

Diss. ETH Nr. 14490

# **Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken**

Abhandlung  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
Stefan Köppel  
Dipl. Bauingenieur ETH  
geboren am 6. Juli 1971  
Bürger von Au SG

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Thomas Vogel, Referent  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt, Korreferent

2002

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit soll die Möglichkeiten und Grenzen der Schallemissionsanalyse (SEA) zur zerstörungsfreien Prüfung von Stahlbetontragwerken untersuchen und so zu ihrer Anwendbarkeit beitragen. Einleitend wird das Prinzip der SEA kurz erläutert und das Ziel der Arbeit umrissen (Abschnitt 1).

Die Grundlagen der SEA, aufgeteilt in die theoretischen Modelle zur Entstehung und Ausbreitung von SE im Werkstoff einerseits und die Beschreibung des Messvorgangs andererseits, werden in einem ersten Teil erörtert (Abschnitt 2). Schallemissionen (SE) sind elastische Wellen, die bei der spontanen Freisetzung von Energie in einem belasteten Prüfkörper entstehen. Mit dem Modell der Dislokationsquelle können SE infolge Rissbildung durch die Rissorientierung und -öffnungsrichtung beschrieben werden. Die Ausbreitung der SE als Körperwellen in einem linear-elastischen Werkstoff gehorcht der Wellengleichung. Homogenes Material vorausgesetzt, kann diese auch gelöst und der Zusammenhang zwischen SE-Quelle und an der Prüfkörperoberfläche messbarer Verschiebung analytisch beschrieben werden. Sensoren wandeln die Oberflächenverschiebungen in elektrische Signale um, welche anschliessend verstärkt, digitalisiert und gespeichert werden.

Im zweiten Teil wird ein breites Spektrum verschiedener Möglichkeiten zur Analyse von SE beschrieben (Abschnitt 3). Qualitative Verfahren, welche die Einflüsse der Wellenausbreitung und des Messvorgangs auf die SE-Signale vernachlässigen und auf empirischen Zusammenhängen beruhen, werden nur kurz betrachtet. Bei der Ortung von SE-Quellen aus den gemessenen Laufzeitdifferenzen und beim Vergleich von Signalformen mittels Wellenformanalyse liegt das Schwergewicht auf der Beurteilung der rechnerischen Genauigkeit. Für die quantitative Charakterisierung von SE-Quellen mittels der Momententensorinversion werden verschiedene Verfahren beschrieben und verglichen. Abschnitt 4 enthält einen Abriss über die geschichtliche Entwicklung der SEA und fasst die aus der Sicht des Autors wichtigsten bisherigen SE-Untersuchungen an Beton und Stahlbeton zusammen.

Der dritte Teil dokumentiert die Erkenntnisse eigener SE-Versuche (Abschnitt 5). Dabei wurden Experimente mit künstlichen SE-Quellen durchgeführt und verschiedene Versuchskörper aus Stahlbeton mechanisch bis zu ihrem Versagen belastet, wobei SE infolge von Schädigungsvorgängen wie Reißen des Betons, Verbundentfestigung oder auch infolge von Reibung entstanden. Verschiedene SEA-Verfahren werden auf die Richtigkeit bzw. Plausibilität der Resultate hin untersucht. Aus den Ortungsergebnissen werden Massnahmen zur Gewährleistung einer hohen Genauigkeit abgeleitet und bewertet. Die quantitative Charakterisierung einzelner SE-Quellen mit der relativen Momententensorinversion, für welche bisher wenig Erfahrungen bei Stahlbeton vorliegen, liefert plausible und rechnerisch zuverlässige Resultate.

Eine ausführlichere Zusammenfassung sowie Schlussfolgerungen im Hinblick auf Möglichkeiten und Grenzen der SEA zur zerstörungsfreien Prüfung von Stahlbetontragwerken befinden sich im abschliessenden Teil der Arbeit (Abschnitt 6).

## Abstract

The aim of the present work is to investigate the possibilities and limitations of acoustic emission (AE) analysis as a non-destructive testing method for reinforced concrete structures, thus contributing to its applicability in practice. By way of introduction the principle of AE is briefly explained and the goals of the work are outlined (section 1).

The fundamentals of AE analysis, namely the theoretical models for the creation and propagation of AE in the material and the description of the measuring process, are dealt with in the first part (section 2). AE is the spontaneous release of localized strain energy in a stressed structure. Using the point dislocation source model, AE resulting from crack formation can be characterised by the crack orientation and slip direction. The propagation of AE as body waves in a linear elastic material is governed by the wave equation. Assuming homogeneous material properties and simple boundary conditions, this equation can be solved yielding an analytical relationship between the AE source and the displacements, which can be measured on the specimen surface. Sensors are used to transform the displacements into electrical signals which are then amplified, filtered, digitised and stored.

In the second part a wide range of different ways of analysing AE is described (section 3). Qualitative methods, which neglect the effects of the measuring process and the wave propagation on the recorded AE signals and are based on empirical correlations, are only considered briefly. Emphasis is put on the assessment of the theoretical accuracy when localizing AE sources and when comparing AE signals by means of waveform analysis. In order to characterise AE sources quantitatively, different moment tensor inversion methods are described and compared with respect to the necessary simplifying assumptions. Section 4 outlines the historical development of AE analysis and summarises those previous experiments with AE in plain and reinforced concrete that are considered most important.

The third part documents the findings from my own AE experiments (section 5). Tests with artificial AE sources were carried out and various reinforced concrete specimens were loaded mechanically up to failure, while AE occurred due to damage processes like cracking of concrete, bond deterioration or due to friction, etc. The location and type of damage process being known approximately in these experiments, AE analysis was judged by its ability to provide correct or plausible results. The results of AE source localization allowed the investigation of the effectiveness of different measures intended to ensure a high accuracy and reliability. Quantitative analysis of selected AE sources using relative moment tensor inversion, which has only rarely been applied to reinforced concrete so far, yielded plausible results.

A more detailed summary as well as some conclusions regarding the possibilities and limitations of AE analysis as a non-destructive testing method for reinforced concrete structures are to be found in the final part (section 6).