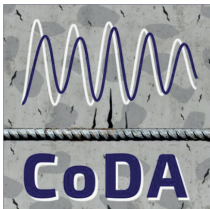


Felix Clauß

Thermo-Mechanical Investigations of Reinforced Concrete Structures Using Coda Wave Interferometry



Concrete Damage
Assessment by
CoDA Waves

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2022-02

**RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM**

RUB

Thermo-Mechanical Investigations of Reinforced Concrete Structures Using Coda Wave Interferometry

by

Felix Clauß, M. Sc.

Ph.D. Thesis

for the degree of

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

**Faculty of Civil and Environmental Engineering
Ruhr University Bochum**

Bochum, February 2022

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2022-2

Felix Clauß

**Thermo-Mechanical Investigations of
Reinforced Concrete Structures Using
Coda Wave Interferometry**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8698-0

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

You can't stop the waves, but you can learn to surf.
— JON KABAT-ZINN

Abstract

Civil engineering structures are aging. Ultrasonic coda waves offer an auspicious opportunity to monitor this deterioration. Coda waves detect changes both sensitively and integrally over wide regions, rendering them suitable for monitoring entire structures. Current approaches with coda wave-based monitoring of concrete (structures) focus on specimens that are only a few centimeters small or on detecting cracks in reinforced concrete. The empirical model introduced in this thesis enables evaluating the load-bearing capacity of reinforced concrete structures subjected to bending using coda waves. The model involves the complex material behavior of reinforced concrete, from the linear-elastic range to the range of cracking and completed cracking.

The underlying methodology is based on mechanical, thermal and thermo-mechanical experiments on reinforced concrete beams. Ultrasonic measurements are evaluated using coda wave interferometry. This method yields the relative velocity change. The strain of the component is used as a reference. Investigations into the application, assembly and accuracy of strain measurement techniques reveal fiber optics as a suitable technique. Mutual influences of strain and temperature effects in fiber optic measurements were quantified. In this manner, strains are recorded quality-assured quasi-continuously along the fiber and provide detailed information on initial and later also progressive cracking.

The relative velocity change is correlated with the measured strain. The idea is based on the volume-like collection of influences by coda waves. Following this, the strain of the reinforcement is likewise averaged across a region. The correlation of the two respective quantities (relative velocity change and average steel strain) exhibits a linear relationship. This gives a first-order approach. Using this approach, the strain of the beam can be accurately calculated via the relative velocity change. Statistically, the model is of high quality ($R^2 = 0.99$) and low error (RMSE $\approx 0.09\%$).

Consequently, it becomes feasible to monitor reinforced concrete structures by means of ultrasonic measurements and to accurately indicate the load-bearing capacity even under progressive cracking.

Kurzfassung

Infrastrukturbauwerke altern. Um ihre Deterioration im Blick zu behalten, bieten sich Ultraschall Codawellen an. Sie erfassen sensitiv und zugleich integral Zustandsänderungen in großen Bereichen und eignen sich dadurch hervorragend zur Überwachung ganzer Strukturen. Aktuelle Ansätze zur codawellenbasierten Zustandsüberwachung fokussieren sich auf Probekörper in der Größe weniger Zentimeter oder die Erkennung von Rissen in Stahlbetontragwerken. Der in dieser kumulativen Dissertation vorgestellte empirische Ansatz ermöglicht es die Tragfähigkeit von biegebeanspruchten Stahlbetonstrukturen mit Ultraschall Codawellen zu bewerten. Der Ansatz berücksichtigt das komplexe Materialverhalten von Stahlbeton vom linear-elastischen Bereich über die beginnende Rissbildung bis hin zum abgeschlossenen Rissbild.

Die zugrunde liegende Methodik basiert auf mechanischen, thermischen und thermo-mechanischen Versuchen an Stahlbetonbalken. Die Ultraschallmessungen werden mit der Codawelleninterferometrie ausgewertet. Aus Zustandsänderungen resultiert die relative Geschwindigkeitsänderung. Als Referenz dient die Dehnung des Bauteils. In Untersuchungen zur Anwendung, Montage und Genauigkeit von Dehnungsmesstechniken wird die Faseroptik als geeignet nachgewiesen. Gegenseitige Beeinflussungen von Dehnungs- und Temperatureinflüssen in faseroptischen Messungen wurden quantifiziert. Dehnungen werden auf diese Weise qualitätsgesichert, quasi-kontinuierlich entlang einer Faser aufgenommen und liefern genaue Informationen über die beginnenden und später auch fortschreitende Rissbildung.

Die relative Geschwindigkeitsänderung wird mit der gemessenen Dehnung in Korrelation gesetzt. Die Idee basiert auf der volumenartigen Akkumulation von Einflüssen durch Codawellen. Inspiriert davon, wird die Dehnung des Bewehrungsstahls bereichsweise zusammengefasst. Die Korrelation der beiden Größen (relative Geschwindigkeitsänderung und mittlere Bauteildehnung) zeigt einen linearen Zusammenhang. Daraus folgt ein Ansatz erster Ordnung, mit dessen Hilfe die Dehnung des Bauteils über die relative Geschwindigkeitsänderung treffend vorausgesagt werden kann. Statistisch weist das Modell eine hohe Güte ($R^2 = 0.99$) und einen geringen Fehler ($RMSE \approx 0.09\%$) auf. Praktisch ist es so möglich, Stahlbetonstrukturen mithilfe von Ultraschallmessungen zu überwachen und auch unter fortschreitender Rissbildung die Tragfähigkeit stets genau anzugeben.

Preamble

This thesis was written between 2019 and 2022 during my work as a research assistant at the Institute of Concrete Structures at Ruhr University Bochum. It was accepted as a Ph.D. thesis by the Department of Civil and Environmental Engineering of Ruhr University Bochum.

First of all, I would like to express my gratitude to Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark for giving me the opportunity to work at his institute and for his ongoing guidance, encouragement, and support. Thank you to Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen and PD Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger for the invariably enriching cooperation within the research unit CoDA and for taking over the second and third opinions, respectively. Moreover, I would like to thank Prof. Dr. sc. techn. habil. Markus Knobloch for chairing the examination commission.

Special thanks go to Dr.-Ing. Mark Alexander Ahrens for the valuable exchange and the careful review of the manuscript. I would like to thank all colleagues at the Institute of Concrete Structures and at the Structural Testing Laboratory KIBKON for the pleasant time.

Lastly, I would like to express my deepest gratitude to my family and friends—my parents and my brother for their constant encouragement, Lukas for your interdisciplinary support, and especially you, Anna, for always having my back and promoting me in every situation in life.

Bochum, June 2022

Felix Clauß

Date of submission: February 24, 2022

Date of oral examination: June 15, 2022

1st referee: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark,
Ruhr University Bochum, Germany

2nd referee: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen,
Technical University of Munich, Germany

3rd referee: PD Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger,
Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany

4th referee: Prof. Dr. sc. techn. habil. Markus Knobloch,
Ruhr University Bochum, Germany

Contents

Abstract	iii
Preamble	vii
Contents	ix
List of Publications	xv
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Research Unit	5
1.3 Objectives	6
1.4 Outline	7
1.5 Synopsis	7
1.5.1 Framework of Investigations	7
1.5.2 Comparative Evaluation of Strain Measurement Techniques	9
1.5.3 Temperature Induction into RC Structures	10
1.5.4 Thermo-Mechanical Impacts on Fiber Optic Measurements	12
1.5.5 Comparison of Strain Fields and Mapped US Data	13
1.5.6 Correlation of Strain and Velocity Change of Coda Waves	15
2 A Comparative Evaluation of Strain Measurement Techniques in Reinforced Concrete Structures—A Discussion of Assembly, Application, and Accuracy	17
2.1 Introduction	18
2.2 Underlying Principles of Strain Measurement Techniques	19
2.2.1 Strain Gauges	19
2.2.2 Fiber Optic Sensors	19
2.2.3 Digital Image Correlation	20
2.3 Experiments	21
2.3.1 Tension Rod	21
2.3.2 Four-Point Bending Test	24

2.4	Comparison of Strain Measurement Techniques	27
2.4.1	Assembly and Application	27
2.4.2	Accuracy and Error Evaluation	29
2.5	Conclusions	34
3	Temperature Induction into RC Structures	37
3.1	Einleitung	38
3.2	Methoden zur Temperaturinduktion	39
3.2.1	Auswahl der Methoden	39
3.2.2	Temperiertes Wasser	39
3.2.3	Heizmatte	40
3.2.4	Infrarotstrahler	41
3.2.5	Peltier-Kühlung	42
3.3	Diskussion	44
3.3.1	Elektrische Leistung	44
3.3.2	Temperaturregelung	44
3.3.3	Temperaturübergang	46
3.3.4	Fixierung am Bauteil	46
3.3.5	Interaktion mit dem Bauteil und Verluste	47
3.3.6	Fazit	47
3.4	Anwendung: Erzeugung eines Temperaturgradienten	48
3.4.1	Versuchsaufbau und -durchführung	48
3.4.2	Versuchsergebnisse	48
3.4.3	Empfehlungen	51
3.5	Schlussfolgerung	52
4	Thermo-Mechanical Experiments on Reinforced Concrete Beams—Assessing Thermal, Mechanical and Mixed Impacts on Fiber Optic Measurements	55
4.1	Introduction	56
4.2	Fiber Optics	57
4.3	Experiments	59
4.3.1	Specimens	59
4.3.2	Sensor Placement and Installation	60
4.3.3	Test Set-Up and Experimental Procedure	63
4.3.4	General Results	64
4.4	Individual Impacts and Interaction	65
4.4.1	Preface to the Discussion	65
4.4.2	Mechanical Load	66
4.4.3	Thermal Load	67
4.4.4	Combined Thermo-Mechanical Load	70
4.5	Conclusions	72

5	Comparison of Experimentally Determined Two-Dimensional Strain Fields and Mapped Ultrasonic Data Processed by Coda Wave Interferometry	75
5.1	Introduction	76
5.2	Principles of Measuring Methods	77
5.2.1	Strain Measurements	77
5.2.2	Ultrasound	79
5.3	Experiments	81
5.3.1	Method of Investigation	81
5.3.2	Test Set-Up	82
5.3.3	Results	84
5.4	Comparison of US Results and Strain Fields	87
5.4.1	Non-Cracked to Slightly Cracked State	87
5.4.2	Completed Crack Pattern and Increasing Crack Widening	89
5.5	Conclusions	91
6	Correlation of Load-Bearing Behavior of Reinforced Concrete Members and Velocity Change of Coda Waves	93
6.1	Introduction	94
6.2	Methods	96
6.2.1	Sensing Structures with Ultrasound	96
6.2.2	Load-Bearing Behavior of Flexural RC Members	98
6.3	Experiments	101
6.3.1	Experimental Setup	101
6.3.2	Placement of Measuring Equipment	102
6.3.3	Concreting and Curing	103
6.3.4	Load Control	103
6.3.5	Proof of Concept	104
6.4	Results and Discussion	105
6.4.1	Development of the Relative Velocity Change with Time and Load	105
6.4.2	Establishing a Correlation Function	107
6.4.3	Impact of the Transducer Distance	108
6.5	Conclusions	109
7	Supplement: Fiber Optic Sensing of Strain and Temperature Fields	111
7.1	Einleitung	112
7.2	Grundlagen der faseroptischen Messung	113
7.2.1	Messprinzipien	113
7.2.2	Sensorfasern	114
7.2.3	Applikation	115
7.2.4	Randbedingungen	118
7.3	Quasikontinuierliche Messsysteme mittels Rayleigh-Rückstreuung	119
7.3.1	Funktionsweise und Eigenschaften	119

7.3.2	Grenzen der Auflösung	120
7.4	Anwendungen	121
7.4.1	Allgemeines	121
7.4.2	Dehnungsmessungen an Ankerschienen	121
7.4.3	Temperaturmessungen in Betonbauteilen	123
7.5	Schlussfolgerungen	125
8	<i>Supplement: Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Temperature Induction</i>	127
8.1	Einleitung	128
8.2	Methode der Temperaturinduktion	130
8.2.1	Theoretische Grundlagen	130
8.2.2	Momentensteuerung durch Temperaturinduktion	131
8.2.3	Technische Umsetzung	132
8.3	Temperaturinduktion bei Tragwerksverstärkungen	133
8.4	Experimentelle Untersuchungen	134
8.4.1	Versuchsziel	134
8.4.2	Versuchsaufbau	134
8.4.3	Versuchsablauf	136
8.4.4	Ergebnisse	138
8.5	Diskussion der Ergebnisse	141
8.6	Schlussfolgerungen	142
9	<i>Supplement: Damage Detection at a Reinforced Concrete Specimen with Coda Wave Interferometry</i>	145
9.1	Introduction	146
9.2	Ultrasound Methods	147
9.2.1	Basics	147
9.2.2	Diffusion Approximation	148
9.2.3	Sensitivity Kernel	149
9.2.4	Imaging with an Inverse Problem	149
9.2.5	Imaging with Influence Areas	150
9.3	Experiment	150
9.4	Results	153
9.4.1	Decorrelation Investigations on Selected Measurement Pairs	153
9.4.2	CWI Damage Localization	154
9.5	Discussion	158
9.5.1	Overall Discussion with an Outlook to General Improvements	158
9.5.2	Crack Detection and Related Challenges	158
9.5.3	Comparison of Imaging Approaches	159
9.6	Conclusion	159

10 Conclusions	161
A Work Share in Publications	165
B Complementary Test Data	169
B.1 Initial Remarks	169
B.2 Specimen 1	169
B.3 Specimen 2	175
B.4 Specimens 3 & 4	177
B.4.1 Mechanical Test	177
B.4.2 Thermal Test	178
B.4.3 Thermo-Mechanical Test	182
Bibliography	185

List of Publications

- Chapter 2 CLAUB, F.; AHRENS, M. A. and MARK, P. *A Comparative Evaluation of Strain Measurement Techniques in Reinforced Concrete Structures—A Discussion of Assembly, Application, and Accuracy*. *Structural Concrete*, 2021. 22(5): pp. 2992–3007. doi: 10.1002/suco.202000706.
- Chapter 3 CLAUB, F.; LÖSCHMANN, J.; AHRENS, M. A. and MARK, P. *Temperaturinduktion in Betontragwerke – Experimentelle Untersuchungen zur Methode*. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2021. 116(7): pp. 539–550. doi: 10.1002/best.202100010.
- Chapter 4 CLAUB, F.; AHRENS, M. A. and MARK, P. *Thermo-Mechanical Experiments on Reinforced Concrete Beams—Assessing Thermal, Mechanical and Mixed Impacts on Fiber Optic Measurements*. Submitted to *Structural Concrete* in December, 2021.
- Chapter 5 CLAUB, F.; EPPLE, N.; AHRENS, M. A.; NIEDERLEITHINGER, E. and MARK, P. *Comparison of Experimentally Determined Two-Dimensional Strain Fields and Mapped Ultrasonic Data Processed by Coda Wave Interferometry*. *Sensors*, 2020. 20(14): 4023. doi: 10.3390/s20144023.
- Chapter 6 CLAUB, F.; EPPLE, N.; AHRENS, M. A.; NIEDERLEITHINGER, E. and MARK, P. *Correlation of Load-Bearing Behavior of Reinforced Concrete Members and Velocity Change of Coda Waves*. *Materials*, 2022. 15(3): 738. doi: 10.3390/ma15030738.
- Chapter 7 KONERTZ, D.; LÖSCHMANN, J.; CLAUB, F. and MARK, P. *Faseroptische Messung von Dehnungs- und Temperaturfeldern*. *Bauingenieur*, 2019. 94(7/8): pp. 292–300. doi: 10.37544/0005-6650-2019-07-08-70.
- Chapter 8 LÖSCHMANN, J.; CLAUB, F. and MARK, P. *Verstärken von Stahlbetontragwerken mit Temperaturinduktion*. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2020. 115(10): pp. 746–757. doi: 10.1002/best.202000038.
- Chapter 9 GRABKE, S.; CLAUB, F.; BLETZINGER, K.-U.; AHRENS, M. A.; MARK, P. and WÜCHNER, R. *Damage Detection at a Reinforced Concrete Specimen with Coda Wave Interferometry*. *Materials*, 2021. 14(17): 5013. doi: 10.3390/ma14175013.