

Guido Morgenthal, Sebastian Rau, Markus Nowack

Effizientes Bauwerksmonitoring mit MEMS-Neigungssensoren und Mikrocontrollern

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 reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen 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

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	5
2	Projektdaten	6
2.1	Eckdaten	6
2.2	Projektbeteiligte.....	6
2.3	Projekthalt	7
3	Motivation 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	Messtechnische 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	Prototypisches 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	40
5.4.1	Anforderungen an die Datenerfassung und Datenverarbeitung	40
5.4.2	Datenerfassung und Mittelwertbildung	41
5.5	Datenfluss	43
6	Anpassung 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	Identifikation 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	Experimentelle 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	Bauteilversuche.....	85
9.1	Biegeversuch an einem Stahlbetonbalken.....	85
9.1.1	Versuchsaufbau	85
9.1.2	Neigungsmessung mit dem entwickelten Messsystem	86
9.1.3	Versuchsdurchführung	86
9.1.4	Versuchsauswertung.....	86
9.1.5	Anmerkungen.....	88
9.2	Wiederholung des Biegeversuches an einem Stahlbetonbalken	88
9.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	88
9.2.2	Neigungsmessung mit dem untersuchten Messsystem	89
9.2.3	Versuchsauswertung.....	90
9.3	Fazit	93
10	Untersuchung der Langzeitstabilität.....	94
10.1	Langzeitmessung mit ungehausten Sensoren.....	94
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	99
10.1.6	Fazit	100
10.2	Dauermessung mit gehausten Sensoren.....	101
10.2.1	Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 1	102
10.2.2	Kompensation von Temperatur und Drift – Ansatz 2	103
10.2.3	Fazit	105
11	Messungen an Referenzobjekten.....	106
11.1	Anforderungen	106
11.2	Übersicht Referenzbauwerke	107
11.3	Stadtkirche St. Marien in Freyburg	108

11.3.1	Einführung.....	108
11.3.2	Geplantes Vorgehen	108
11.3.3	Herausforderung bei der Planung der Installation.....	109
11.3.4	Durchgeführte Maßnahmen.....	110
11.3.5	Vergleich der Neigungen zwischen Referenzsystem und MEMS-Sensoren	115
11.4	Fazit	117
11.5	Fabrikhalle Griesson – de Beukelaer, Kahla.....	118
11.5.1	Einführung.....	118
11.5.2	Geplantes Vorgehen	120
11.5.3	Herausforderung bei der Planung der Messaufgabe	121
11.5.4	Vorbetrachtungen.....	121
11.5.5	Anforderung an das Messsystem und die Datenverarbeitung.....	124
11.5.6	Installation des prototypischen Messsystems	124
11.5.7	Identifikation von Schneefallereignissen.....	126
11.5.8	Installation eines Temperaturmesssystems.....	129
12	Zusammenfassung.....	131
13	Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	134
	Quellenverzeichnis.....	135
	Glossar.....	139