



Alexander Liebrecht (Autor)

# Phasenübergänge, Frostschwinden und Schrumpfvorgänge im Zementstein

- *Phasenübergänge und Transportmechanismen* -

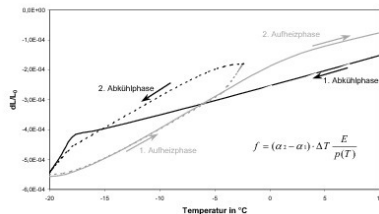
UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

Mitteilungen  
aus dem Institut für  
Bauphysik und  
Materialwissenschaft

## Phasenübergänge, Frostschwinden und Schrumpfvorgänge im Zementstein

Phasenübergänge und  
Transportmechanismen

von  
Alexander Liebrecht



Heft 11

Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer  
Universität Duisburg-Essen

Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2225>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Zementstein und Porenraum .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Zement .....	3
2.1.2	Hydratationsprozess .....	4
2.1.3	Zementsteinmodelle .....	6
2.1.4	Porenraum .....	8
<b>2.2</b>	<b>Wasser und Eis .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Allgemeines .....	10
2.2.2	Eigenschaften des Porenwassers .....	12
<b>2.3</b>	<b>Thermodynamik .....</b>	<b>14</b>
2.3.1	Grundsätze der Thermodynamik .....	14
2.3.2	Mechanisches Potential .....	16
2.3.3	Chemische Stabilität / Potential .....	17
2.3.4	Mechanische Stabilität .....	17
<b>2.4</b>	<b>Unterkühlung und Nukleationsprozesse .....</b>	<b>18</b>
2.4.1	Unterkühlung .....	18
2.4.2	Homogene Nukleation .....	20
2.4.3	Heterogene Nukleation .....	21
2.4.4	Kristallisation .....	23
2.4.5	Gefrierpunktserniedrigung .....	24
<b>2.5</b>	<b>Transportvorgänge .....</b>	<b>27</b>
2.5.1	Temperaturgradient .....	27
2.5.2	Unterschiedliche thermische Ausdehnung .....	27
2.5.3	Mikroislinsen .....	28
2.5.4	Osmose .....	29
2.5.5	Perkolationstheorie nach Scherer .....	30
<b>2.6</b>	<b>Schadenmechanismen .....</b>	<b>31</b>
2.6.1	Makroskopische Schadensmechanismen .....	31
2.6.2	Mikroskopische Schadensmechanismen .....	34
<b>2.7</b>	<b>Mikroislinsenmodell .....</b>	<b>35</b>
<b>2.8</b>	<b>Chemisches Schrumpfen .....</b>	<b>37</b>

---

<b>3</b>	<b>MESSMETHODEN</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b><i>Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)</i></b> .....	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b><i>Längenänderung</i></b> .....	<b>43</b>
3.2.1	Allgemeines.....	43
3.2.2	Messmethode.....	44
<b>3.3</b>	<b><i>Quecksilberdruckporosimetrie</i></b> .....	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>MATERIALIEN UND LAGERUNG</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Materialien</i></b> .....	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b><i>Herstellung und Lagerung</i></b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Phasenübergänge im Zementstein</i></b> .....	<b>51</b>
5.1.1	Eisbildung im Zementstein .....	51
5.1.2	Einfluss der Zusammensetzung der Porenlösung.....	55
5.1.3	Einfluss der Fremdoberflächen auf die Eisbildung .....	58
<b>5.2</b>	<b><i>Thermische Dehnung, Schädigungsmechanismen und Transportvorgänge im Zementstein</i></b> .....	<b>60</b>
5.2.1	Messbedienungen und Versuchsdurchführung.....	60
5.2.2	Dehnungsverhalten der Zementsteinproben mit unterschiedlichem Feuchtegehalt .....	62
5.2.3	Einfluss unterschiedlicher Porensysteme auf das Dehnungsverhalten des Zementsteins.....	68
5.2.4	Einfluss des Probenalters auf die Transportvorgänge.....	73
5.2.5	Einfluss der Zementzusammensetzung .....	77
5.2.6	Auswirkungen der Eisbildung im Zementstein.....	85
5.2.7	Frostschwinden und die Höhe des alpha-Wertes.....	88
5.2.8	Dehnungsverhalten der feinporösen Zementsteinproben .....	93
<b>5.3</b>	<b><i>Chemisches Schrumpfen</i></b> .....	<b>96</b>
5.3.1	Selbstaustrocknung.....	96
5.3.2	Ausbildung von Hohlräumen .....	108
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b> .....	<b>116</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>117</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>124</b>