkörper aufgebracht. Die Belastung erfolgte in verschiedenen Laststufen mit je 2 Lastrampen. Das Belastungsregime ist in Abbildung 74 (links) dargestellt. Der Biegeversuch wurde im Juli 2016 durchgeführt.

#### 9.1.4 Versuchsauswertung

Die schrittweise Aufbringung der Last ermöglicht die Beobachtung der eintretenden Rissbildung im Beton und damit des fortschreitenden Steifigkeitsverlusts in den höheren Laststufen. Der Erstriss trat während des Biegeversuchs bei ca. 7 kN in Balkenmitte auf. Im Last-Verformungsdiagramm in Abbildung 74 (rechts) ist die Steifigkeitsentwicklung des Balkens zu erkennen. Es zeigen sich deutlich geringere Anstiege der einzelnen Rampen bei Lasten über 10 kN. Die über-



Abbildung 74: Belastungsregime des Balkenversuchs (links) und Last-Verformungsdiagramm (rechts) für den Biegeversuch im Juli 2016



Abbildung 75: Verformter Stahlbetonbalken bei Erreichen der maximalen Last von 31,1 kN



Abbildung 76: Neigungsverlauf: Vergleich der gemittelten Neigungsänderungen  $\Delta \varphi$  der MEMS-Sensoren und der Referenzsensoren (positive Neigungsänderung bei Verdrehungen im Uhrzeigersinn)

proportionale Zunahme der Verformungen oberhalb 28 kN ist durch das Fließen des Bewehrungsstahls zu begründen. Die maximal erreichte Last betrug 31,1 kN.

Der Vergleich der mit den MEMS-Neigungssensoren und den Raspberry Pis ermittelten Neigungen mit den Messdaten von den Referenzsensoren in Abbildung 76 zeigt, dass eine generelle Übereinstimmung besteht, jedoch je nach Laststufe unterschiedliche Abweichungen auftreten. So werden die gemessenen Neigungen von Neigungssensor N<sub>1</sub> im unteren Lastbereich unterschätzt und bei höheren Lasten überschätzt (siehe Abbildung 77). Dies könnte unter Umständen auf eine Abweichung im Scale-Faktor begründet sein. Für Neigungssensor N<sub>2</sub> zeigt sich eine geringe Überschätzung der gemessenen Neigungen im gesamten Lastbereich, was wiederum durch einen Fehler im Bias begründet sein könnte.



Abbildung 77: Vergleich der ermittelten Neigungen des MEMS-Neigungssensors mit dem Referenzsensor

### 9.1.5 Anmerkungen

Der Einfluss der Temperatur wurde bei der Auswertung der Neigungen nicht betrachtet. Da es sich um einen Kurzzeitversuch handelt und die Temperatur in der Versuchshalle als annähernd konstant angesehen werden kann, ist dies als zulässig zu betrachten.

In diesem ersten Bauteilversuch wurden Abweichungen zwischen den erfassten Neigungen der Referenzsensoren und der MEMS-Sensoren identifiziert. Die Ergebnisse des Biegeversuchs wurden mit dem Projektpartner First Sensor diskutiert. Zur Vorbereitung eines zweiten Bauteilversuchs wurden Einstellungen der Sensorik in enger Absprache mit First Sensor angepasst. Die Anpassung erfolgte dabei durch die Modifikation von Registereinstellungen des Auswerteschaltkreises (ASIC) des Sensors.

### 9.2 Wiederholung des Biegeversuches an einem Stahlbetonbalken

### 9.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Im Januar 2017 fand ein zweiter Bauteilversuch an einem gleichartigen Stahlbetonbalken statt. Der Versuchsaufbau und die installierte Messtechnik war identisch zu dem Biegeversuch im Juli 2016, welcher ausführlich in Abschnitt 9.1 beschrieben ist. Anpassungen erfolgten für das entwickelte Messsystem auf Seiten der Hard- und Software. Analog zur Versuchsdurchführung im Juli 2016 wurde mithilfe eines hydraulischen Prüfzylinders die Belastung schrittweise in verschiedenen Laststufen mit je zwei Lastrampen aufgebracht. Das Belastungsregime ist in analog zu dem Versuch im Juli 2016.

Unterschied zu der früheren Versuchsdurchführung ist, dass in dem Biegeversuch zusätzlich Untersuchungen zur bildbasierten Verformungsermittlung durchgeführt wurden, welche im Rahmen des Zukunft Bau Projektes "Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken - Fortsetzungsprojekt" (SWD-10.08.18.7-16.36) stattfanden. Der Versuchsaufbau des Biegeversuchs und das verfahrbare Kamerastativ sind in Abbildung 78 (links) dargestellt. Zur Rekonstruktion der Balkenverformung unter einer Laststellung wurden die Kameras entlang der Balkenachse verfahren. Die Anordnung der Kameras ist in Abbildung 78 (rechts) gezeigt. Es wurde die kontaktlose Aufnahme von Bauteilverformungen unter Belastung untersucht. Dies ermöglicht weiterhin eine Identifikation von Rissweiten aus den aufgenommenen Bildern. Da diese Untersuchung nicht Gegenstand dieses Projektes ist, wird an dieser Stelle auf weitere Details verzichtet und auf den Zwischenbericht [39] des benannten Projektes verwiesen. Nachfolgend werden lediglich die aus der bildbasierten Analyse ermittelten Neigungen zum Vergleich herangezogen.



Abbildung 78: Versuchsaufbau des Biegeversuchs mit verfahrbaren Kamerastativ (links) und Anordnung der Digitalkameras am Stativ (rechts)

### 9.2.2 Neigungsmessung mit dem untersuchten Messsystem

Die Neigung an den beiden Trägerenden wurde mit einem MEMS-Neigungssensor erfasst, der jeweils an einen Raspberry Pi Mikrocontroller angeschlossen wurde. Die Stromversorgung der Raspberry Pis erfolgte mittels Akku (Powerbank). Die Sensoren wurden über Flachbandkabel an das entwickelte Sensorboard (siehe Abschnitt 5.2) angeschlossen.

In diesem zweiten Bauteilversuch wurde eine kabellose Netzwerkverbindung zwischen den Raspberry Pi und einem Laptop aufgebaut. Ein Router war nicht notwendig. Die Software und Hardware der Mikrocontroller wurde um die Funktionalität "WLAN-Hotspot" erweitert. Die Mikrocontroller stellen einen WIFI-Hotspot zur Verfügung, über den sich ein WLAN-fähiges Endgerät, beispielsweise ein Laptop, mit dem Mikrocontroller verbinden kann. Über die WLAN-Verbindung können dann, unter Verwendung des bereitgestellten Clients, über die xml-rpc Schnittstelle (siehe Abschnitt 5.3.4) wie zuvor einfache Kommandozeilenbefehle gesendet werden. Bei der Implementation dieser Funktionalität wurde darauf geachtet, dass auch bei einer Unterbrechung der WLAN-Verbindung der Messprozess nicht unterbrochen wird. Ein Ausloggen ist jederzeit möglich, da ein einmal gestarteter Messprozess erst über den entsprechenden Befehl zum Beenden der Messung wieder gestoppt wird.

Der Aufbau des WLAN-Hotspots kann bei den Raspberry Pis der älteren Generation (2 Modell B) mithilfe eines WLAN-Sticks erfolgen, der über einen USB-Port angeschlossen wird. Bei der neusten Generation der Raspberry Pis (3 Modell B) kann bereits das integrierte WLAN-Modul des Pis verwendet werden.

Konfigurationsdateien der Sensoren wurden auf den Raspberry Pis vorgehalten und bei Initialisierung der Sensoren aufgerufen. Die Messung erfolgte ebenfalls als Dauermessung ohne eine Abspeicherung von Blockdateien.

Der Messbereich der MEMS-Sensorik wurde durch Registereinstellungen auf ±5° eingestellt. Die Messdaten wurden mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst. Der Einfluss des Sensorrauschens wurde durch nachträgliche Mittelung über 10 Messwerte eliminiert.

Nach Beendigung der Messung standen die Messdaten unmittelbar als Binärdateien auf dem Raspberry Pi zur Verfügung. Bei Abholung der Dateien via WLAN wurden die Binärdateien automatisch in menschenlesbare Textdateien (csv-Format) umgewandelt und standen zur weiteren Auswertung bereit.

Das verwendete Messsystem, bestehend aus Raspberry Pi, MEMS-Neigungssensor und Powerbank (Akku), ist in Abbildung 79 dargestellt.



Abbildung 79: Verwendetes Messsystem: Raspberry Pi mit Powerbank zur Stromversorgung (links) sowie MEMS-Neigungssensor (grünes Sensorboard) und Referenzneigungssensor (graues Gehäuse) an der Oberseite des Balkens (rechts)

#### 9.2.3 Versuchsauswertung

Die Auswertung des Biegeversuchs erfolgt über den Vergleich der messtechnisch erfassten Neigungsänderungen des MEMS-Sensors und des Referenzsensors. Es ist eine gute Übereinstimmung in Abbildung 80 (links) zu erkennen. Für einen besseren Vergleich der beiden Messsysteme sind die absoluten und relativen Abweichungen der an den beiden Trägerenden (links und rechts) gemessenen Neigungen zu den Referenzneigungen dargestellt (Abbildung 80 rechts). Es ergeben sich durchschnittliche Abweichungen von unter 2 m° bei maximaler Abweichung von 5 m°. Die relativen Abweichungen sind im Mittel kleiner als 1 %.



Abbildung 80: Vergleich der messtechnisch erfassten Neigungen der MEMS-Neigungssensoren und der Referenzneigungssensoren: Neigungsänderungen (links) und Vergleich zwischen den absoluten und relativen Abweichungen der beiden Auflagerneigungen (rechts)



Abbildung 81: Vergleich der messtechnisch, bildbasiert und numerisch ermittelten Änderungen der Auflagerneigungen  $N_1$  für die aufgebrachten Laststufen

Des Weiteren wurde der Biegeversuch in einem numerischen Modell nachgebildet. Für den in Abbildung 71 dargestellten Stahlbetonbalken wurden die Verformungen für die aufgebrachten Lasten unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens numerisch ermittelt. In Abbildung 81 sind die messtechnisch ermittelten Neigungen (Referenzsensor und First Sensor (FIS) MEMS-Sensor), die auf Basis der photogrammetrischen Aufnahmen ermittelten Neigungen und die numerisch ermittelten Neigungen für die einzelnen Laststufen für das linke Auflager verglichen. Die gemessenen Kurven der Neigungen von Referenzsensor und MEMS-Neigungssensor sind dabei überlagert. Die bildbasiert ermittelten Neigungen sowie die numerisch ermittelten Neigungen weichen geringfügig voneinander ab.

Die Neigungen, die bildbasiert ermittelt wurden, basieren auf der Rekonstruktion der Balkenunterkante. Dabei wurde durch die Anpassung eines Polynoms die Biegelinie des Trägers ermittelt. Der Anstieg der Biegelinie entspricht hierbei der Balkenneigung.

Für die mithilfe des numerischen Modells erhaltenen Neigungsänderungen ist festzuhalten, dass die Verdrehungen an einem idealen System berechnet wurden. Dieses System setzt ein homogenes Material voraus. Dies ist insbesondere für den Baustoff Beton, der aus Zementstein, Gestein und Luftporen besteht und daher größere Unsicherheiten auf Seiten des Materials besitzt, nur eine Annäherung an die Realität. Auch Abweichungen in der Maßhaltigkeit des Trägers sowie beim Versuchsaufbau haben Einfluss auf die sich einstellenden Neigungen. Prinzipiell werden mit dem numerischen Modell unter der mittigen Einzellast gleichgroße Neigungen in der beiden Auflagern ermittelt. Im Biegeversuch sind die Neigungen der beiden Trägerenden in der gleichen Größenordnung. Jedoch sind geringfügige Abweichungen zwischen den Neigungen des linken und rechten Auflagers zu erkennen. Diese zusätzlichen Unsicherheiten sind im numerischen Modell nicht berücksichtigt. Die geringen Abweichungen könnten mit den vorgenannten Ausführungen erklärt werden.

Aus den messtechnisch erfassten Neigungen wurden mithilfe des numerischen Modells die Mittenverformungen berechnet. Ein Vergleich zwischen der gemessenen Mittenverformung und der mithilfe der MEMS-Neigungssensoren ermittelten Verformung ist in Abbildung 82 für die verschiedenen Laststufen dargestellt. In den höheren Laststufen nimmt die Abweichung der aus der Neigungsmessung bestimmten Mittenverformung zu, wobei die ermittelten Verformungen aus der linken Auflagerneigung ( $N_1$ ) über den gesamten Lastbereich größer sind als die Mittenverformungen, welche mithilfe der rechten Auflagerneigung bestimmt wurden. Es ist zu beachten, dass die Berechnung der Mittenverformungen auf dem numerischen Modell beruht, welches das reale Verhalten des Stahlbetonbalkens mit geringen Abweichungen erfasst. Diese Abweichungen werden auch in den ermittelten Mittenverformungen sichtbar.



Abbildung 82: Vergleich der messtechnisch erfassten und aus den Neigungen des MEMS-Neigungssensor (FIS) berechneten Mittenverformung *u*: Last-Verformungs-Diagramm (links) und Vergleich zwischen den absoluten und relativen Abweichungen der Mittenverformung (rechts)

Es ergeben sich maximale Abweichungen von bis zu 0,8 mm bei einer Mittenverformung von rund 13 mm, was in etwa 6,5 % entspricht. In den niedrigeren Laststufen bis 15 kN sind die Abweichungen mit bis zu 0,25 mm Differenz deutlich geringer.

Unter Beachtung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ergeben sich für den betrachteten Stahlbetonträger eine Grenzverformung von:

$$u_{Grenz} = \frac{L}{300} = \frac{2000 \,\mathrm{mm}}{500} = 4,0 \,\mathrm{mm}.$$

Diese Grenzverformung entspricht dem Bereich bis knapp unter 15 kN. Im Gebrauchslastbereich sind die beobachteten Abweichungen daher bis zu 0,25 mm.

## 9.3 Fazit

In den durchgeführten Bauteilversuchen konnte das prototypische Messsystem in zwei Ausbaustufen getestet werden. Durch Optimierung der Sensorkonfiguration konnten bei dem Biegeversuch im Januar 2017 eine gute Übereinstimmung der messtechnisch erfassten Neigungsänderungen mit Neigungen hochpräziser Referenzneigungssensoren erreicht werden. Die durchschnittlichen Abweichungen der Neigungen zwischen den beiden Messsystemen lagen in der Größenordnung unter 2 m<sup>°</sup> und einer maximalen Abweichung von 5 m<sup>°</sup> bei knapp 500 m<sup>°</sup> aufgebrachter Verdrehung. Diese Unterschiede entsprechen relativen Abweichungen von durchschnittlich unter 1%.

Aus dem Vergleich der berechneten Mittenverformungen aus den Neigungsmessungen mit den im Versuch gemessenen Durchbiegungen wird ersichtlich, dass im unteren Belastungsbereich die Durchbiegungen mit Abweichungen bis 0,25 mm erfasst werden.

# 10 Untersuchung der Langzeitstabilität

Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Sensorik im Zusammenspiel mit dem Mikrocontroller wurde eine Langzeitmessung durchgeführt. Ziel der Untersuchung ist es, Erkenntnisse über den Drift bei einer Dauerbelastung des Sensors zu erhalten. Die Untersuchungen der Langzeitstabilität des Sensors mittels HTOL-Tests an ungehausten Sensoren befinden sich in Abschnitt 6.2.4. Durch die Beanspruchung des Sensors bei erhöhten Tempertaturen (80°C) wird eine Langzeitbeanspruchung des Sensors simuliert. Die hier dargestellte Untersuchung soll Aufschluss über das Driftverhalten bei einer Langzeitmessung unter einer möglichen Einsatzbedingung bei Normaltemperatur geben.

Weiterhin wird die Anbindung an einen Server getestet, auf dem die Messdaten in Form von Blockdateien persistent abgelegt werden.

### 10.1 Langzeitmessung mit ungehausten Sensoren

### 10.1.1 Versuchsaufbau

Zur Bestimmung des Driftverhaltens ist eine Befestigung der Sensorik an einem starren, verdrehsteifen Objekt erforderlich. Für die Durchführung des Langzeitversuchs wurde daher ein massiver Stahlmesstisch mit Einzelgründung in einem Messlabor verwendet. Auf einer Stahlplatte, welche fest mit dem Stahltisch verbunden ist, wurden zwei ungehauste Sensoren angebracht. Der Versuchsaufbau und das prototypische Messsystem sind in Abbildung 83 dargestellt. Die Eignung des Messlabors als Standort für die Langzeitmessung begründet sich in einer relativ konstanten Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie einer geringen Schwinganregung durch externe Quellen.



Abbildung 83: Versuchsaufbau auf Stahltisch (links); Mikrocontroller und Sensorik (rechts)

Die Neigungen (einachsig) und die Temperatur der Sensoren wurden kontinuierlich mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst und in Blockdateien auf dem lokalen Speicher abgelegt. Über eine Netzwerkverbindung wurden die Daten redundant auf einem Server abgelegt. Ein Fernzugriff wird durch die Netzwerkverbindung ebenfalls ermöglicht.

Die Sensoren haben einen Messbereich von  $\pm 3^{\circ}$ . Die Konfigurationsparameter wurden in Absprache mit dem Projektpartner First Sensor festgelegt, um ein optimales Messergebnis zu erzielen. Die Auswertung der Rohdaten erfolgt unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Eigenschaften Scale-Faktor und Bias. Die Sensorik wurde bei Zimmertemperatur kalibriert. Informationen über das temperaturabhängige Verhalten der Sensorik sind nicht vorhanden. Eine pauschale Temperaturkompensation ist daher nicht möglich. Es wurden verschiedene Messungen mit unterschiedlichen Messdauern durchgeführt.

Aufgrund der festen Verbindung mit dem Stahltisch wird davon ausgegangen, dass keine physikalische Verdrehung der Sensoren stattfindet. Für einen driftfreien Sensor und bei einer konstanten Temperatur sollte daher eine konstante Neigung während des Versuchs ermittelt werden. Die untersuchten Sensoren haben in Laborversuchen ein temperatur- und zeitabhängiges Verhalten gezeigt (siehe Abschnitt 6.2). Es wird daher ein Abdriften der ermittelten Neigungen erwartet. Die Größe des Drifts soll in diesen Untersuchungen quantifiziert werden.

### 10.1.2 Versuchsauswertung für Messung 1

Die Neigungen zweier ungehauster Sensoren wurden über einen Zeitraum von 22 Tagen mithilfe des prototypisch entwickelten Messsystems erfasst. In Abbildung 84 ist exemplarisch für einen der beiden Sensoren der Verlauf der ermittelten Neigungen und der Temperatur dargestellt.



Abbildung 84: Verlauf der Temperatur und Neigungsänderung über einen Zeitraum von 22 Tagen

Die Temperatur ist relativ gleichmäßig und nimmt über die betrachtete Messdauer kontinuierlich ab. Es sei bemerkt, dass die gemessene Temperatur nicht per se die Raumtemperatur, sondern die Temperatur im Sensorelement ist. Aus dem Verlauf der Neigungen ist im Anfangsbereich der Messung ein unerwartetes Verhalten zu bemerken. Es zeigt sich eine Art Warmlaufverhalten, welches gegebenenfalls auf eine Aufheizphase des Sensors zurückzuführen ist. Diese Warmlaufphase dauert zirka zwei Tage an. In dem Bereich ab dem neunten Tag sind Sprünge im Größenbereich von annähernd 2 m° zu erkennen, die nicht durch Temperaturveränderungen erklärt werden konnten. In der Diskussion mit dem Projektpartner First Sensor konnte dieses Verhalten mit der differentiellen Nichtlinearität des ASIC begründet werden. Zur Vermeidung dieses sprunghaften Verhaltens war es notwendig, die Dabei wurden Konfigurationsparameter Registereinstellungen anpassen. der Signalverstärkung (Gain) angepasst. Dies hatte jedoch eine Einschränkung des Messbereichs von  $\pm 3^{\circ}$  auf  $\pm 1.7^{\circ}$  zur Folge. Unter Berücksichtigung der Messaufgaben ist dies aber als unkritisch zu betrachten.

Aufgrund des beobachten Verhaltens wurde die Messung nach 22 Tagen abgebrochen. Prinzipiell kann hier ein Abdriften der Sensorik beobachtet werden. An dieser Stelle wurde ein Zusammenhang mit der Temperatur vermutet. Die Veränderung der gemessenen Neigungsänderung zwischen Tag 2 und Tag 22 lag bei zirka 4,5 m° unter einer Temperaturänderung von zirka 1,5 K.

### 10.1.3 Versuchsauswertung für Messung 2

Nach der Anpassung der Registerwerte wurde die Messung erneut gestartet. Die Messdauer der zweiten Messreihe betrug 80 Tage. Der Temperatur- und Neigungsverlauf sind in Abbildung 85 dargestellt. Während dieser Messperiode sank die Temperatur um weniger als 2 K ab. Geringe Schwankungen in der Temperaturkurve sind zu erkennen. Die messtechnisch ermittelten Neigungen sind ohne Kompensation in Abbildung 85 (unten) gezeigt. Dabei lässt sich ein ähnlicher Verlauf zur Temperaturkurve erkennen. Da die Schwankungen in der Temperatur analog im Neigungssignal auftreten, wird angenommen, dass die Abweichungen der Neigung bezüglich der Nulllage durch die Temperaturänderung ausgelöst werden. Der identifizierte Temperaturdrift beträgt zirka 35 m° bei einer Temperaturänderung von annähernd 1,5 K. Die entspricht ungefähr 24 m° je K.

Zur Kompensation der Temperatur wird der Zusammenhang zwischen Neigung und Temperatur in den Rohdaten betrachtet. Die temperaturabhängige Änderung des Ausgangssignals ist in Abbildung 86 gezeigt. Der zeitliche Verlauf ist durch den Farbverlauf wiedergegeben. Dabei ist der Beginn der Messung in Blau und das Ende der Messung in Gelb dargestellt. Die Kompensation der Temperatur erfolgt mithilfe einer linearen Regression, welche in Abbildung 86 als rote Linie hinzugefügt ist. Durch das Entfernen des linearen Zusammenhangs werden kompensierte Neigungen ermittelt. Diese sind in Abbildung 87 dargestellt. Die kompensierten Neigungen liegen im Mittel um den Erwartungswert Null. Dabei treten maximale Abweichungen von 5 m° auf.



Abbildung 85: Verlauf der Temperatur (oben) und der unkompensierten Neigungsänderung (unten) über einen Zeitraum von 80 Tagen

Zu diskutieren ist die Annäherung durch eine lineare Regressionsgerade. Gerade bei den Temperaturen von 8020 LSB und 8050 LSB treten sichtbare Sprünge (siehe Abbildung 86) auf, wonach die Steigung der nachfolgenden Punktwolke scheinbar zunimmt. Die Darstellung des Zusammenhangs als linear ist daher nur eine Annäherung an das tatsächliche Verhalten. In diesem Fall sind höherwertige Ansätze für die Approximation nicht weiter untersucht worden.

Bei der Kompensation wird aufgrund der Analogie der Verläufe von einer reinen Temperaturabhängigkeit ausgegangen.



Abbildung 86: Zusammenhang zwischen Rohdaten der Neigung und der Temperatur (Farbverlauf: Blau = Beginn der Messung; Gelb = Ende der Messung)



Abbildung 87: Verlauf der kompensierten Neigungsänderungen über einen Zeitraum von 80 Tagen

#### 10.1.4 Versuchsauswertung für Messung 3

Nach der Messdauer von 80 Tagen kam es zu einem Ausfall der Sensorik. Nach Austausch des Sensors wurde die Messung an Tag 81 erneut gestartet. Die Messdauer dieser Messreihe betrug dabei 208 Tage. Der Temperatur- und Neigungsverlauf sind in Abbildung 88 dargestellt. Während der Messperiode können größere Schwankungen in der Temperatur beobachtet werden, welche jedoch auch vom ermittelten Neigungsverlauf (unkompensiert) abgebildet werden. Die Abweichungen in den messtechnisch erfassten Neigungen können wie für Messung 2 auf eine Temperaturabhängigkeit zurückgeführt werden. Der temperaturbedingten Neigungsänderungen bis zirka Tag 135 betragen dabei knapp 45 m° bei einer Änderung der Temperatur von 3,5 K. Dies entspricht wiederum 13 m°/K. Während der Abkühlungsphase änderte sich die Neigung um 26 m° bei zirka 1,7 K Temperaturänderung, was zu einem Verhältnis von 15 m°/K führt.

Die Kompensation der Temperatur erfolgt in Analogie zur Messung 2 mithilfe einer linearen Regression. Der Verlauf der kompensierten Neigungen ist in Abbildung 88 (unten) dargestellt.

Die kompensierten Neigungen liegen dauerhaft unter dem Erwartungswert Null. Dies ist auf die Erwärmungsphase des Sensors zurückzuführen, die auch durch einen Anfangsdrift in Abbildung 89 zu erkennen ist.

Über den Messzeitraum treten maximale Abweichungen von 7,5 m° auf. Im Bereich der Erwärmung sind die Abweichungen etwas geringer und in der Abkühlungsphase etwas größer. Eine vollständige Kompensation aller Temperatureffekte wurde mithilfe der linearen Annäherung nicht erreicht. Dies ist auch an den Bereichen im kompensierten Neigungsverlauf zu erkennen, wo im Temperaturverlauf große Temperaturgradienten vorhanden sind.



Abbildung 88: Verlauf Temperatur (oben) und unkompensierter und kompensierter Neigungsänderung (unten) über einen Zeitraum von 208 Tagen (Tag 81 – 290)



Abbildung 89: Zusammenhang zwischen Rohdaten der Neigung und der Temperatur (Farbverlauf: Blau = Beginn der Messung; Gelb = Ende der Messung)

### 10.1.5 Versuchsauswertung für Messung 4

Gleichzeitig mit Messung 2 wurde eine parallele Messung mit einem zweiten Sensor gestartet. Der Sensor hat einen Messbereich von  $\pm 1.7^{\circ}$ . Der Temperatur- und Neigungsverlauf sind in Abbildung 90 dargestellt. Die Messung lief dabei über einen Zeitraum von 356 Tagen. Im Temperaturverlauf sind deutliche Schwankungen zu erkennen, wobei Erwärmungs- und Abkühlphasen auftreten. Während der Dauermessung gab es zwei Systemausfälle. Die Zeitpunkte sind in Abbildung 90 durch die schwarzen Linien gekennzeichnet. Weiterhin ist aus dem Neigungsverlauf eine Warmlaufphase, wie bei Messung 1 (siehe Abschnitt 10.1.2) zu erkennen, die ungefähr 3 Tage andauert und eine anfängliche Neigungsänderung von 17 m<sup>o</sup> zur Folge hat. Das Ende dieses Bereichs ist durch eine Strichlinie gekennzeichnet.



Abbildung 90: Verlauf der Temperatur (oben) und der unkompensierten Neigungsänderung (unten) über einen Zeitraum von 356 Tagen mit Indikation der Systemausfälle

Analog zu den vorangegangenen Versuchsauswertungen wird der Zusammenhang zwischen Rohdaten der Neigung und Temperatur betrachtet (siehe Abbildung 91). Für den Bereich der Erwärmung (Bereich 1, dunkelblau), für den Bereich vor dem ersten Systemausfall (Bereich 2, blau), für den Bereich zwischen beiden Systemausfällen (Bereich 3, blau bis grün) sowie für den Bereich nach dem zweiten Ausfall (Bereich 4, grün bis gelb) ergeben sich unterschiedliche Verhaltensmuster. Im Erwärmungsbereich (Bereich 1) ist eine Zunahme der Neigung ohne signifikante Temperaturänderung zu erkennen. In Bereich 2 ist der Einfluss der Temperatur geringer als im Bereich 3. In Bereich 4 tritt ein vollkommen unerwartetes Verhalten auf. In Bereich 4 wird am Ende ein ähnliches Verhalten angetroffen wie in Bereich 2.

Das beobachtete Verhalten entspricht nicht den zuvor gesammelten Erfahrungen. Dies wird auch durch den Sensorhersteller bestätigt. Die Messung erfolgte über die gesamte Dauer mit den gleichen Konfigurationseinstellungen. Eine Interpretation der Versuchsergebnisse gestaltet sich als schwierig. Wie bereits beschrieben, ist ein ähnliches Verhalten der Sensorik in Bereich 2 und am Ende des Bereichs 4 zu erkennen, welches durch die roten Strichlinien gekennzeichnet ist. Zwischen diesen beiden Zeitbereichen kann eine Veränderung im Ausgangssignal beobachtet werden. Der Unterschied beträgt ungefähr 32.000 LSB bis 33.000 LSB. Unter Berücksichtigung der Sensitivität (Scale-Faktor) lässt sich die Neigungsänderung zu

74 m° bis 76 m° bestimmen. Diese Neigungsänderung wird im Bereich vom erstem Systemausfall bis Tag 280 aufgebaut (zirka in der Mitte von Bereich 4).



Abbildung 91: Zusammenhang zwischen Rohdaten der Neigung und der Temperatur (Farbverlauf: Blau = Beginn der Messung; Gelb = Ende der Messung)

Der Beginn von Bereich 4, in dem es größere Temperaturschwankungen gibt, lässt sich eindeutig in Abbildung 91 identifizieren. Für den Fall, dass hier eine einfache Temperaturabhängigkeit bestehen würde, sollte das Signal auf der gleichen Geraden bei Temperaturänderung vor- und zurücklaufen. Hier ist eine Verschiebung dieser Linie zu erkennen. Es ist zu diskutieren, ob an dieser Stelle höherwertige Ansätze als die lineare Regression zur Temperaturkompensation benötigt werden. Gegebenenfalls sind die Effekte auch durch einen Drift zu begründen, der bei höheren Temperaturen oder gegebenenfalls bei größeren Temperaturgradienten deutlicher auftritt. Eine eindeutige Ursachenverortung ist an dieser Stelle nicht möglich.

#### 10.1.6 Fazit

In mehreren Messungen wurde die Langzeitstabilität der Sensorik betrachtet, wenn diese am prototypisch entwickelten Messsystem betrieben wird. Dabei konnten beispielsweise Aufwärmphasen bei Start der Dauermessungen beobachtet werden, die ungefähr zwei bis drei Tage andauerten. Bei drei der vier hier dargestellten Messungen konnte eine starke Temperaturabhängigkeit des Ausgangssignals der Neigung erkannt werden. Eine entsprechende Kompensation wurde auf Basis eines linearisierten Temperatur-Neigungszusammenhangs durchgeführt. Dabei wurden nach der Kompensation Neigungsabweichungen bezüglich eines Ausgangszustandes im Milligradbereich identifiziert. In einer vierten Messung wurde ein unerwartetes Sensorverhalten beobachtet. Die Temperaturabhängigkeit im Ausgangssignal war dabei weniger deutlich. Es wurden Neigungsänderungen von 70 m° erkannt, die auf eine Kombination von Temperatureffekt und Drift zurückzuführen ist. Eine eindeutige Bestimmung der beiden Effekte war in dieser Stelle nicht möglich.

### 10.2 Dauermessung mit gehausten Sensoren

Vor der Installation der gehausten Sensoren, die am Referenzobjekt Kirchturm (Stadtkirche Freyburg, siehe Abschnitt 11.3) angebracht werden sollten, wurde im Messlabor zur Abschätzung des Langzeitverhaltens eine Dauermessung durchgeführt. Die Temperatur in dem Messlabor beträgt konstant 20 °C.

Die Sensorik wurde in ein hermetisches Kovar-Gehäuse integriert (siehe 6.3.2). Die beiden Sensoren messen jeweils eine Achse. Ein Umschalten zwischen den beiden Achsen findet nicht statt. Der Messbereich der Sensoren beträgt  $\pm 5^{\circ}$ . Die beiden gehausten Sensoren sind auf einem Stahlwinkel (schwarz) angeschraubt. Für den Labortest wurde der Stahlwinkel an einen massiven Stahlwinkel (blau) angebracht, welcher als Halterung dient. Das Messsystem, inklusive des Raspberry Pis, ist in Abbildung 92 gezeigt. Die Aluminiumplatte zwischen den beiden Winkeln ist die Grundplatte, welche am Referenzobjekt in ein Installationsgehäuse zu integrieren ist.



Abbildung 92: Messsystem mit Raspberry Pi und gehausten Sensoren auf einem Stahlwinkel (blaue Halterung ist nicht Bestandteil des Messsystems)

Die Stabilität des Sensorsignales wird über einen Zeitraum von 37 Tagen untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass keine physikalische Verdrehung der Sensorik stattfindet, sodass unter der Annahme eines konstanten Raumklimas eine Tendenz für den Drift der Sensorik ermittelt werden kann.

In Abbildung 93 ist der Verlauf der Temperatur und der ermittelten Neigungsänderung dargestellt. Über den Zeitraum von 25 Tagen steigt die Temperatur an. Nach einem geringen Abfall der Temperatur zwischen Tag 25 und Tag 30 steigt die Temperatur weiter an. Dem Verlauf der unkompensierten Neigungen ist ein dauerhafter Anstieg der Neigungen für beide Sensoren zu erkennen. Dabei betragen die gemessenen Neigungsänderungen zirka 100 m° nach 35 Tagen. Die Neigungsänderungen verlaufen dabei ähnlich wie die Temperatur, jedoch ist der kurze Abfall der Temperatur nicht analog in den Neigungen zu erkennen.

Nachfolgend werden zwei Möglichkeiten der Kompensation aufgezeigt:

Ansatz 1: Kompensation auf Basis der gemessenen Rohdaten (wie in Abschnitt 10.1.3)

Ansatz 2: Temperaturkompensation und Entfernen eines linearen Trends





10.2.1 Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 1

Unter der Annahme, dass keine tatsächliche Verdrehung des Sensors stattfindet, wird eine Kompensation der "virtuellen" Neigungen auf Basis der Rohdaten durchgeführt. In Abbildung 94 sind die Rohdaten der Neigungen gegen die Rohdaten der Temperatur für beide Sensoren gemeinsam mit einer linearen Regressionsgeraden dargestellt. Durch Subtraktion des linearen Trends von den Messdaten werden kompensierte Rohdaten berechnet. Mithilfe von Scale-Faktor und Bias werden die Neigungsänderungen ermittelt, welche in Abbildung 95 in kompensierter Form im Vergleich zu den unkompensierten Neigungsänderungen dargestellt sind. Nach der Kompensation ergeben sich Abweichungen von der tatsächlichen Null-Verdrehung von bis zu 15 m°.



Abbildung 94: Rohdaten der Neigung in Abhängigkeit der Rohdaten der Temperatur: Sensor 1 (links) und Sensor 2 (rechts)



Abbildung 95: Kompensation der gemessenen Neigungen – Ansatz 1

Die oben beschriebene Art der Kompensation stellt eine kombinierte Temperatur-Drift-Kompensation dar. Da die Verläufe der Temperatur und Neigungen im Bereich zwischen Tag 25 und Tag 30 nicht gut übereinstimmen, zeigt sich auch bei den kompensierten Neigungen innerhalb dieses Zeitraums ein größerer Anstieg in den identifizierten Neigungsänderungen. Das Weglaufen der Messwerte ist nicht allein durch die geringen Temperaturänderungen hervorgerufen, sondern wird von dem Drift überlagert.

### 10.2.2 Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 2

In einem zweiten Schritt wird daher eine Temperaturkompensation vorgenommen. Dabei sind die in Abhängigkeit der Temperatur ermittelten sensorspezifischen Parameter Scale-Faktor und Abweichung des Bias zu verwenden. Diese sind aus der Kalibrierung im Labor verfügbar und sind in Abbildung 96 gezeigt. Sowohl die Sensitivität als auch die Abweichung des Bias sind für die beiden Sensoren unterschiedlich. Der Verlauf zwischen den einzelnen Messpunkten wird dabei als linear angenommen. Zum besseren Verständnis wird der Zusammenhang zwischen Neigungsänderung und Temperaturänderung in Abbildung 97 für einen exakt horizontal ausgerichteten Sensor bei einer Ausgangstemperatur von 25 °C dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass große Temperaturänderungen signifikante Neigungsänderungen zur Folge haben. Eine Abkühlung um 15°C würde für den Sensor 1 eine virtuelle Zunahme der Neigung von 180 m° und für Sensor 2 eine Verringerung von ca. 60 m° bedeuten.

Unter Verwendung der dargestellten Zusammenhänge erfolgt eine Temperaturkompensation, woraufhin sich die temperaturkompensierten Neigungsverläufe in Abbildung 98 ergeben. Für Sensor 2 ergeben sich nach dem ersten Kompensationsschritt größere Neigungsänderungen und für Sensor 1 kleinere Neigungsänderungen im Vergleich zu den zugehörigen Ausgangssignalen. Bereits in Abschnitt 6.3 wurde der Temperatureinfluss an gehausten Sensoren aufgezeigt. Dabei wurde ein Driften der Sensorik beobachtet. Im zeitlichen Verlauf der Änderung des Bias, welcher dominant für den Drift ist, wurde ein lineares Verhalten vermutet. Auch hier kann in den temperaturkompensierten Daten prinzipiell ein lineares Abdriften des Signals erkannt werden. Der Drift beträgt hierbei 75 m° und 112 m° für die beiden Sensoren über einen Zeitraum von 35 Tagen.



Abbildung 96: Scale-Faktor (links) und Abweichung des Bias (rechts) in Abhängigkeit der Temperatur



Abbildung 97: Neigungsänderung in Abhängigkeit der Temperatur bei einem horizontal ausgerichteten Sensor und einer Ausgangstemperatur von 25 °C



Abbildung 98: Kompensation der gemessenen Neigungen – Ansatz 2
#### 10.2.3 Fazit

Unter der Annahme eines stationären Sensors wurde versucht, den Temperatureinfluss zu kompensieren sowie den Drift zu quantifizieren. Bei den Voruntersuchungen am Messsystem für das Referenzobjekt Kirchturm (Stadtkirche Freyburg, siehe Abschnitt 11.3) konnte während der Dauermessung eine starke Zunahme in den identifizierten Neigungsänderungen beobachtet werden. Die Abweichungen von den messtechnisch erfassten Neigungsänderungen bezüglich der Ausgangslage resultieren dabei teilweise aus Temperatur, teilweise aus Sensordrift. Der Drift liegt in der Größenordnung von 70 m° - 100 m° während eines Monats. Im Zusammenhang mit den Messungen am Referenzobjekt Kirchturm, bei denen die Neigungen über einen langen Zeitraum zu erfassen sind, ist der Drift als kritisch zu betrachten. Eine geeignete Kompensation sowohl von Temperatur als auch insbesondere für den Drift muss anhand der Messdaten durchgeführt werden.

# 11 Messungen an Referenzobjekten

Für die praxisorientierten Untersuchungen der in Abschnitt 3.2 identifizierten Einsatzszenarien wurden entsprechende Referenzobjekte ausgewählt. Die Auswahl dieser Objekte erfolgte einerseits nach deren Eignung und andererseits nach dem Potential einer effizienten Anwendung am Bauwerk. Die Referenzobjekte stellen typische Bauwerke der jeweiligen Kategorie dar, an beziehungsweise bei denen einen Einsatz von neigungsbasierten Messsystemen an diesen Bauwerken sinnvoll erscheint.

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an auszuwählende Referenzbauwerke zusammengefasst. Anschließend werden die ausgewählten Referenzobjekte vorgestellt und die geplante Monitoringstrategie beschrieben. Die Installation und die Messergebnisse werden ausführlich dargestellt und umfänglich diskutiert.

## 11.1 Anforderungen

An Referenzobjekten soll das entwickelte Messsystem installiert und unter realen Einsatzbedingungen getestet werden. Auf diese Weise soll die Praxistauglichkeit nachgewiesen werden. Folgende Anforderungen sind dabei von den auszuwählenden Referenzbauwerken zu erfüllen:

- Repräsentation unterschiedlicher bautypischer Tragwerke gemäß den Anwendungsszenarien
- Typische Einwirkungen und Umgebungsbedingungen
- Auftreten von Verformungen in typischen Größenordnungen
- Zustimmung des Betreibers sowie Kooperationswillen des Nutzers
- Zugänglichkeit an mögliche Installationspunkte
- Zugang zu Messdaten
- Zugänglichkeit zu Netzwerk und Stromversorgung
- Vorhandensein oder Möglichkeiten zur Installation eines Referenzmesssystems zur Überprüfung der ermittelten Neigungen und der Funktionsfähigkeit des entwickelten MEMS- und mikrocontrollerbasierten Messsystems
- Gegebenenfalls Möglichkeit von Probebelastungen.

Ziel dabei ist die Erprobung und Optimierung des Messsystems bezüglich der folgenden Punkte:

- Dauerhaftigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit des Messsystems
- Praktische Erfahrungen bei der Nutzung und der Applizierung am Bauwerk
- Datenzugriff- und Datenauswertung
- Effizienz der Datenauswertung
- Nutzerfreundlichkeit.

## 11.2 Übersicht Referenzbauwerke

Zur Erprobung des entwickelten Messsystems unter tatsächlichen Einsatzbedingungen wurden zu Beginn des Projektes geeignete Referenzbauwerke gesucht, die den in Abschnitt 11.1 definierten Anforderungen genügen.

Bereits im Herbst 2016 konnte das Projekt an zwei Stellen vorgestellt und Kooperationszusagen für die praktischen Untersuchungen an Referenzobjekten gewonnen werden. Dabei handelte es sich um die Überwachung eines Hallentragwerks und eines historischen Kirchturms, dessen Schiefstellung zu überwachen ist. Diese konkreten Gebäude konnten den Kategorien Industriebau und historische Gebäude zugeordnet werden.

Während des Bearbeitungszeitraumes des Projektes wurden weitere mögliche Bauwerke angefragt. Darunter befanden sich eine Stahlhalle und mehrere Werkhallen. Das Interesse der Betreiber ist generell vorhanden und zeigt das große Anwendungspotential für eine sensorbasierte Tragwerksüberwachung. Infolge von der teilweise vorhandenen Trennung von Nutzer und Betreiber beziehungsweise Eigentümer von Industrieanlagen mündete das anfängliche Interesse leider nicht einer Kooperation innerhalb des Forschungsprojektes. Daher konnten die praktischen Untersuchungen nur an zwei Referenzbauwerken erfolgen.

Für die beiden Referenzbauwerke wurden die bauwerksspezifischen Eigenschaften erfasst und die daraus resultierenden Parameter bezüglich der Untersuchung dieses Bauwerks abgeleitet. Entsprechend den in Abschnitt 11.1 definierten Anforderungen wurden folgende Referenzobjekte ausgesucht und untersucht:

Objekt	Ort	Tragwerk	Messaufgabe
Stadtkirche Freyburg	Freyburg (Unstrut)	Turm	Überwachung der Schiefstellung
Fabrikhalle Griesson – de Beuklaer & Co. KG	Kahla	Spannbetonbinder auf Stahlbetonstützen	Überwachung der Verformung des Dachtragwerks

Tabelle 9:Übersicht ausgewählter Referenzbauwerke

Zur Kompensation und zur Durchführung einer Dauermessung, die als Überwachung für Gebäude in geotechnischen Risikogebieten gelten kann, wurde ein Langzeitversuch durchgeführt.

## 11.3 Stadtkirche St. Marien in Freyburg

## 11.3.1 Einführung

Die Stadtkirche St. Marien in Freyburg (Unstrut) wurde ursprünglich als 3-schiffige Basilika errichtet. Das Bauwerk verfügt über zwei baugleiche Türme auf der Westseite mit einem rechteckigen Zwischenbau sowie einer Empore. Die beiden Türme haben einen ca. 12 m hohen quadratischen Sockel, auf dem sich jeweils ein ca. 11 m hoher, im Grundriss achteckiger Turm befindet. Abbildung 99 zeigt die Stadtkirche St. Marien in der Schrägansicht von Westen (links) sowie in der Ansicht Südwest (rechts).



Abbildung 99: Stadtkirche St. Marien in Freyburg (Unstrut), links: Ansicht West, rechts: Ansicht Südwest

Der südliche der beiden Türme, in Abbildung 99 jeweils rechts, weist eine vom Boden aus deutlich sichtbare Schiefstellung in südwestlicher Richtung auf, deren Ursache bisher noch nicht geklärt ist.

#### Messaufgabe

Messaufgabe ist die kontinuierliche Überwachung eines möglichen Fortschreitens der globalen Schiefstellung des Turmes. Das Monitoring soll dabei mithilfe moderner Sensor- und Mess-technologie erfolgen.

#### Umgebungsbedingungen und Besonderheiten

Der Turm besitzt unverglaste Fensteröffnungen, sodass im Innenraum tageszeitliche und jahreszeitliche Temperaturschwankungen zu erwarten sind. Weiterhin befindet sich im Südturm eine Läuteanlage für die Kirchenglocken. Die in den Kirchturm eingetragenen Schwingungen infolge von Glockenschwingungen sind bei der Datenauswertung zu berücksichtigen.

Messtechnik kann auf einer Zwischenebene im Südturm installiert werden. Strom- und Netzwerkanschluss sind nicht vorhanden. Zur Überprüfung des MEMS-basierten Messsystems ist ein geeignetes Referenzsystem zu installieren.

## 11.3.2 Geplantes Vorgehen

Mit den Neigungssensoren kann nur eine Änderung der Schiefstellung des Turmes bezüglich eines Ausgangszustandes erfasst werden. Daher ist der betreffende Kirchturm zu Beginn der Datenerfassung geodätisch einzumessen, um die absolute Schiefstellung des Südturms zu bestimmen. Die absolute Schiefstellung ergibt sich für spätere Zeitpunkte aus der Addition der absoluten Neigung bei Beginn der Datenerfassung und der gemessenen, relativen Neigungsänderung.

Der Kirchturm neigt sich augenscheinlich in die südwestliche Richtung. Die Neigungsänderungen des Südturms sind daher in den zwei orthogonal zueinander stehenden Hauptrichtungen – in der Nord-Süd-Achse und der Ost-West-Achse – messtechnisch zu erfassen. Die Ausrichtung der Messachsen erfolgt in den globalen Richtungen, um über die Einzelkomponenten die Hauptkipprichtung und die Größe der resultierenden Neigungsänderung bestimmen zu können.

Tageszeitabhängig wird der Kirchturm aus unterschiedlichen Richtungen durch Sonneneinstrahlung erwärmt. Eine Korrelation zwischen dieser Erwärmung und der Neigung des Kirchturmes wird erwartet. Daher werden parallel zu den Neigungen die Innen- und Außentemperaturen an der Süd- und an der Westseite des Turmes in den Fensternischen gemessen.

Die Installation der Messsysteme erfolgt zweistufig. Zu Beginn des Projekts wird ein Referenzmesssystem zur Überwachung der Turmneigung installiert. Die während der ersten Messperiode gesammelten Daten ermöglichen eine quantitative Einschätzung der zu erwartenden Neigungsänderungen und dienen somit der Konditionierung des alternativen Messsystems.

Ziel der Messung ist die Erfassung der Neigungsänderung in der Hauptkipprichtung des Südturms, einschließlich der Abhängigkeit der Temperatur.

Über eine drahtlose Mobilfunk-Datenverbindung soll jederzeit auf die gesammelten Messdaten zugegriffen werden können. Auf diese Weise wird eine lückenlose Live-Überwachung des Bauwerks beziehungsweise der Schiefstellung des Bauwerks ebenso ermöglicht wie die Überprüfung der Aktivität der Messung.

#### 11.3.3 Herausforderung bei der Planung der Installation

Bei der Planung der Installation des Messsystems mussten vorab organisatorische Fragengestellungen geklärt werden. Dies betrifft vor allem die Zugänglichkeit, die Beachtung des Denkmalschutzes und den Fernzugriff auf das Messsystem:

- In welchen Bereichen des Kirchturmes darf Messtechnik installiert werden?
- Gibt es einen regelmäßigen Publikumsverkehr an der Messstelle?
- Auf welche Weise darf Messtechnik an den Turm angebracht werden? Sind Bohrungen zulässig?
- Welche Auflagen bestehen durch den Denkmalschutz?
- Wie kann eine Stromzufuhr geschaffen werden?
- Gibt es Möglichkeiten der Einbindung in ein vorhandenes Netzwerk? Wenn ja, wie kann ein Zugriff ermöglich werden?
- Kann gegebenenfalls eine mobile Internetverbindung hergestellt werden? Welche Bandbreite kann erreicht werden?
- Kann ein Fernzugriff vorab getestet werden?
- Wie kann eine Verbindung zum Messsystem erfolgen?
- Ist die Zugänglichkeit für gegebenenfalls benötigte Nachjustierungen gegeben?

In Abstimmung mit dem Pfarramt und dem Kirchenbauamt konnte eine Messstelle sowie die Art der Applizierung festgelegt werden. Das Messsystem kann auf der zweiten Zwischenebene des Südturms installiert werden. Bohrungen im Natursteinmauerwerk sind zulässig. Da die Messtechnik nur im Turminnern installiert wird, bestehen keine weiteren Forderungen aus dem Denkmalschutz.

Stromanschluss wurde durch die Verlegung einer Steckdose bereitgestellt.

Die Möglichkeit der Einbindung in ein vorhandenes Netzwerk bestand nicht. Daher musste eine mobile Internetverbindung mithilfe eines Routers geschaffen werden, an den ein PC zur Anbindung des Referenzmesssystems und die Mikrocontroller des entwickelten Messsystems angeschlossen werden mussten. Ein spezielles Konzept zum Fernzugriff auf die Mikrocontroller musste entwickelt und getestet werden.

### 11.3.4 Durchgeführte Maßnahmen

Nach Absprache mit der Kirchgemeinde und dem Kirchenbauamt wurden am 29.9.2015 folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Geodätische Ermittlung der absoluten Schiefstellung des Südturms
- Installation eines Referenzmesssystems
- Messtechnische Erfassung der Neigungsänderungen

#### Bestimmung der absoluten Schiefstellung des Südturms

Die Ermittlung der absoluten (globalen) Schiefstellung des Südturms der Stadtkirche erfolgte unter Einsatz eines Tachymeters. Dabei wurden von zwei Standpunkten aus jeweils 7 Punkte entlang der südsüdwestlichen und der westsüdwestlichen Außenkante des achteckigen Turmes verteilt über eine Höhe von 8 m aufgenommen. Durch die Messung in beiden Fernrohrlagen konnten Ziel- und Kippachsfehler sowie der Höhenindexfehler berücksichtigt werden. Mithilfe der einzelnen Messwerte konnten die horizontalen Abweichungen zu einer lotrechten Geraden durch den obersten Messpunkt berechnet werden. Über Regression wurde die globale Schiefstellung des Turmes bestimmt:

•,•.=	_	Neigung in westlich	ner Richtung:	0,342°
-------	---	---------------------	---------------	--------

- Neigung in südlicher Richtung: 0,898°
- Resultierende absolute Schiefstellung: 0,962°
- Winkel  $\alpha$  der resultierenden Schiefstellung: 20,85° zur Nord-Süd-Richtung

Die Einzelkomponenten sowie die resultierende Schiefstellung des Südturms ist schematisch in Abbildung 100 dargestellt.



Abbildung 100: Schematische Darstellung der geodätisch bestimmten Schiefstellung des Südturms (Stand: 29.9.2015)

#### Installation eines Referenzmesssystems und messtechnische Überwachung

Zur kontinuierlichen messtechnischen Überwachung der fortschreitenden Neigungsänderung des Turmes während der ersten Messperiode und zur Überprüfung der Messdaten des

alternativen Messsystems in der zweiten Messperiode wurde ein Referenzmesssystem im Innern des Kirchturmes installiert.

Abbildung 101 zeigt das installierte Messsystem im Südturm. Die Neigungssensoren wurden über eine Stahltraversenkonstruktion mit eingeklebten Schwerlastankern an der Turminnenwand der Westseite dauerhaft und kraftschlüssig mit dem Bauwerk verbunden. Die Referenzneigungssensoren wurden auf einer Grundplatte angebracht, die an die Stahltraverse angeschweißt ist. Zum Schutz der Sensorik wurde eine Abdeckung vorgesehen. Die hochpräzisen Referenzsensoren vom Typ LSOC-0120 besitzen einen Messbereich von  $\pm 3^{\circ}$  und eine Auflösung von 0,1 Bogensekunden. Dies entspricht zirka 0,278 m<sup>o</sup> und ist für die Messaufgabe ausreichend genau.

Für eine spätere Anbringung der MEMS-basierten Neigungssensoren wurde ein Installationsgehäuse unterhalb der Platte für die Referenzsensoren vorgesehen (siehe Abbildung 101 Mitte).







Abbildung 101: Installiertes Neigungsmesssystem in der zweiten Ebene des Südturms: Referenzneigungssensoren (links); verankerte Lasttraverse (Mitte); Innenansicht mit installierter Messtechnik und Messrechner (rechts)

#### Messsystem und Messachsen

Das Referenzmesssystem besteht aus zwei hochgenauen, einachsigen Neigungssensoren (Typ LSOC-0120) und einem Datenloggersystem. Die Messdaten werden mithilfe eines Vielstellenmessgerätes (HBM UGR 100) erfasst. Dieses ist mit einem Mess-PC verbunden, auf dem die Datenspeicherung erfolgt. Die Internetanbindung des Messsystems erfolgt über einen mobilfunkfähigen Router (d-link).

Parallel zu den Neigungen werden, wie in Abschnitt 11.3.2 beschrieben, die Innenraumtemperatur sowie die Außentemperaturen an der Süd- und Westseite erfasst. Die Temperatursensoren für die Außentemperaturen sind in den vorhandenen offenen Fensternischen an der Süd- und Westseite angebracht. Die Innentemperatur wird direkt neben den Neigungssensoren erfasst. In Abbildung 102 ist die Orientierung und die Definition der Messachsen sowie die Position der Temperatursensoren schematisch dargestellt.



- N<sub>1</sub> Neigungssensor 1 (Nord-Süd-Achse)
- N<sub>2</sub> Neigungssensor 2 (Ost-West-Achse)
- R Neigung in der Hauptkippachse
- α Winkel der Hauptkippachse zur Nord-Süd-Achse
- T<sub>I</sub> Innenraumtemperatur
- Tw Temperatur Westseite
- T<sub>s</sub> Temperatur Südseite

Abbildung 102: Orientierung der Messachsen der installierten Neigungssensoren und der Hauptkippachse sowie die erfassten Temperaturen

#### Messtechnische Erfassung der Neigungsänderungen

Die messtechnische Überwachung der temperaturabhängigen Neigungsänderung des Südturms wurde am 29.09.2015 gestartet. Die Neigungsänderungen werden auf 1/1000 Grad [m°] und die Temperaturen im Inneren sowie im Außenbereich auf 0,1°C genau erfasst. Die Neigungssensoren wurden vorab kalibriert. Die Messung startete mit einem Nullabgleich der beiden Neigungssensoren (Startwert 0,000°).

Der Verlauf der gemessenen Innentemperatur und der Neigungsänderungen in den Achsen  $N_1$  und  $N_2$  sowie der resultierenden Neigungsänderung R in der Hauptkippachse ist in der nachfolgenden Abbildungen für den Messzeitraum 29.09.2015 bis 14.08.2017 (685 Tage / 22 Monate und 14 Tage) gezeigt.



Abbildung 103: Zeitlicher Verlauf der Neigungsänderung in der Nord-Südachse *N*<sub>1</sub> und der Innentemperatur



Abbildung 104: Zeitlicher Verlauf der Neigungsänderung in der Nord-Südachse *N*<sub>2</sub> und der Innentemperatur



Abbildung 105: Zeitlicher Verlauf der Neigungsänderung in der Hauptkippachse *R* und der Innentemperatur

Die gemessenen Neigungen in den beiden Messachsen haben einen ähnlichen Verlauf. Ein Zusammenhang mit den Umgebungstemperaturen kann festgestellt werden. Es ist zu erkennen, dass die Neigungsänderung während des Abschnitts sinkender Temperaturen entgegen und während des Abschnitts steigender Temperaturen entsprechend der geodätisch festgestellten Schiefstellung gerichtet ist, d.h. die Neigung des Südturmes nimmt in der Herbst-Winter-Periode ab, wohingegen sie während Frühjahr und Sommer zunimmt.

Seit Beginn der Messperiode wurden max. Neigungsänderungen von +53 m° im Winter (Verringerung der Schiefstellung) und -25 m° im Sommer (Zunahme der Schiefstellung) aufgezeichnet. Es ist festzustellen, dass sich die resultierende Neigung in der Hauptkippachse nach zirka einem Jahr an die Schiefstellung zu Beginn der Messperiode annähert.

Im Innenraum traten während der Messperiode Temperaturen zwischen -2 °C und 30 °C auf. Der Verlauf der Temperaturen an der Süd- und Ostseite des Kirchturmes sind in Abbildung 106 gezeigt. An den Außenkanten traten Temperaturen im Bereich zwischen -12 °C und 38 °C auf.



Abbildung 106: Zeitlicher Verlauf der Innen- und Außentemperaturen

Im genannten Messzeitraum kam es aufgrund von Stromausfällen zu kurzen Messunterbrechungen. Daher wurde im April 2016 eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) installiert, die im Fall von Stromausfällen die Spannungsversorgung der Messtechnik übernimmt.

Mit den kontinuierlichen Messungen werden Änderungen der Turmneigung seit Messbeginn (29.09.2015) ermittelt. Dem Verlauf der Neigungsänderung R in der Hauptkippachse ist ein maximaler Wert von 0,053° zu entnehmen (siehe Abbildung 105).

Installation des entwickelten Messsystems auf Basis von Mikrocontroller und MEMS-Neigungssensor zur messtechnischen Überwachung

Für die kontinuierliche Überwachung der Turmneigung des Südturms wurde ein Messsystem konditioniert. Das Messsystem beinhaltet einen Raspberry Pi Mikrocontroller und zwei MEMSbasierte Neigungssensoren von First Sensor. Die Sensoren wurden vom Hersteller in ein hermetisches Gehäuse integriert, auf einem Stahlwinkel befestigt und anschließend im gehausten Zustand kalibriert. Die Registereinstellungen zur Konfiguration des Sensors wurden übergeben und auf dem Speicher des Mikrocontrollers hinterlegt. Die Neigungen werden je Sensor in einer Achse erfasst. Ein Umschalten zwischen den Achsen während der Messung wurde nicht vorgesehen. Die beiden Sensoren erfassten dabei die beiden Messachsen  $N_1$  und  $N_2$ .

In Abbildung 107 ist das konfigurierte Messsystem für den Einsatz am Referenzbauwerk Kirchturm dargestellt.

Am 19.6.2017 wurde das entwickelte Messsystem im Innern des Südturmes installiert. Die Sensorik wurde in das vorgesehene Installationsgehäuse integriert. Der Stahlwinkel mit den Sensoren wurde über eine Stahlplatte fest mit der Stahltraverse an der Westseite des Südturmes verschraubt. Die Mikrocontroller wurden in einem weiteren Installationsgehäuse integriert und neben der Stahltraverse angebracht. Sensorik und Mikrocontroller wurden mittels Flachbandkabel verbunden. Die Stromversorgung der Raspberry Pis erfolgte über den durch die USV abgesicherten Stromkreis. Zur Anbindung an das Netzwerk wurden die Pis an den bereits vorhandenen Router mit mobilem Internetzugang verbunden.



Abbildung 107: Installiertes Messsystem: Sensoren auf Stahlwinkel (links) und Installationsgehäuse mit Raspberry Pis und Sensorik (rechts)

#### 11.3.5 Vergleich der Neigungen zwischen Referenzsystem und MEMS-Sensoren

In Abbildung 108 werden die ermittelten Temperatur- und Neigungsverläufe der MEMS-Neigungssensoren sowie der Referenzsensoren dargestellt. Im Temperaturverlauf sind größere Schwankungen zu erkennen. Ab Tag 75 fallen die Temperaturen deutlich. Die ermittelten Neigungen nehmen bis zu Tag 80 recht stark zu. Danach ist eine geringere Zunahme zu beobachten. Weiterhin ist der Zusammenhang mit dem Temperaturverlauf deutlich erkennbar.

Die Kompensation der Temperatureffekte in Scale-Faktor und Bias werden mithilfe der entsprechenden Verläufe (siehe Abbildung 96) kompensiert. Die sich ergebenden temperaturkompensierten Neigungen sind in Abbildung 109 dargestellt. Dabei ergeben sich für den Neigungssensor 1 größere Drifts und für Sensor 2 kleinere Abweichungen zum Ausgangssignal. Die Kompensation des Drifts erfolgt über das Entfernen eines linearen Trends. Dabei ergeben sich kompensierte Neigungsverläufe, die keine gute Annäherung an die Neigungen der Referenzsensoren darstellen.

In einem zweiten Versuch wurde der Drift der Sensoren mit einer e-Funktion angenähert, wie durch die roten Kurven in Abbildung 110 (oben) dargestellt. Die Annäherung einer Funktion wird dabei auf Basis der Daten bis Tag 80 durchgeführt. Die sich ergebenden, kompensierten Neigungen sind im Vergleich mit den Neigungen der Referenzsensoren in Abbildung 110 (unten) gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturverläufe dem Neigungssignal

noch überlagert sind. Es ergeben sich teilweise große Abweichungen im Vergleich zu den Referenzsensoren. Maximale Abweichungen betragen 17 m°.



Abbildung 108: Erfasste Temperaturen (oben) und Vergleich der unkompensierten Neigungen der MEMS-Sensoren mit denen der Referenzsensoren (unten)



Abbildung 109: Vergleich der unkompensierten und temperaturkompensierten Neigungen der MEMS-Sensoren



Abbildung 110: Kompensation der Neigung durch Entfernen des Trends (oben) und Vergleich der kompensierten Neigungen mit den erfassten Neigungen des Referenzsensors

Aus dem Verlauf der Neigungen, die mit den Referenzsensoren ermittelt wurden, kann eine unterschiedliche Neigungsänderung zwischen den beiden untersuchten Achsen erkannt werden. Der Unterschied zwischen beiden Achsen der Referenzsensoren ist dabei in etwa genau so groß wie die Abweichungen zwischen den beiden Achsen der MEMS-Sensoren.

#### 11.4 Fazit

Die Neigungen des Kirchturmes wurden mit einem Referenzneigungssystem und dem prototypisch entwickelten Messsystem kontinuierlich erfasst. Bei dem Vergleich der ermittelten Neigungsänderungen der Messsysteme zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen beiden Systemen. Die identifizierten Neigungsänderungen der MEMS-Sensoren sind dabei temperaturabhängig. Trotz einer Temperaturkompensation kann der Temperatureffekt nicht vollständig aus den ermittelten Neigungen eliminiert werden.

Insbesondere der Drift der Sensorik bereitet bei der Auswertung der Messdaten Probleme. In diesem Fall konnte der potentielle Drifteffekt am besten mit einer e-Funktion angenähert werden.

Mithilfe des prototypisch entwickelten Messsystems sind Neigungsänderungen im Bereich mehrerer Milligrad auflösbar. Die Verbindung zwischen Server und Raspberry Pi erfolgt durch mobiles Internet. Der Zugriff und die Übertragung der Daten erfolgten ohne Probleme.

## 11.5 Fabrikhalle Griesson – de Beukelaer, Kahla

## 11.5.1 Einführung

Das Unternehmen Griesson – de Beukelaer & Co. KG produziert am Standort Kahla Gebäckwaren. Die Produktionsanlage ist seit Januar 1993 in Betrieb und ist die modernste Gebäckwarenfabrik Europas. Abbildung 111 gibt einen Überblick über das Firmengelände.



Abbildung 111: Produktionsanlage von Griesson – de Beukelaer in Kahla [B29]

Die Produktion befindet sich in einer zweischiffigen Halle. Lager und Versand befinden sich in einer zweiten, ebenfalls zweischiffigen Halle. Die Dächer beider Hallen besitzen eine umlaufende Attika und zahlreiche Oberlichter.

Das Tragwerk in Hallenquerrichtung ist ein Stützen-Binder-System mit einem Querscheibenabstand von 7,5 m. Die Spannbetonbinder spannen stützenfrei über 30 m und tragen die Lasten aus der Dachkonstruktion. In Hallenlängsrichtung spannen Stahltrapezprofile.

## Messaufgabe:

Messaufgabe ist die kontinuierliche Überwachung des Dachtragwerks, insbesondere in der Winterperiode. Das Monitoring soll dabei mit hochgenauen MEMS-basierten Neigungssensoren durchgeführt werden.

#### Umgebungsbedingungen & Besonderheiten:

In den Produktionshallen ist mit Umgebungstemperaturen von 25 °C bis 30°C zu rechnen. Im Dachbereich über der Backstraße kann die Temperatur an heißen Sommertagen gegebenenfalls bis auf 50 °C steigen. Im Ofenbereich sind Aerosole vorhanden, die sich als eine Art Fettniederschlag zeigen.

Es ist zu beachten, dass an die Dachkonstruktion im Halleninnern Stromschienen und diverse Medienleitungen angehängt sind. Aufgrund der teilweise komplexen Verteilwege können diese Lasten nicht eindeutig lastabtragenden Bauteilen zugeordnet werden (Abbildung 112). Darüber hinaus können sich die Anbauten während des laufenden Betriebs ändern.



Abbildung 112: Komplexe Medienverteilsysteme im Halleninnern

#### Bestehendes Monitoringkonzept

Für den Fall extremen Schneefalls gibt es für die Hallenanlagen ein Monitoringkonzept. Dabei sind ab einer möglichen Neuschneehöhe von 100 cm oder einer Nassschneehöhe von 25 cm folgende Maßnahmen durchzuführen:

- 1) Kontrolle der Schneehöhe,
- Ermittlung der Schneelast: Ausstechen einer Schneeprobe mit definiertem Ausstechzylinder und Bestimmung des Gewichts mittels Wägung; gegebenenfalls ist die Dicke der Eisschicht zu bestimmen,
- Bestimmung der Durchbiegungen der Dachkonstruktion: Ermittlung der vertikalen Verschiebungen der Dacheindeckung (Stahltrapezprofile) und der Spannbetonbinder mittels Laser-Distanzmesser an definierten Messstellen.





Abbildung 113: Abstandsmessung an vordefinierten Messpunkten (links) und im Boden verankerte Messmarken (rechts)

Insgesamt wurden für die beiden Hallen 29 Messstellen festgelegt. In Abhängigkeit der Schneehöhe sind die vorgenannten Maßnahmen gegebenenfalls mehrmals täglich zu wiederholen. Bei Erreichen von vorgegebenen Grenzwerten ist der zuständige Statiker zu informieren, der über weitere Maßnahmen entscheidet. Die Durchbiegungsermittlungen erfolgen als Längenmessung zwischen zwei markierten Messpunkten. Dazu wurden an den Spannbetonbindern und den Trapezprofilen zur genauen Zielerfassung Meterrissmarken

angebracht. Die darunter befindlichen Messpunkte wurden mit dem Lot eingemessen und mithilfe von Messingbolzen markiert. In Abbildung 113 sind die Abstandsmessung und die in den Hallenboden eingelassenen Messingbolzen dargestellt.

Das bestehende Monitoringkonzept beinhaltet direkte Messungen der Verformung des Dachtragwerks im Bedarfsfall. Es ist mit einem großen manuellen Aufwand verbunden und bietet keine kontinuierliche Überwachung des Tragwerks. Weiterhin muss davon ausgegangen werden, dass keine Verformungen der Bodenplatte auftreten.

### 11.5.2 Geplantes Vorgehen

Entsprechend der Messaufgabe soll das statische Verhalten des Dachtragwerks kontinuierlich überwacht werden. Im Rahmen der Untersuchung an Referenzobjekten sollen reale Daten am Bauwerk gesammelt, die Zuverlässigkeit und Robustheit des alternativen Messsystems überprüft sowie praktische Erfahrung am Bauwerk gesammelt werden.

Die messtechnische Erfassung von Neigungen kann nur an ausgewählten Messstellen durchgeführt werden. Kritische Stellen für den Lastfall Schnee sind Bereiche, in denen es zu Schneeanhäufungen kommen kann. Beispielsweise an den tiefergelegenen Dachbereichen vor aufgehenden Wänden können sich Schneeanwehungen bilden genauso wie in den Randbereichen mit Attika. Mögliche Bereiche für die Überwachung des Dachtragwerks sind in Abbildung 114 markiert. Im Fall von Schneeanwehungen ergeben sich in diesen Bereichen höhere Lasten, welche zu größeren Tragwerksverformungen führen können.



Abbildung 114: Höhensprünge im Dachbereich mit der Möglichkeit größerer Schneeanwehungen [B29]

Einer dieser Bereiche soll mit dem alternativen Messsystem instrumentiert werden. Dabei sind die Auflagerneigungen eines Spannbetonbinders im Randfeld des Daches messtechnisch zu erfassen.

## 11.5.3 Herausforderung bei der Planung der Messaufgabe

Bei der Planung der Installation des Messsystems mussten vorab folgende Fragen geklärt werden:

- In welchen Bereichen der Hallen darf Messtechnik an der Tragkonstruktion installiert werden?
- Sind diese Stellen mit einer Hebebühne erreichbar? Gibt es eine firmeneigene Hebebühne? Können die Installationsstellen mit der vorhandenen Hebebühne erreicht werden?
- Sind Nachjustierungen zu einem späteren Zeitpunkt möglich?
- Sind Hygienevorschriften zu beachten? Wenn ja, welche?
- Welche Methoden der Applizierung sind aus Sicht des Betreibers zulässig? Darf gebohrt werden?
- Ist zur Installation des Messsystems eine Sperrpause in der Produktion nötig?
- Wer darf die Messtechnik anbringen? Nur hausinterne Haustechniker oder externe Personen?
- Wie kann eine Stromzufuhr und Netzwerkanschluss gewährleitet werden?
- Kann das Messsystem in das Firmennetzwerk integriert werden?
- Wie kann von außerhalb auf die Messdaten zugegriffen werden?
- Mit welcher Geschwindigkeit können Daten zwischen Messstelle und Projektserver übertragen werden?
- Kann ein Fernzugriff vor der Installation getestet werden?
- Können gegebenenfalls Probebelastungen durchgeführt werden?

Die Klärung dieser Fragen vor der eigentlichen Installation ist essentiell und eine aktive Unterstützung der Vorbereitung durch den Betreiber und Nutzer der Industrieanlage notwendig. In Absprache mit dem Betreiber, der an dieser Stelle auch gleichzeitig Nutzer der Halle ist,

konnten alle diese Fragen im Vorhinein geklärt werden. Dazu gehörten:

- Festlegung der Messstellen bei Vorortbegehung
- Verlegung von Stromanschluss und Netzwerkanschluss durch den Betreiber
- Absprachen zur Installation
- Test des Fernzugriffs auf ein vor Ort befindliches Messsystem.

Zur Überwachung des Dachtragwerks soll an einem Dachbinder des tieferliegenden Dachbereichs vor dem Höhensprung in Halle 2 (siehe Abbildung 114) ein Messsystem installiert werden.

In Absprache mit dem Systemadministrator wurden die Möglichkeiten eines Fernzugriffs erörtert und deren Umsetzbarkeit diskutiert. Ein Zugriff auf einen beschränkten Adress-Bereich innerhalb des Firmennetzwerks wurde gewährt. Die Messsysteme werden mit einer festen-IP-Adresse innerhalb dieses Bereiches versehen. Auf diese kann mithilfe eines VPN-Tunnels zugegriffen werden.

#### 11.5.4 Vorbetrachtungen

Zur Verfügung gestellte Statische Unterlagen und ein Gutachten [40] über die Dachtragfähigkeit unter Schneelast wurden gesichtet. Aus letzterem wird bei der Grenzbetrachtung der zulässigen Schneelast ersichtlich, dass die Trapezprofile maßgebend werden: Die vorgespannten Binder besitzen eine hohe Steifigkeit und können im Vergleich mit der Dacheindeckung größere Schneelasten abtragen. Die maximale Schneelast ergibt sich unter Berücksichtigung der zulässigen Verformungen des Trapezprofils.

### Belastung

Die Dachkonstruktion wurde nach der alten DIN-Norm bemessen. Die Schneelast, die nach DIN 1055 Teil 5 (Ausgabe Juni 1975) für den Bauwerksstandort (Schneelastzone III, Geländehöhe max. 180 m ü. NN, keine erhöhte Schneelast) anzusetzen ist, beträgt 0,75 kN/m<sup>2</sup>.

An den Randfeldern, die an eine aufgehende Wand grenzen, wurde ein Schneekeil über die Breite zweier Felder angesetzt (siehe Abbildung 115). Dabei beträgt die Schneelast maximal 1,50 kN/m<sup>2</sup> am Höhensprung.



Abbildung 115: Schematische Darstellung der Schneelast mit Schneeanwehung an der aufgehenden Wand

Weiterhin wurden folgen Lasten aus der ursprünglichen Statik angesetzt:

- 0,142 kN/m<sup>2</sup> für das Eigengewicht
- 0,60 kN/m<sup>2</sup> für ständigen Lasten aus Dachaufbau (Dampfsperre, 15 cm Dämmung, Deckprofil)
- 0,48 kN/m<sup>2</sup> als Windlast (Sog)

#### Spannbetonbinder

Der Spannbetonbinder überspannt eine Breite von 30 m. Die Dachträger liegen, wie in Abbildung 116 dargestellt, in einem Abstand von 7,5 m.



Abbildung 116: Querschnitt und Geometrie des Spannbetonbinders

Der Binder ist gevoutet, besitzt einen Doppel-T-Querschnitt, und ist mit 20 geraden Litzen vorgespannt. Die Querschnittshöhe verändert sich linear und beträgt 120 cm am Auflager und 165 cm in Trägermitte.

In erster Annäherung wurde unter Annahme einer konstanten Trägerhöhe und unter Berücksichtigung von Eigengewicht und gegebener Vorspannkraft über den Nachweis der Dekompression die "aufnehmbare" (konstante) Schneelast ermittelt. Diese ergibt sich zu 0,76 kN/m<sup>2</sup> und entspricht daher der angesetzten Regelschneelast von 0,75 kN/m<sup>2</sup>.

Ebenfalls unter der Annahme einer konstanten Steifigkeit ergeben sich für eine konstante Schneelast eine Mittendurchbiegung von 1,3 cm und eine Neigung in den Auflagern von 80 m° (siehe Tabelle 10). Unter Berücksichtigung eines einseitigen Schneekeils (siehe Abbildung 115) erhöhen sich die Durchbiegungen näherungsweise auf 2,0 cm und die Auflagerneigungen auf rund 120 m°.

In Tabelle 10 sind in Abhängigkeit der Schneehöhe die Durchbiegungen in Trägermitte und die Neigungen angegeben. Da wird von einer konstanten Schneehöhe ausgegangen. Als Wichte für Neuschnee wird 1 kN/m<sup>3</sup> und für Nassschnee 4 kN/m<sup>3</sup> angenommen.

Insbesondere der Durchbiegungsnachweis zeigt die hohe Steifigkeit des Binders:

$$u_{max} = 2,0 \text{ cm} < \frac{L}{300} = \frac{3000 \text{ cm}}{300} = 10 \text{ cm}$$

Tabelle 10:Prognostizierte Durchbiegung in Trägermitte und Neigung in Abhängigkeit von<br/>der Schneehöhe

Schneehöhe	Schneelast	Durchbiegung Mitte	Neigung
10 cm Pulverschnee	0,10 kN/m <sup>2</sup>	0,2 cm	11 m°
20 cm Pulverschnee	0,20 kN/m <sup>2</sup>	0,3 cm	21 m°
75 cm Pulverschnee	0,75 kN/m²	1,3 cm	80 m°
10 cm Nassschnee	0,40 kN/m <sup>2</sup>	0,7 cm	43 m°
20 cm Nassschnee	0,80 kN/m <sup>2</sup>	1,4 cm	85 m°
30 cm Nassschnee	1,20 kN/m <sup>2</sup>	2,1 cm	128 m°

#### Stahltrapezprofil

Das Trapezprofil spannt über 4 Felder á 7,5 m. Am mittleren Stoß sind zwei Einzelelemente biegesteif miteinander verbunden. Bei der Annahme eines Durchlaufträgersystems lassen sich die Verformungen des Trägers unter Schneelast bestimmen. Unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Profils (Fischer FI 165/200;  $I_y = 652,8 \frac{\text{cm}^4}{\text{m}}$ ) ergeben sich die größten Verformungen des Tragprofils in den Endfeldern. Unter Ansatz einer gleichförmigen Schneelast ergeben sich maximale Verdrehungen von 230 m° im Endfeld und bei zusätzlichem Schneekeil über zwei Felder erhöhen sich die Verdrehungen auf 438 m°.

Die Auflagersituation des Stahltrapezprofilblechs konnte jedoch nicht eindeutig geklärt werden. Des Weiteren wird erwartet, dass sich bei dem Stahltrapezprofil nicht zu vernachlässigende Verformungen infolge Temperaturänderungen einstellen. Am Stahltrapezprofil wird daher nur testweise ein Messsystem installiert.

#### Zusammenfassung Messkonzept

In einem ausgewählten Dachbereich mit dem Risiko einer Schneeanwehung soll das Dachtragwerk der Produktionshalle an einem Spannbetonbinder kontinuierlich überwacht werden. Dazu werden an dem Spannbetonbinder auflagernah Neigungssensoren installiert. Die Auslegung des Messsystems erfolgt in Teilen redundant.

#### 11.5.5 Anforderung an das Messsystem und die Datenverarbeitung

Für das Messsystem und die Datenverarbeitung wurden folgende Anforderungen formuliert:

- die Neigungen sind kontinuierlich zu erfassen;
- die Messdaten sind über eine Minute zu Mitteln und in Blockdateien lokal zu speichern;
- die Speicherung der Messdaten soll redundant auf zwei Speichern erfolgen;
- die Mittelwerte sind weiterhin als Tagesdateien zusammenzufassen und strukturiert abzuspeichern;
- die Datenspeicherung soll auf einem externen Speicher (beispielsweise einem USB-Stick) erfolgen;
- ein Online-Zugriff auf das Messsystem ist zu gewährleisten, um die Anpassung von Systemparametern zu ermöglichen und um die Messdaten zu übertragen;
- nach einem Stromausfall soll die Messung automatisch gestartet werden, wobei die entsprechenden Konfigurationseinstellungen des Sensors zu berücksichtigen sind;
- für nachträgliche Fehlersuche nach Systemabstürzen sind Systemparameter wie Auslastung von CPU und RAM sowie Temperatur zu speichern.

Insbesondere ist wichtig, dass ein automatischer Neustart des Messsystems nach Stromausfall oder Systemabsturz gewährleistet ist, um auch von der Ferne Fehlerbehebungen, Konfigurationsanpassungen und den Zugang zu den Messdaten zu ermöglichen. Idealerweise ist ein automatisches Starten der Messung nach einem Neustart zu implementieren, um Messunterbrechungen so gering wie möglich zu gestalten.

Zur weiteren Überwachung des Messsystems ist eine Funktionalität zu implementieren, die automatisiert Warnungen über Systemausfälle per Mail versenden kann. In der Praxis kann diese Aufgabe von einem externen Server ausgeführt werden. Dieser muss in regelmäßigen Abständen eine Verbindung zu dem Messsystem aufbauen. Wenn das System mehrfach nicht zu erreichen ist, dann ist eine Email an eine verantwortliche Person zu senden.

#### 11.5.6 Installation des prototypischen Messsystems

Am Referenzobjekt wurden am 22.11.2016 die entwickelten Messsysteme zur kontinuierlichen Überwachung des Dachtragwerks installiert. Die Messsysteme bestanden dabei aus einem Raspberry Pi (Modell 2 B) Mikrocontroller, an denen jeweils ein MEMS-basierter Neigungssensor von First Sensor angeschlossen wurde. Vor Installation des Messsystems wurden ausführliche Tests zur Validierung der Funktion des Messsystems durchgeführt

Der Spannbetonbinder wird an beiden Trägerenden auflagernah mit einem Messsystem ausgerüstet. Die Lage der Messpunkte B1 und B2 kann Abbildung 117 und Abbildung 118 entnommen werden. Dabei werden an der Messstelle B1 ein Neigungssensor und an Messstelle B2 zwei Neigungssensoren angebracht.

Die installierten Messsysteme bestehen aus Mikrocontroller (Raspberry Pi 2), USB-Speicherstick sowie MEMS-Neigungssensor und sind für die Messstellen B1 und B2 in Abbildung 119 dargestellt. Die Neigungssensoren wurden auf einem Stahlwinkel verschraubt. Dieser Stahlwinkel wurde durch Verschraubung dauerhaft und kraftschlüssig mit dem Binder verbunden. Das Messsystem wurde zum Schutz vor Verschmutzung sowie dem Schutz der ungehausten Sensoren in ein Installationsgehäuse integriert.



Abbildung 117: Darstellung der Lage der Messstellen des Spannbetonbinders



Abbildung 118: Seitenansicht mit Lage der Messstellen des Spannbetonbinders



Abbildung 119: Installierte Messsysteme an den Messstellen B1 (links) und B2 (rechts)



Abbildung 120: MEMS-Neigungssensoren auf Stahlwinkel

Zur Installation wurden verschiedene Hubarbeitsbühnen (Scheren- und Schwenkarmhubbühne) benötigt, um die Sensorik auflagernah unter den gegebenen Bedingungen installieren zu können. Abbildung 121 (links) zeigt die Installation unter beengten Verhältnissen. Stromversorgung und Netzwerkanschluss für die installierten Messsysteme wurde seitens des Betreibers in die Dachebene verlegt.



Abbildung 121: Installation des Messsystems mit Hubarbeitsbühne (links); Messstelle B2 (rechts oben) und Spannbetonbinder in Dachebene (rechts unten)

#### 11.5.7 Identifikation von Schneefallereignissen

Die kritische Belastung für den betrachteten Spannbetonträger ist der Lastfall Schnee. Während der Messperiode kam es im Winter zu drei Schneefallereignissen mit sehr geringen Schneehöhen.

Nach Installation konnte in den Neigungen, wie in dem durchgeführten Langzeitversuch (siehe Abschnitt 10.1), eine Warmlaufphase der Sensoren beobachtet werden. Die Messergebnisse werden daher erst ab dem 1.12.2016 dargestellt. In Abbildung 122 ist der Temperatur- und Neigungsverlauf während des Winterquartals exemplarisch für die beiden Sensoren an Messstelle B2 dargestellt. In den Temperaturverläufen sind starke Schwankungen der

Temperatur zu erkennen, die periodisch auftreten. Diese sind auf einen Wochenzyklus der Produktion in der Backstraße zurückzuführen. Die Temperaturen schwanken dabei um bis zu 15 K. Die in Abbildung 122 (unten) dargestellten Neigungsverläufe sind unkompensiert und zeigen ebenfalls große Schwankungen, die analog zur Temperatur verlaufen. Dabei zeigt sich, dass bei einem Absinken der Temperatur die Neigungen ansteigen und bei Erwärmung die Verdrehungen abnehmen. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Neigungen von der Temperatur ist eine Temperaturkompensation notwendig.



Abbildung 122: Verlauf der Temperaturen (oben) und unkompensierten Neigungen (unten) der beiden Sensoren an Messstelle B2 während der Winterperiode 1. Dezember 2016 – 1. März 2017

Die Kompensierung der Neigungen erfolgt dabei auf Basis der Temperaturabhängigkeit der Rohdaten (siehe Abschnitt 10.1), wobei die erfassten Messwerte der ersten 30 Tage zu Grunde gelegt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass innerhalb dieses Zeitraums keine physikalische Verdrehung des Trägers stattgefunden hat.

Die kompensierten Neigungsverläufe sind gemeinsam mit der Temperatur für den Zeitraum 31.12.2016 – 20.1.2017 in Abbildung 123 dargestellt. In diesem Zeitraum wurden drei Schneefallereignisse an Tag 32, 38 und 44 (in Januar 2017) identifiziert. Der Beginn der Schneefallereignisse ist durch einen Vertikalstrich gekennzeichnet. Bei den Schneefallereignissen können aus den kompensierten Neigungsverläufen Neigungsänderungen identifiziert werden. Diese betragen beispielsweise für Sensor B2-1 zwischen 6 m° und 8 m° und entsprechen zwischen 5 cm und 7 cm Neuschneehöhe (Pulverschnee). Auf Anfrage beim Hallenbetreiber konnten an den jeweiligen Daten Bodenschneehöhen von 3 cm bis 5 cm ermittelt werden. Die auf Basis der Messwerte ermittelten Schneehöhen weichen geringfügig von den tatsächlichen, am Boden gemessenen Schneehöhen ab.

Kritisch hierbei ist die Temperaturkalibrierung zu betrachten. Durch die Kalibrierung in den Rohdaten wird ein linearer Zusammenhang zwischen Neigung und Temperatur angenommen. Bei einer perfekten Kalibrierung sollten sich die beiden Neigungsverläufe in Abbildung 123 überlagern beziehungsweise parallel verlaufen, da beide Sensoren an der gleichen Stelle am Träger installiert sind. Geringe Unterschiede sind zu erkennen. Ebenfalls wird deutlich, dass nicht alle Temperatureffekte kompensiert wurden, da in bestimmten Bereichen noch kleine Abhängigkeiten zum Temperaturverlauf zu erkennen sind.

An dieser Stelle gilt jedoch zu beachten, dass es sich bei der vorhandenen Schneelast nur um einen Bruchteil der Bemessungsschneelast handelt. Die identifizierten Neigungsänderungen liegen im Bereich von weniger als 10 m°, wohingegen die Bemessungsschneelast Verdrehungen bis 80 m° bei einer gleichmäßig verteilten Einzellast hervorrufen sollte. Die während des Messzeitraums aufgetretenen Neigungsänderungen sind daher um den Faktor 10 geringer. Daher wird davon ausgegangen, dass die kritische Belastung mit einer gewissen Unschärfe identifiziert werden kann.



Abbildung 123: Verlauf der Temperaturen und kompensierten Neigungen der beiden Sensoren an Messstelle B2 zwischen 31.12.2016 und 20.1. 2017

Die Erfassung der Neigungen am Trapezprofil erfolgte testweise. Die großen Temperaturschwankungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Verdrehungen des Stahltrapezprofilblechs. Die Befestigungsbasis sollte jedoch keine temperaturbedingten Verdrehungen aufweisen. Im Falle einer auftretenden Auflast und gleichzeitiger Temperaturänderungen können aufgrund der Überlagerung keine Neigungsänderungen identifiziert werden.

Die Auswirkung der Temperaturschwankungen auf den Spannbetonbinder wird nachfolgend untersucht, um zu ermitteln, ob Temperaturänderungen zusätzliche Neigungsänderungen hervorrufen.

### 11.5.8 Installation eines Temperaturmesssystems

Zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf den Spannbetonträger wurde am 5.3. 2017 ein Temperaturmesssystem am untersuchten Binder installiert. Dabei wurde ein Kombimessgerät mit Datenlogger vom Typ Ahlborn Alemo 2890 verwendet (siehe Abbildung 124). Das Messgerät besitzt einen Akku und einen Modus für eine Dauermessung, sodass eine mittelfristige Aufzeichnung der Temperaturen gewährleistet ist



Abbildung 124: Kombimessgerät mit Temperaturfühlern (links) und installiertes Temperaturmesssystem am Binder (rechts)

An das Temperaturmesssystem wurden zwei Temperaturfühler angeschlossen, welche, wie in Abbildung 124 zu erkennen, jeweils die Temperatur an der Oberkante und Unterkante des Binders erfassen. Zur Abschirmung von Wärmestrahlungen wurden die Temperatursensoren mit einem aluminiumbeschichteten Kunststoffpapier abgedeckt. Die Temperaturen wurden mit einer Messung je Minute für eine Messdauer von über 2 Wochen erfasst. Weiterhin wurden mithilfe der Wärmebildkamera des Caterpillar S60 Thermorgrafien des Binders vor dem Start der Messung aufgenommen (siehe Abbildung 125 rechts).

Sowohl aus dem Verlauf der gemessenen Temperaturen an Ober- und Untergurt als auch aus den Thermografie-Aufnahmen in Abbildung 125 geht hervor, dass nur geringe Abweichungen zwischen der Obergurt- und Untergurttemperatur auftreten. Über die gesamte Messdauer treten im Mittel Unterschiede von 0,2 K bei maximalen Abweichungen von 0,5 K auf. Dabei entsprechen die mittleren Temperaturunterschiede einer Änderung der Auflagerneigung von knapp über 1 m° und der Mittendurchbiegung von 0,2 mm. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Oberflächentemperaturen gemessen wurden. Der massive Spannbeton-binder wird sich nur recht langsam erwärmen. Die Kerntemperaturen in den Gurten werden dadurch deutlich reduzierten Schwankungen ausgesetzt, als sie an der Oberfläche auftreten. Dabei tritt auch ein zeitlicher Verzug auf. Die oben angegebenen Verformungen sind auf Basis eines linearen Temperaturunterschiedes zwischen Ober- und Untergurt ermittelt. Dieser wird sich aufgrund der genannten Gründe am Bauteil nicht einstellen. Es wird daher geschlussfolgert, dass die Temperaturänderungen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Krümmung des Binders und somit auf die Neigungsänderungen haben.



Abbildung 125: Verlauf der Temperaturen an Ober- und Untergurt (links) und Thermografie-Aufnahme des Spannbetonbinders (rechts)

## 12 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden wissenschaftliche und anwendungsbezogene Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von Neigungssensoren zur Bauwerksüberwachung bearbeitet. Neuartige, auf der MEMS-Technologie basierende Sensoren und hochmoderne Mikrocontroller bilden dabei die Grundlage für ein innovatives Messsystem zur Erfassung lokaler Verdrehungen an Tragwerken, welches aufgrund seiner Kompaktheit, Modularität und der vergleichsweise geringen Kosten als Alternative zu kostenintensiven, proprietären Lösungen gelten kann. Das prototypisch entwickelte Messsystem vereint alle Prozesse der Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung in einem System. Aufgrund der geringen Kosten ermöglicht es, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, sodass zukünftig zum Beispiel Hallentragwerke verlässlich überwacht werden können, um so zu einer dauerhaft sicheren Nutzbarkeit beizutragen.

Mithilfe der MEMS-Neigungssensoren werden lokale Verdrehungen am Tragwerk erfasst, die unter Verwendung mechanischer Zusammenhänge zur Ermittlung des Beanspruchungszustandes im Tragwerk genutzt werden können. Wesentlich ist im Kontext der hier verfolgten Messung mit Neigungssensoren, dass Verformungen ein integrales Abbild des gesamten Tragwerkverhaltens geben, während zum Beispiel Dehnmessstreifen nur lokale Beanspruchungen aufzeigen können.

Zunächst wurden mögliche Einsatzszenarien im Zusammenhang mit der neigungsbasierten Bauwerksüberwachung identifiziert. Für die drei Einsatzszenarien zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs von Gebäuden, zum Einsatz an historischen Bauwerken und zum Einsatz in Risikogebieten für geotechnische Ereignisse wurden typische Bauwerke abgeleitet und die jeweilige Messaufgabe sowie die erforderlichen Genauigkeiten der Neigungserfassung definiert. Die Anforderungen an die Messung variieren geringfügig zwischen den Einsatzszenarien. Die von dem Neigungssensor aufzulösenden Rotationen liegen dabei im Bereich von 2 - 5 Milligrad.

Während des Projektes wurde ein prototypisches Messsystem auf Basis eines Raspberry Pi Mikrocontrollers in mehreren Ausbaustufen entwickelt. Dabei wurde ein Software-Framework für die kontinuierliche Erfassung, die strukturierte Speicherung und die Verarbeitung von Messdaten entwickelt. Neben der Konfiguration und Datenabfrage der Sensorik und der Entwicklung einer Client-Software zur Durchführung von Messungen wurden ebenfalls praktikable Konzepte zum Dateiformat und zur Datenübertragung an einen Speicher-Server entwickelt. Die Funktionsweise der implementierten Algorithmen wurde umfänglich getestet, um die Anforderung an Langzeitstabilität und Verlässlichkeit zu erfüllen.

Das entwickelte Software-Framework ist modular aufgebaut, sodass verschiedene Arten von Sensorik mit geringem Aufwand zusätzlich integriert werden können, um z.B. Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Stickoxid-Konzentration oder ähnliche Parameter zu messen.

Die MEMS-basierten Neigungssensoren wurden speziellen Hardware-Tests und Laborexperimenten in verschiedenen Ausbaustufen des Sensors unterzogen und Aussagen bezüglich der erreichbaren Datenqualität gemacht. Die Genauigkeit der Sensoren liegt bei Kurzzeitmessungen (< 2 Stunden) im Bereich unter 1 Milligrad. Zur Anpassung der Sensorik an den Einsatz im Bauwerksmonitoring wurde die Sensorhardware in geeignete Gehäuse integriert und der Einfluss verschiedener Kapselungstechnologien auf die erreichbare Datenqualität ermittelt. Von besonderem Interesse war dabei die Langzeitstabilität der Sensorik. Sowohl an ungehausten als auch an gehausten Sensoren konnten bei den Untersuchungen Drifterscheinungen festgestellt werden, wobei der Drift des Bias (Nullpunktverschiebung) dominant ist. Es zeigt sich weiterhin, dass der Sensordrift zwischen baugleichen Sensoren erheblichen Streuungen in Größe und sogar Richtung des Drifts unterworfen ist, so dass dieser nicht ohne Weiteres bei der Interpretation von Langzeitmessungen berücksichtigt werden kann. Bei Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit wurde weiterhin festgestellt, dass der Bias des Sensors maßgeblich zum Gesamtfehler beiträgt. Ohne weitere detailliertere Material- und Komponentenoptimierungen beziehungsweise ohne den Einsatz alternativer Methoden zur inrun Bias-Kompensation wird die Gesamtgenauigkeit der eingesetzten Sensoren nicht besser als zirka ±50 m° sein. Dies ist im Zusammenhang mit dem Einsatz zur Langzeitüberwachung von Bauwerken als kritisch zu bewerten. Für den Einsatz am Bauwerk, bei dem Verdrehungen im Bereich weniger Milligrad über einen langen Zeitraum sicher zu detektieren sind, ist der Drift zur Zeit noch zu groß. Weitere Untersuchungen und fortschreitende Anpassungen sind notwendig.

Kritische Lastzustände von Tragwerken können unter Anwendung der mechanischen Zusammenhänge und mittels verschiedener Annahmen zum Systemverhalten aus Verformungsmessungen detektiert werden. Zur quantitativen Bewertung verschiedener Sensoranordnungen wurde eine Methodik entwickelt, die auf der Identifikation mechanischer Zielgrößen wie Biegemomenten, Spannungen und Durchbiegungen basiert, über die kritische Zustände beschrieben werden können. Die Definition eines Qualitätsmaßes berücksichtigt dabei die Unsicherheit in den auftretenden Lasten. Unterschiedliche Sensoranordnungen wurden an zwei statischen Systemen untersucht, um die Effizienz der Methode aufzuzeigen. Der Einfluss von Messunsicherheiten und Lastbeschränkungen wurde ebenfalls dargestellt. Die Methodik eignet sich zur Bestimmung optimaler Sensoranordnungen und kann als Basis für die Planung von Sensoranordnungen dienen.

In Laboruntersuchungen wurden praktische Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung von Neigungen mit dem prototypisch entwickelten Messsystem gesammelt. Stufenweise wurden dabei die Software und die implementierten Methoden verbessert. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Bauteilversuche durchgeführt. Mithilfe des Messsystems wurden die Neigungen eines biegebeanspruchten Stahlbetonbalkens mit verschiedenen Ausbaustufen erfasst. Nachdem in einem ersten Experiment noch größere Abweichungen der ermittelten Neigungen im Vergleich zu einer Referenzmessung beobachtet wurden, konnte durch Anpassung der Konfigurationseinstellungen die Genauigkeit in einem zweiten Biegeversuch deutlich gesteigert werden. Dabei lagen die Abweichungen in den ermittelten Neigungen im Mittel über den verschiedenen Laststufen im Bereich von 2 m°.

Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Sensorik im Zusammenspiel mit dem Mikrocontroller wurde eine Langzeitmessung durchgeführt. Dabei konnten verschiedene Effekte, wie Aufheizphasen der Sensorik, beobachtet werden, welche zwei bis drei Tage andauerten, bevor ein stabiles Signal erreicht wurde. Teilweise war auch eine starke Temperaturabhängigkeit des Signals festzustellen. Maßnahmen zur Kompensation von Temperaturabhängigkeit und Sensordrift wurden diskutiert. Eine Identifikation des Drifts anhand der Messdaten war nicht immer eindeutig möglich. Die Temperaturabhängigkeit und der Drift konnten jedoch für die einzelnen Sensoren abgeschätzt werden. Einer der Sensoren lieferte ein ausgesprochen inkonsistentes Verhalten, wodurch eine Interpretation der Messwerte im Feinbereich unmöglich wurde. Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich die einzelnen Sensoren unterschiedlich verhalten und daher eine allgemeingültige Aussage für derartige Sensoren möglich ist.

Das entwickelte Messsystem wurde an zwei Referenzobjekten installiert um die Praxistauglichkeit unter realen Einsatzbedingungen nachzuweisen. Als Referenzobjekte wurden eine Industriehalle, bei der das Dachtragwerk zu überwachen war, und ein Kirchturm, bei dem die langfristige Veränderung der Schiefstellung zu überwachen war, gewählt. Die Anforderungen bezüglich der Planung der Messaufgabe wurden detailliert dokumentiert. Am Referenzobjekt Kirchturm wurden die Neigungen mit einem Referenzsensor hochpräzise erfasst. Die mit den MEMS-Neigungssensoren ermittelten Messdaten zeigten Temperaturabhängigkeiten und Drifterscheinungen. Trotz einer Kompensation der beiden Effekte konnten Änderungen in der Schiefstellung des Turms nicht mit ausreichend hoher Genauigkeit erfasst werden. Teilweise konnten Abweichungen zum Referenzsensor von mehr als 10 m° beobachtet werden, was im Größenbereich der tatsächlichen Neigungsänderungen lag.

Am Referenzobjekt Hallentragwerk war das Ziel die Überwachung des Daches. Dabei sollten insbesondere Schneefallereignisse identifiziert werden. Neigungssensoren wurden dazu an einem Spannbetonbinder installiert. Aufgrund von Wochenzyklen der Backproduktion konnten große Temperaturschwankungen beobachtet werden. Diese hatten einen großen Einfluss auf die ermittelten Neigungsänderungen. Durch Kompensationsmaßnahmen war es jedoch möglich, drei Schneefallereignisse mit einer Unschärfe im Bereich von 2 Milligrad zu identifizieren. Ein größeres Schneefallereignis, bei welchen deutlich größere Verdrehungen zu erwarten sind fand im Untersuchungszeitraum nicht statt.

Im Rahmen des Projekts konnte das Anwendungspotential für eine neue Generation effizienter Monitoringsysteme aufgezeigt werden. Insbesondere bei Kurzzeitmessungen können lokale Verdrehungen an einer Tragstruktur mit dem entwickelten Messsystem mit einer hohen Genauigkeit erfasst werden. Die unter Anwendung einer Temperaturkompensation messbaren Neigungsänderungen erlauben die Detektion schon kleinster Belastungseffekte.

Vor allem bei der Anwendung für Langzeitmessungen bestehen noch erhebliche Herausforderungen. Während sich die Komponenten des Systems auch unter widrigen Umgebungsbedingungen als dauerhaft einsatzfähig erwiesen haben, führen insbesondere Drifteffekte des Sensorsignals zu großen Unschärfen. Die hier verwendeten Prototypen der Sensoren zeigen ein quasi nicht vorhersehbares und weit streuendes Driftverhalten, das einer Kompensation nicht zugänglich zu sein scheint.

Die Driftproblematik kann umgangen werden, wenn eine drehbare Installation verwendet wird, bei der durch Umschlagsmessung der Einfluss des Drifts eliminiert wird. Durch weiterführende Untersuchungen beziehungsweise Entwicklungen könnten auch Langzeitmessungen dem Messsystem erschlossen werden.

Mithilfe des prototypisch entwickelten, modularen Messsystems und der entwickelten Methoden kann eine Überwachung von Tragwerken auf Basis von Neigungsmessungen effizient erfolgen. Die erforderliche Genauigkeit bei der Neigungsmessung wird derzeit bei Langzeitmessungen von den hier untersuchten Sensorprototypen noch nicht erreicht. Eine Integration eines andersartigen Neigungssensors ist ohne großen Aufwand möglich, insofern dieser über eine entsprechende Kommunikationsschnittstelle verfügt.

# 13 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsprojektes, vor allem auch im Zusammenhang mit der Erprobung des prototypisch entwickelten Messsystems an den Referenzbauwerken, wurde weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert. Dieser betrifft den Bereich der Sensorik und die Datenaufbereitung und Datenauswertung. Dabei ist insbesondere der Sensordrift und dessen Verringerung beziehungsweise dessen Kompensation von Interesse. Zunächst sind neue experimentelle Methoden bzw. Messprogramme zu entwickeln, anhand derer der Drift getrennt vom Temperatureinfluss quantifiziert werden kann. Das Driftverhalten muss in seinen Abhängigkeiten von physikalischem Verhalten sowie der Dauer und der Beanspruchung des Sensors noch besser verstanden werden, um eine Kompensation desselben zu ermöglichen.

Während des Forschungsprojekts wurden bei den Langzeitmessungen an den Referenzbauwerken große Mengen an Daten gesammelt. In Bezug auf die vorhandenen Messdaten stellt sich die Frage, welche Daten in welcher Form langfristig vorzuhalten sind und wie dies möglichst sinnvoll geschehen sollte. Hier erscheint es gerade vor dem Hintergrund komplexerer multisensorischer Messsysteme mit sehr heterogenen Daten und unterschiedlichen Abtastraten und Datenaufkommen vielversprechend, eine kontextuelle Verknüpfung der Daten mit dem Bauwerk bzw. seinen Teilen herzustellen. Hierzu kann die Anwendung von Bauwerksinformationsmodellen (BIM – Building Information Modelling) sinnvoll sein.

Das identifizierte Forschungs- und Entwicklungspotential ist nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst.

Forschungsbedarf Sensorik:

- Untersuchungen zur genauen Ursache sowie einer Quantifizierung der Abhängigkeiten des Drifts
- Optimierung der Sensorik zur Verringerung oder Stabilisierung des Drifts
- Untersuchung der Langzeitstabilität bei Verwendung eines keramischen Sensorboards

Forschungsbedarf Datenauswertung und -aufbereitung:

- Kompensationsmethoden für Sensordrift
- Kommunikation einzelner Messsysteme untereinander zum Abgleich von Messdaten

Forschungsbedarf Weiterverwendung der Bauwerksdaten:

- Modellierung der Daten und der daraus extrahierten Informationen zur konsistenten langfristigen Speicherung in dafür optimierten Daten(bank)strukturen
- Speicherung von Messdaten durch Bezüge zu digitalen Bauwerksmodellen

# Quellenverzeichnis

## Literaturquellen

- Bayrischer Rundfunk: "Extremwetter durch Klimawandel Mehr Starkregen, Dürren, Hitzewellen und Orkane". Online seit 26.07.2017. http://www.br.de/themen/wissen/wetter-extremwetter-klimawandel-100.html [15.10.2017]
- [2] Knauer, R.: Welt: "Wetter ändert sich in Deutschland besonders krass". Online seit 13.09.2016. https://www.welt.de/wissenschaft/article158110222/Wetter-aendert-sich-in-Deutschland-besonders-krass.html [12.10.2017]
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen – Feinkonzept des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk Wissen – Können – Handeln", Juni 2017.
- [4] Wolf, N.: "Das Unglück, das Bad Reichenhall für immer veränderte". Online seit 01.01.2016. https://www.welt.de/regionales/bayern/article150478855/Das-Unglueck-das-Bad-Reichenhall-fuer-immer-veraenderte.html [16.10.2017]
- [5] Seite "Eislaufhalle Bad Reichenhall". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 10. Oktober 2017. https://de.wikipedia.org/wiki/Eislaufhalle\_Bad\_Reichenhall [10.10.2017]
- [6] FAZ.net: "Polnische Messehalle eingestürzt. Zwei Deutsche unter den Toten von Kattowitz". Online seit 29.01.2006. http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/polnische-messehalle-eingestuerztzwei-deutsche-unter-den-toten-von-kattowitz-1303795.html [17.10.2017]
- [7] Deutsches Institut für Normung: DIN 1055-5:2005-07, Einwirkungen auf Tragwerke Teil 5: Schnee- und Eislasten. Beuth Verlag, Berlin 2005.
- [8] Wieg, C.: "Mehr als 700 Hallen in Deutschland auf ihre Standsicherheit hin untersucht". Online seit 09.07.2007. https://www.bauingenieur24.de/url/700/1854
   [17.10.2017]
- [9] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 6200:2010-02 Standsicherheit von Bauwerken Regelmäßige Überprüfung. Beuth-Verlag, Köln, 2010.
- [10] WeltN24: "Schneemassen bringen viele Dächer zum Einsturz", Online seit 3.2.2010. https://www.welt.de/vermischtes/article6237502/Schneemassen-bringen-viele-Daecher-zum-Einsturz.html [16.10.2017]
- [11] Ostthüringer Zeitung Online: "Lagerhalle in Hermsdorf bricht unter Schneemassen zusammen", Online seit 24.12.2010. http://otz.de/web/mobil/blaulicht/detail/-/specific/Lagerhalle-in-Hermsdorf-bricht-unter-Schneemassen-zusammen [16.10.2017]
- [12] Claus, A.; Lehnberg, M.: "Wenn der Schnee zur Last wird". Online seit 28.12.2010. http://www.general-anzeiger-bonn.de/region/Wenn-der-Schnee-zur-Last-wirdarticle33872.html [16.10.2017]

- [13] Digitales Pressedienstarchiv Lübeck Travemünde: "Zu viel Schnee auf den Dächern: Stadt sperrt Sporthallen", 3.2.2010. http://www.travemuende.de/aktuelles/presse/pressedienstarchiv/view/2010/2/100076 R/ [16.10.2017]
- [14] Peine Allgemeine Online: "Turnhalle: Einsturzgefahr bei Schneelast". Online seit 30.10.2014. http://www.paz-online.de/Peiner-Land/Lahstedt/Turnhalle-Einsturzgefahrbei-Schneelast [17.10.2017]
- [15] BBC Online: "Roofs collapse under weight of snow in US". Online seit 25.6.2016. http://www.bbc.com/news/world-us-canada-35398210 [26.2.2017]
- [16] Liveleak. "Roofs collapse under heavy snow in Bend, Oregon". Online seit 14.1.2017. https://www.liveleak.com/view?i=eaa\_1484385915 [26.2.2017]
- [17] Ridler. K.; "Buildings collapsing under weight of snow in U.S. West". Online seit 24.1.2017. https://www.thestar.com/news/world/2017/01/24/buildings-collapsingunder-weight-of-snow-in-us-west.html [26.2.2017]
- [18] Seite "Liste schiefer Türme". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 1.10.2017. https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\_schiefer\_Türme [18.10.2017]
- [19] Marek, J.: MEMS-Sensoren im Überblick. http://www.all-electronics.de/wpcontent/uploads/migrated/article-pdf/115617/ael07-02-016.pdf [27.5.2016]
- [20] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1990:2010-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [21] Deutsches Institut f
  ür Normung: DIN EN 1992-1-1:2011-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln f
  ür den Hochbau. Beuth Verlag, Berlin 2011.
- [22] Deutsches Institut f
  ür Normung: DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln f
  ür den Hochbau. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [23] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeines
   Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [24] Bathe, K.-J., Zimmermann, P.: Finite-Elemente Methoden. 2. erw. Auflage, Springer, Berlin 2002.
- [25] Raue, E.: Nichtlineare Querschnittsanalyse als Optimierungsproblem. Bautechnik 82. 11 (2005), S. 796-809.
- [26] Xingmin, H., Xueshan, Y., Qiao, H.: Using Inclinometers to Measure Bridge Deflections. Bridge Constr. 2004. S. 69-72.
- [27] Bolle, G.; Schwesinger, P.; Stockmann, A.: Begleitende Neigungsmessungen, Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Brücken in situ zur Substanzerhaltung und zur Verminderung der Umweltbelastung, Zwischenbericht, Kooperatives Forschungsprojekt 01-RA 9601/6, Hochschule Bremen, Eigenverlag, 1997.
- [28] Hentsch, I.: Untersuchungen zur experimentellen Verformungsermittlung biegebeanspruchter Stahlbetonbauteile mittels Neigungsmessung. Masterarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2015.

- [29] Debus, P.: Erstellung eines Software-Frameworks zur Kommunikation mit Sensorhardware. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2015.
- [30] Banana Pi: Banana Pi vs. Raspberry Pi. https://www.golem.de/news/raspberry-pi-2-schnell-rechnen-langsam-speichern-1502-112107-3.html [17.8.2015]
- [31] Datenblatt Real Time Clock PCF2129, NXP Semiconductors, Rev. 7 19.12.2014 https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF2129.pdf [16.10.2017]
- [32] Raspbian. https://www.raspbian.org [18.8.2015].
- [33] RT Patch: https://rt.wiki.kernel.org/index.php/CONFIG\_PREEMPT\_RT\_Patch [10.10.2017]
- [34] Linux Synchronisationswerkzeug rsync: https://rsync.samba.org [18.10.2017]
- [35] Cronjobs für planmäßige Dateiübertragungen: https://linux.die.net/man/8/cron [19.10.2017]
- [36] Deutsches Institut f
  ür Normung: DIN EN 60749-23:2011-07 Halbleiterbauelemente Mechanische und klimatische Pr
  üfverfahren – Teil 23: Lebensdauer bei hoher Temperatur (IEC 60749-23:2004 + A1:20111). Beuth Verlag, Berlin 2011.
- [37] Hinnen, H.; Gassner, M.; Jaray, M.; Müller, E.: Wyler Kompendium Die Geheimnisse der Neigungsmesstechnik, 1. Auflage, Wyler AG, Winterthur, Schweiz, 2012.
- [38] Rau, S.; Morgenthal, G.: An assessment framework für sensor-based detection of critical structural conditions with consideration of load uncertainty. Structures, 2017 (12), S. 168-178
- [39] Morgenthal, G.; Abbas, T.; Hallermann, N.: Zwischenbericht "Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken - Fortsetzungsprojekt" (SWD-10.08.18.7-16.36)
- [40] Baustatisches Gutachten: Dachtragfähigkeit bei Schnee, Griesson, Kahla; SGHG Ingenieurgesellschaft Bautechnik mbH, 2014.
- [41] Goris; A.: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen, Werner Verlag, Köln 2006.
- [42] Bötzl, J.; Martin, H.-D.: Einflußlinien. Baustatik in Beispielen und Aufgaben Teil 4. VDI-Verlag, Düsseldorf 1989.

#### Bildquellen

- [B1] http://polpix.sueddeutsche.com/bild/1.995118.1355804645/940x528/halleinsturz-badreichenhall.jpg [20.4.2016]
- [B2] Bildschirmfoto von https://www.youtube.com/watch?v=6bDlkiGZoV8 [27.2.2017]
- [B3] Albright, Michael.: https://www.liveleak.com/view?i=eaa\_1484385915 [27.2.2017]
- [B4] Brainerd, Jason.: https://www.thestar.com/news/world/2017/01/24/buildings-collapsingunder-weight-of-snow-in-us-west.html [27.2.2017]
- [B5] Blossey, H.: http://www.nmz.de/online/vom-erdboden-verschluckt-die-musikstadt-koeln-verliert-ihr-historisches-archiv [20.4.2016]
- [B6] Maier, Chrisian: http://www.fotocommunity.de/photo/der-schiefe-turm-von-bad-frachristian-maier-amarok/25782120 [18.10.2017]

- [B7] dpa: http://www.geo.de/GEO/natur/oekologie/geologie-interview-wenn-die-erdewegbricht-66063.html?t=img&p=1 [20.4.2016]
- [B8] https://de.sott.net/article/24752-Wieder-ein-Erdrutsch-in-Nachterstedt [22.4.2016]
- [B9] Urian 57: https://www.fotocommunity.de/photo/der-schiefe-turm-von-jena-derpulverturm-urian-57/21979419 [20.4.2016]
- [B10] Kit Shellin: http://mapio.net/pic/p-55374407 [1.10.2017]
- [B11] Wubs, Denis: http://mapio.net/o/685282 [20.4.2016]
- [B12] Evan Amos: https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry\_Pi [20.10.2017]
- [B13] raspberrypi.org: https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b [20.10.2017]
- [B14] Raspberry Pi 2 B: https://www.raspberrypi.org/app/uploads/2015/01/Pi2ModB1GB\_comp.jpeg [10.10.2015]
- [B15] Arduino Mega 2560: https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3 [10.10.2015]
- [B16] BeagleBone: http://beagleboard.org/bone-original [10.10.2015]
- [B17] Banana Pi 2: http://www.banana-pi.com/tp/2014120900025873342.JPG [10.10.2015]
- [B18] Odroid C1+: http://www.vesalia.de/d\_odroidc1.htm [10.10.2015]
- [B19] Raspberry Pi Modell 3 B: https://www.element14.com/community/docs/DOC-81294/l/raspberry-pi-3-model-b-with-1gb-of-ram-with-wifi-and-bluetooth-low-energy [9.10.2015]
- [B20] Banana Pi: http://i.computer-bild.de/imgs/7/8/8/3/5/7/9/Lemaker-Banana-Pi-M3-1024x576-254af39192a9bafd.jpg [9.10.2015]
- [B21] Arduino Uno: https://www.robotistan.com/arduino-uno-r3-clone-with-usb-cable-usb-chipch340 [9.10.2015]
- [B22] Odroid C2: http://www.hardkernel.com/main/products/prdt\_info.php?g\_code=G145457216438 [9.10.2015]
- [B23] BeagleBone Black: https://www.reichelt.de/Einplatinen-Computer/BEAGLEBONE-BLACK/3/index.html?ACTION=3&GROUPID=6666&ARTICLE=143499 [9.10.2015]
- [B24] Asus Tinker Board: https://arstechnica.com/gadgets/2017/01/asus-tinker-board-pricespecs-release-date [9.10.2015]
- [B25] Orange Pi Plus: http://www.giga.de/extra/linux/specials/orange-pi-one-plus-2e-pc2-im-vergleich-hardware-spezifikationen-mehr [9.10.2015]
- [B26] Intel Galileo Gen2: https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000006355/boards-and-kits/intel-galileo-boards.html [9.10.2017]
- [B27] Spezial- und Hybridgehäuse Electrovac: http://www.electrovac.com/produkte/spezial-hybridgehaeuse/index.html [23.5.2016]
- [B28] Bopla Aluminiumgehäuse: https://www.bopla.de/de/gehaeusetechnik/product/euromaspolymas/euromas-polymas-gehaeuse/pk-101.html [23.5.2016]
- [B29] Griesson de Beukelaer, Werk Kahla: http://www.griessondebeukelaer.de/deDE/unternehmen/standorte/kahla [24.02.2016]

# Glossar

ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung; elektronische Schaltung mit festgelegter Funktion; engl. application integrated circuit
ASSP	Anwendungsspezifisches Standardprodukt, ASIC-Baustein; engl. application- specific standard product
Bias	Nullpunktverschiebung bzw. Achsenabschnitt in den Rohdaten [LSB]
CPU	Prozessor, zentrale Recheneinheit, engl. central processing unit
Framework	Programmiergerüst, Rahmenstruktur einer Software
12C / 1²C	serieller Datenbus nach dem Master-Slave-Prinzip, engl: inter-integrated circuit
Gain	Verstärkungsfaktor; Signalverstärkung
GPIO	Allzweckeingabe/ –ausgabe Kontaktstift (Pin) an einem Mikrocontroller, der einen bestimmten Zweck besitzt. Ein- oder Ausgang für allgemeine Zwecke, der frei programmierbar ist. engl. <i>general purpose input/output</i>
GPIO-Port	Zusammenfassung mehrerer GPIO-Pins zu einem logischen Kanal, engl. port. Beispiel: SPI, I2C, UART Schnittstelle
HTTP	Hypertext-Übertragungsprotokoll, zur Datenübertragung über ein Rechnernetz, engl. hypertext transfer protocol
LSB	Festlegung der Bitwertigkeit für die serielle Datenübertragung mit Referenz zum niedrigwertigsten Bit, Ganzzahlen; engl. least significant bit
Offset	Versatz
Pin	Kontaktstift, beispielsweise am GPIO-Port
RPC	Protokoll zur Interprozesskommunikation; zum Aufruf einer Prozedur auf einem entfernten Rechner, von engl. Remote Procedure Call
Scale	Skalierungsfaktor; Sensitivität des Sensors; Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Rohdaten des Sensors [LSB/g]
SPI	synchroner serieller Datenbus für digitale Schaltungen nach dem Master-Slave- Prinzip; engl. serial peripheral interface
SSH	Netzwerkprotokoll zur verschlüsselten Netzwerkverbindung von entfernten Geräten, engl. secure shell
UART	serielle Schnittstelle zum asynchronen Senden und Empfangen von Daten, engl. universal asynchronous receiver transmitter
UML	vereinheitliche Modellierungssprache, engl. unified modeling language
XML	Erweiterbare Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten, engl. extensible markup language