

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2007-1

**Hussein Alawieh**

**Zur experimentellen Bestimmung der  
Schwindverformungen von Zementstein**

Shaker Verlag  
Aachen 2007

**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., 2005

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-5943-3

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen dem Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher danke ich sehr herzlich für sein großes Interesse an dieser Arbeit, für die äußerst wertvollen Ratschläge und seine stete Diskussionsbereitschaft. Trotz der arbeitsintensiven Phase nach seiner Berufung an die Ruhr-Universität Bochum gab er mir stets Gelegenheit, meine Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer, der mir in der vakanten Phase des Lehrstuhls in Bochum die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen, für das mir entgegen gebrachte Vertrauen sowie die intensive wissenschaftliche Betreuung. Seine wohlwollende Unterstützung trug wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaft und des Lehrstuhls für Baustofftechnik für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit. Besonderer Dank gebührt Herrn Patrick Dubray und Herrn Dipl.-Ing. Christian Duckheim. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Phys. Peter Kury für seine tatkräftige Unterstützung bei der Verwendung von SSIOD und bei Herrn Dr.-Ing. Erol Erdem für seine stete Diskussionsbereitschaft herzlich bedanken.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meiner Frau Shana. Sie gaben mir stets die nötige Kraft und den Rückhalt, um diese Arbeit abzuschließen.

Bochum, im Juni 2006

Hussein Alawieh

Referenten:

Dissertation eingereicht am 18.05.2005

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Mündliche Prüfung am 10.08.2005

Prof. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer

## **Kurzfassung**

Die Bestimmung der Schwindverformungen von Zementstein stellt seit den ersten experimentellen Untersuchungen eine besondere Herausforderung dar. Ein Vergleich von Ergebnissen verschiedener Quellen führt oft zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen, was den Verlauf sowie die Größenordnung der Schwindverformungen von Zementstein anbelangt. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Messverfahren mit entsprechender Auswertemethodik entwickelt, das es erlaubt, das Trocknungsschwinden von Zementstein in kürzester Zeit und in kleinen Feuchteschritten zu erfassen. Das entwickelte Messverfahren basiert auf der berührungslosen, lasergestützten Messung der Verformungen speziell präparierter filigraner Proben und zeichnet sich durch eine hohe Auflösung aus. Mit den durchgeführten Schwindmessungen konnten die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens bestätigt und tendenzielle Aussagen hinsichtlich der Größenordnung und Verlauf der Schwindverformungen von Zementsteinen angestellt werden.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	EINLEITUNG.....	1
1.2	ZIELSETZUNG.....	2
<b>2</b>	<b>ZEMENTSTEINSTRUKTUR UND WASSERMODIFIKATIONEN .....</b>	<b>3</b>
2.1	ZEMENTGELBILDUNG.....	3
2.2	PORENRAUM UND INNERE OBERFLÄCHE .....	4
2.3	WASSERMODIFIKATIONEN IM ZEMENTSTEIN .....	7
2.4	SORPTIONSVERHALTEN VON ZEMENTSTEIN.....	8
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN ZUM SCHWINDEN UND QUELLEN .....</b>	<b>11</b>
3.1	ALLGEMEIN .....	11
3.2	VERLAUF UND GRÖßENORDNUNG DES TROCKNUNGSSCHWINDENS .....	12
3.2.1	<i>Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Masseverlust.....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Gleichgewichtsfeuchtigkeit. 15</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Reversible und irreversible Schwindverformungen.....</i>	<i>18</i>
3.3	WEITERE SCHWINDARTEN VON ZEMENTSTEIN .....	20
3.3.1	<i>Kapillarschwinden.....</i>	<i>20</i>
3.3.2	<i>Chemisches Schwinden.....</i>	<i>21</i>
3.3.3	<i>Carbonatisierungsschwinden.....</i>	<i>22</i>
3.4	EINFLUSSGRÖßEN.....	23
3.5	PRAKTISCHE BEDEUTUNG UND EMPIRISCHE BERECHNUNGSANSÄTZE .....	26
3.5.1	<i>Zwang- und Eigenspannung infolge Bauteilaustrocknung.....</i>	<i>26</i>
3.5.2	<i>Empirische Berechnungsmodelle.....</i>	<i>27</i>
<b>4</b>	<b>PHYSIKALISCHE STRUKTURMODELLE UND SCHWINDMECHANISMEN.....</b>	<b>30</b>
4.1	MIKROSTRUKTURELLE ZEMENTSTEINMODELLE .....	30
4.2	MECHANISMEN ZUR BESCHREIBUNG DER HYGRISCHEN VERFORMUNGEN .....	33
4.2.1	<i>Ansätze nach Powers .....</i>	<i>33</i>
4.2.2	<i>Mechanismen im Münchner Modell .....</i>	<i>36</i>
4.3	ERWEITERUNG DES MÜNCHNER MODELLS NACH SETZER.....	38

<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES TROCKNUNGSSCHWINDENS VON ZEMENTSTEIN .....</b>	<b>42</b>
5.1	FEUCHTEGRADIENT.....	42
5.2	EINFLUSS DES FEUCHTEGRADIENTEN AUF DIE SCHWINDMESSUNG .....	43
5.3	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGSMETHODEN .....	47
5.3.1	<i>Überblick .....</i>	47
5.3.2	<i>Probekörper .....</i>	48
5.3.3	<i>Messaufbau und -instrumente .....</i>	51
5.3.4	<i>Umgebungsfeuchtigkeit.....</i>	54
<b>6</b>	<b>MESSVERFAHREN ZUR EXPERIMENTELLEN BESTIMMUNG DER FREIEN SCHWINDDEHNUNGEN VON ZEMENTSTEIN.....</b>	<b>56</b>
6.1	AUSGANGSSITUATION.....	56
6.2	GRUNDLAGEN UND MESSPRINZIP .....	57
6.3	PROBEKÖRPER .....	58
6.3.1	<i>Konzept .....</i>	58
6.3.2	<i>Dicken- und Steifigkeitsverhältnis .....</i>	60
6.3.3	<i>Vorversuche zur Festlegung der Parameter für die Schichten (Z) und (S) .....</i>	62
6.3.4	<i>Herstellungs- und Präparationsmethode.....</i>	63
6.4	KOMPONENTEN DES MESSAUFBAUS .....	66
6.4.1	<i>Laser und optische Komponenten.....</i>	66
6.4.2	<i>Positionssensible Detektoren.....</i>	67
6.4.3	<i>Messkammer und Feuchtgenerator.....</i>	70
6.4.4	<i>Geometrische Anordnung des Versuchsaufbaus.....</i>	72
6.5	AUSWERTEMETHODE .....	75
6.5.1	<i>Allgemein .....</i>	75
6.5.2	<i>Experimentelle Ermittlung des Krümmungsradius.....</i>	75
6.5.3	<i>Berechnung der Schwinddehnungen.....</i>	79
6.5.4	<i>Bestimmung des E-Moduls.....</i>	81
6.5.5	<i>Einfluss der Klebeschicht.....</i>	82
6.6	GEOMETRISCHER VERGRÖßERUNGSFAKTOR .....	84
6.7	FEHLERBETRACHTUNG .....	85
6.7.1	<i>Krümmungsradius.....</i>	85
6.7.2	<i>Schwinddehnung.....</i>	88
6.8	HERSTELLUNGSMETHODE FÜR DÜNNWANDIGE HOHLZYLINDER AUS ZEMENTSTEIN .....	91
6.8.1	<i>Überblick .....</i>	91
6.8.2	<i>Herstellungsmethode .....</i>	91

<b>7</b>	<b>ANWENDUNG DES ENTWICKELTEN MESSVERFAHRENS.....</b>	<b>94</b>
7.1	ÜBERBLICK .....	94
7.2	VERLAUF DER PSD-SIGNALE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZEIT .....	94
7.3	PSD-SIGNALE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GLEICHGEWICHTSFEUCHTIGKEIT .	97
7.4	BESTIMMUNG DES KRÜMMUNGSRADIUS.....	99
7.5	BERECHNUNG DER SCHWINDDEHNUNGEN .....	100
7.6	ÜBERPRÜFUNG DER REPRODUZIERBARKEIT.....	101
7.7	DISKUSSION DER GEMESSENEN SCHWINDDEHNUNGEN .....	102
7.7.1	<i>Größenordnung und Verlauf</i> .....	102
7.7.2	<i>Korrelation zwischen Schwinddehnung (<math>\epsilon_h</math>) und chemischem Potential (<math>\mu</math>)</i> .....	104
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>108</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>110</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>120</b>