



Christian Duckheim (Autor)  
**Hygrische Eigenschaften des Zementsteins**

UNIVERSITÄT  
**DUISBURG**  
**ESSEN**

Mitteilungen  
aus dem Institut für  
Bauphysik und  
Materialwissenschaft

**Hygrische Eigenschaften des Zementsteins**

von  
Christian Duckheim



Heft 13

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

 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1528>

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>I</b>	<b>EINLEITUNG</b>	
<b>1</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ZIEL DER ARBEIT</b>	<b>5</b>
<b>II</b>	<b>GRUNDLAGEN &amp; STAND DER FORSCHUNG</b>	
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN DES ZEMENTSTEINS</b>	<b>9</b>
	3.1 Zement – Definition und Zusammensetzung .....	9
	3.2 Die Hydratation von Portlandzement .....	10
	3.3 Gefügestruktur, Porenraum und Porenwasser .....	12
	3.4 Zementsteinmodelle .....	15
	3.4.1 Zementsteinmodell nach Powers und Brownyard .....	15
	3.4.2 Zementsteinmodell nach Feldman und Sereda .....	16
	3.4.3 Zementsteinmodell nach Kondo und Daimon .....	16
	3.4.4 Zementsteinmodell nach Wittmann und Setzer .....	17
	3.4.5 Zementsteinmodell nach Jennings .....	18
	3.4.6 Strukturausbildung nach Stark und Möser .....	18
<b>4</b>	<b>SORPTION UND KAPILLARKONDENSATION</b>	<b>21</b>
	4.1 Adsorption .....	21
	4.2 Kapillarkondensation .....	22
	4.3 Füllung der Mikroporen .....	24
	4.4 Sorptionsisotherme .....	25
	4.4.1 Oberflächenbestimmung nach BET .....	26
	4.4.2 Oberflächenbestimmung nach GIM2 .....	27
<b>5</b>	<b>SCHWINDEN VON ZEMENTSTEIN UND BETON</b>	<b>31</b>
	5.1 Grundlagen zum Schwinden .....	31
	5.2 Kapillarschwinden .....	33
	5.3 Chemisches Schwinden .....	34
	5.4 Autogenes Schwinden .....	34
	5.5 Karbonatisierungsschwinden .....	34
	5.6 Trocknungsschwinden .....	35

<b>6</b>	<b>SCHWINDMECHANISMEN</b>	<b>39</b>
6.1	Oberflächenenergie.....	39
6.2	Spaltdruck.....	42
6.2.1	Grundlagen der Spaltdrucktheorie.....	42
6.2.2	Die molekulare (dispersive) Komponente.....	43
6.2.3	Die elektrostatische Komponente .....	45
6.2.4	Die Struktur-Komponente.....	45
6.2.5	Die Isotherme des Spaltdrucks .....	46
6.2.6	Der Spaltdruck im Zementstein.....	46
6.3	Kapillarspannungen .....	48
<b>III</b>	<b>EXPERIMENTE</b>	
<b>7</b>	<b>LASERMESSUNG DES TROCKNUNGSSCHWINDENS</b>	<b>55</b>
7.1	Ausgangssituation und Anforderungen .....	55
7.1.1	Feuchtigkeitsgradient .....	55
7.1.2	Messmethode.....	59
7.1.3	Klimasteuerung .....	60
7.1.4	Nebeneffekte.....	62
7.1.5	Fazit.....	63
7.2	Messprinzip .....	63
7.3	Komponenten des Messaufbaus .....	68
7.3.1	Laser und Optik .....	69
7.3.2	Positionssensible Detektoren .....	70
7.3.3	Messkammer und Messeinsatz.....	72
7.3.4	Feuchtgeneratoren.....	74
7.3.5	Gasversorgung.....	77
7.3.6	Datenerfassung.....	78
7.4	Durchführung und Auswertung einer Messung .....	78
7.5	Kalibrierung und Messungenauigkeit.....	81
7.5.1	Kalibrierung des Hebelarms .....	81
7.5.2	Kalibrierung der PSD .....	82
7.5.3	Messungenauigkeit.....	84
7.5.4	Kalibrierung des Feuchtgenerators aCCU-3 .....	90
7.5.5	Kalibrierung der Feuchtigkeitssonden .....	91
<b>8</b>	<b>WEITERE UNTERSUCHUNGSMETHODEN</b>	<b>93</b>
8.1	Wegaufnehmermessung des Schwindens.....	93
8.2	Messung der Sorptionsisothermen .....	95
8.2.1	Dynamische Messung mit der Magnetschwebewaage.....	95
8.2.2	Dynamische und stationäre Einzelmessung.....	97
8.3	Reindichtebestimmung (Heliumpyknometrie) .....	97
8.4	Statischer E-Modul (DMA).....	99
8.5	Schmelzenthalpie der Porenlösung (DSC).....	102

<b>9</b>	<b>PROBENMATERIAL</b>	<b>105</b>
	9.1 Ausgangsmaterialien.....	105
	9.2 Probenherstellung und -präparation.....	105
<b>IV</b>	<b>ERGEBNISSE &amp; INTERPRETATION</b>	
<b>10</b>	<b>DIE MESSUNGEN IM ÜBERBLICK</b>	<b>109</b>
<b>11</b>	<b>ERGEBNISSE DES TROCKNUNGSSCHWINDENS</b>	<b>111</b>
	11.1 Verformungsverlauf und erste Analyse.....	111
	11.2 Dynamik der Verformung.....	117
	11.3 Trocknungsschwinden und Wassergehalt .....	118
	11.4 Trocknungsschwinden und Oberflächenenergie.....	121
	11.5 Trocknungsschwinden und Spaltdruck .....	123
	11.6 Trocknungsschwinden und Kapillarwirkung.....	124
<b>12</b>	<b>SORPTIONSISOTHERME UND INNERE OBERFLÄCHE</b>	<b>127</b>
	12.1 Verlauf der Sorptionsisothermen .....	127
	12.2 Spezifische Oberfläche des Zementsteins.....	129
<b>13</b>	<b>ERGEBNISSE DER DICHEMESSUNG</b>	<b>133</b>
	13.1 Hygrische Änderung der Reindichte .....	133
	13.2 Abschätzung der Porenwasserdichte .....	136
<b>14</b>	<b>KOMBINATION DER MESSDATEN</b>	<b>139</b>
	14.1 Hygrische Änderung der inneren Volumina.....	139
	14.2 Hygrische Änderung der Rohdichte .....	143
<b>15</b>	<b>ERGEBNISSE DER SCHMELZENTHALPIE-MESSUNG</b>	<b>145</b>
<b>16</b>	<b>ERGEBNISSE DER E-MODUL-MESSUNG</b>	<b>147</b>
<b>V</b>	<b>RESÜMEE</b>	
<b>17</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>155</b>
<b>18</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</b>	<b>163</b>
<b>19</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>167</b>
<b>VI</b>	<b>ANHANG</b>	
<b>A</b>	<b>HAMAKERKONSTANTEN</b>	<b>171</b>
<b>B</b>	<b>KALIBRIERDATEN UND -DIAGRAMME</b>	<b>173</b>
<b>C</b>	<b>DATENBLÄTTER</b>	<b>177</b>
<b>VII</b>	<b>LITERATUR</b>	
	LITERATURVERZEICHNIS	<b>207</b>