

Feuchtemessung an Beton mit elektronischen Messgeräten

M. Schäper, J. Kreye

Zusammenfassung Labormäßig getestet wurden sechs elektronische Messgeräte mit drei Messprinzipien, welche den Feuchtegehalt der äußeren Zentimeter eines Betonbauteils zerstörungsfrei messen. Zur Bereitstellung von Betonplatten mit definiert unterschiedlicher Feuchte wurden - ausgehend von einer Standardmischung mit Standardlagerung - variiert a) die Betonzusammensetzung bei gleichem Leimgehalt, b) die Menge und Qualität des Zementleims und c) die Lagerungsbedingungen. In jeder dieser drei Reihen wurden die Messungen bei vier Betonaltern bis hin zu zwei Jahren vorgenommen, wobei jeweils Darrfeuchten als Referenzwerte ermittelt wurden.

Für jeden der vier Messzeitpunkte mussten eigene Kalibrierungen vorgenommen werden, denn die jeweils vom Hersteller vorgegebenen Umrechnungen der Messwerte in Betonfeuchtegehalte erwiesen sich leider als unbrauchbar. In der Versuchsreihe a) wurde eine gewisse Abhängigkeit der einzelnen Messprinzipien von Bewehrung und Gesteinskörnung sowie vom Chloridgehalt und Messtemperatur festgestellt. Die Beeinflussung der Betonfeuchte durch Änderung von Zementsteinvolumen, w/z-Wert und Lagerungsbedingungen in den Reihen b) und c) wurde im Normalfall befriedigend abgebildet. Systematische Fehlanzeigen lagen aber in zwei Fällen vor: Bei sekundär härtenden Zement- und Zusatzstoffen werden deutlich zu kleine Feuchtwerte angezeigt. Und, fehlende Austrocknungsgradienten in der Betonoberfläche, z. B. durch Oberflächenversiegelung oder Wasserlagerung, können die Messwerte in beide Richtungen hin verfälschen; auf das Vorliegen solcher Gradienten hin sind offensichtlich alle Geräte basis-kalibriert.

Vor Ort müssen die genannten problematischen Messfälle erkannt werden. Generell muss jeder Anwender mit seinem Messgerät vor Ort eine gewisse eigene Kalibrierung für den jeweiligen Beton, zumindest für augenscheinlich trocken und augenscheinlich feucht, vornehmen.

Moisture measurement on concrete with electronic devices

Abstract Six electronic devices with three measurement principles were tested in the laboratory, measuring nondestructively the humidity content of the outside centimeters of a concrete slab. To provide concrete slabs with defined differences in humidity a stan-

dard mixture was varied a) in the composition on base of the same paste content, b) in quantity and quality of the cement paste, and c) in the storage conditions. In each of these three rows the measurements took place at four aging-points up to 2 years, with the humidities after kiln drying as reference values.

For each of the four measuring time-points own calibrations had to be made, because the conversions of the measured values into concrete humidity-contents, given by the manufacturers of the devices, unfortunately proved as useless. The variations a) showed a certain dependence of the measurement principles on reinforcing and aggregates as well as on chloride content and measuring temperature. The influence on the concrete humidity by the change of paste volume, w/z value and conditions of storage in the rows b) and c) was mostly indicated satisfyingly. Systematically negative reporting took however place in two cases: With secondarily hardening additives the displayed humidity-content is too small, and the absence of drying-gradients in the concrete surface, e.g. by surface sealing or storage in water, can falsify the measured values in both directions: obviously all devices were basis-calibrated under the condition of the existence of a gradient.

On site the mentioned problematic measuring cases must be recognized. Generally each user must make on site a certain own calibration of his device with at least the respective concrete apparently in dry and wet state.

1 Einleitung

Bei Fragestellungen der Bauwerksbeurteilung im Bestand ist häufig eine zerstörungsfreie Vor-Ort-Feuchtemessung von Betonen sowie zementgebundenen Estrichen und Putzen erforderlich. Eine Vielzahl elektronisch arbeitender Geräte ist auf dem Markt, die sich in Messprinzip, Messgenauigkeit, Messtiefe und Reproduzierbarkeit unterscheiden.

Eine Auswahl von sechs solcher zerstörungsfrei arbeitender Geräte wird experimentell untersucht. Als Vergleich und Kalibrierung dienen jeweils die zerstörenden physikalischen Verfahren der Darrmethode und der CM-Methode. Es werden Hinweise auf mögliche Fehlmessungen erarbeitet.

2 Die geprüften elektronischen Messgeräte

2.1 Die Messprinzipien

Als gängige elektronische Messprinzipien stehen zur Verfügung:

A) Kapazitive Messmethode: Es wird an zwei Elektroden, zwischen denen sich der Beton als Dielektrikum befindet, eine Spannung angelegt. Die Kapazität des sich ausbildenden Kondensators ändert sich mit steigender Betonfeuchte.

B) Mikrowellenmesstechnik: Das polare Molekül H_2O erfährt durch Mikrowellen (elektromagnetische Wellen mit sehr hoher Frequenz) eine Schwingungsanregung. Gemessen werden die erzeugten dielektrischen Verluste, die den Wassermolekülen quantitativ zugeordnet werden können.

Prof. Dr.-Ing. Michael Schäper

Hochschule RheinMain Wiesbaden Rüsselsheim
Geisenheim und Materialprüfanstalt für Bauwesen
MPA Wiesbaden
Kurt-Schumacher-Ring 18, 65197 Wiesbaden
michael.schaeper@hs-rm.de

Dipl.-Ing. Jörn Kreye

Hochschule RheinMain Wiesbaden Rüsselsheim
Geisenheim und Materialprüfanstalt für Bauwesen
MPA Wiesbaden
joern.kreye@hs-rm.de



Bild 1. Die Aufhängung der Versuchsplatten bei der Messung, mit dem Feldstärkemessgerät auf der Rückseite
Fig. 1. The suspension of the test slabs within each measurement

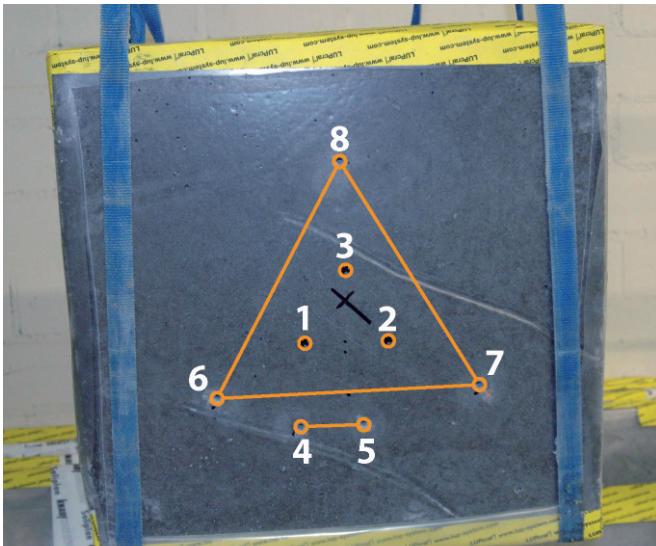


Bild 2. Die Messpunkte auf jeder Versuchsplatte
Fig. 2. The measuring points on each sample

C) Widerstandsmessungen: Je feuchter ein poröser Baustoff ist, desto geringer wird sein elektrischer Widerstand. Gemessen wird der Elektronenfluss im Baustoff zwischen zwei angelegten Elektroden. Der daraus abzuleitende Wert des Widerstands wird unter Gleichstrom oder Wechselstrom gemessen.

Die werksseitige Kalibrierung der Geräte der Messprinzipien A) und B) setzt einen natürlichen Austrocknungsgradienten im Baustoff voraus.

Getestet werden drei Geräte des Prinzips A), eines des Prinzips B) sowie zwei des Prinzips C), eines ein Gleichstrom- und das andere ein Wechselstrom-Widerstandsmessgerät.

2.2 Das Messarrangement

Gemessen wird die Feuchte von unterschiedlich hergestellten und gelagerten Betonplatten 50 cm x 50 cm x 5 cm von deren Oberfläche aus. Die Wirkungstiefe aller Geräte lag nach Testmessungen unter 5 cm, womit die Plattendicke auf 5 cm festgelegt wurde. Die Größe der Oberfläche wurde aufgrund von Feldstärkemessungen festgelegt, bei einer Größe von 50 cm x 50 cm liegt das für die Messungen jeweils aufge-

baute elektrische Feld noch näherungsweise vollständig innerhalb des Betonumfangs:

Gemessen wird, zur Vermeidung von Messstörungen, jeweils an einer frei aufgehängten Platte. Bild 1 zeigt die Rückseite einer aufgehängten Platte mit dem Feldstärkemessgerät auf Stativ. Die Feuchtemessung erfolgt auf der im Foto abgewandten Vorderseite. Bild 2 zeigt die Anordnung der Messpunkte, die für alle Platten an der gleichen Stelle liegen: Messpunkte 1, 2 und 3 als Eckpunkte eines gleichschenkeligen Dreiecks mit untereinander 80 mm Abstand auf der Oberfläche für die Messungen

Kapazitiv 1

Kapazitiv 2

Kapazitiv 3

Mikrowelle;

Messpunkte 4 und 5 als zwei Bohrungen Ø 5 mm der Tiefe 40 mm im Abstand von 65 mm für die Messung

Widerstand- Gleichstrom;

Messpunkte 6, 7 und 8 als in den Eckpunkten eines gleichschenkeligen Dreiecks vorgenommene Bohrungen Ø 5 mm der Tiefe 40 mm im Abstand untereinander von jeweils 250 mm für die Messung

Widerstand- Wechselstrom.

Die Prüfzeitpunkte waren ab Plattenherstellung:

28 Tage

6 Monate

18 Monate

28 Monate

Zu jedem Prüfzeitpunkt wurde ein Satz Platten zerstört, um physikalische Vergleichsmessung vorzunehmen:

nach der Darmmethode

und der CM-Methode (siehe z. B. [1, 2]).

Es mussten also vier identische Prüfreihe von Platten hergestellt und gleich gelagert werden [3]. Der Prüfumfang umfasste betontechnologisch, bewehrungsmäßig und lagerungsmäßig variierende Plattentypen.

3 Die Versuchsmatrix der Variationen der Betonplatten

Der Grundgedanke der Messreihe war die Auswirkung folgender Parameter auf die Werte der jeweiligen elektrophysikalischen Messung abzufragen:

- Bewehrung
- Gesteinskörnung
- Chloridgehalt
- Lagerung trocken, feucht und nass
- Zementsteinvolumen bei gleichem w/z
- w/z bei gleichem Zugabewasser w
- Bindemittel: Portlandzement / Hochofenzement / Portlandzement mit Flugaschezugabe
- Messtemperatur.

Dabei wurden bezüglich der Lagerung der 5 cm dicken Platten folgende Simulationen vorgenommen:

- Kernbeton = Versiegelung der Platten durch Einschweißung in Folie
- Oberflächenbeton = offene Exponierung.

Dargestellt ist die zugehörige Versuchsmatrix mit Tabelle 1, in der die betontechnologisch einteilende Tabelle 2 zitiert wird. Mit Tabelle 1 liegen drei Versuchsreihen vor:

Versuchsreihe 1:

Betone mit von Zusammensetzung und Volumen her etwa gleichem Zementleim wie dem einer Standardmischung: Variiert werden Bewehrung, Gesteinskörnung, Cl_z Gehalt

Tabelle 1. Versuchsmatrix
Table 1. Matrix of the experiments

Betonplatten 30 cm x 30 cm x 5 cm					
Versuchsreihe	Zementleim	Lagerung	Kurzname	Beton nach Tab.2	Besonderheit
1	etwa gleicher Leim	6 Monate versiegelt, dann ca. 20°C / 60 % r. L.	Standard	siehe Tabelle 2	
			Ø 8 - 10	Standard	bewehrt
			Ø 20 - 10	Standard	bewehrt
			Basalt	siehe Tabelle 2	
			Kalkstein		
			Main		
			Werschau		
			1 % CI		
			5 % CI		
			1°C	1°C	Messtemperatur
			35°C	35°C	Messtemperatur
3		28 d versiegelt, dann variiert	20°C / 65 % r. L.	Standard	nach 28 d Folie 20°C / 65 % r. L.
			18°C / 90 % r. L.		nach 28 d Folie 18°C / 90 % r. L.
			1 cm Fußbad		nach 28 d Folie 1 cm Fußbad
			4 cm Fußbad		nach 28 d Folie 4 cm Fußbad
2	variiert Leim	6 Monate versiegelt, dann ca. 20°C / 60 % r. L.	F1	siehe Tabelle 2	
			F1 -> F3		
			A/B 8		
			w/z 0,4		
			w/z 0,75		
			Flugasche		
			CEM III		

und Messtemperatur. Die Lagerung wird im Weiteren als „Normallagerung“ bezeichnet: 6 Monate Versiegelung bei ca. 20 °C, dann Laborklima (ca. 20 °C/ ca. 60 % r. L.)

Versuchsreihe 2:

Betone mit gegenüber der Standardmischung in Volumen und Zusammensetzung verändertem Zementleim; Normallagerung wie Reihe 1.

Versuchsreihe 3:

Betone der Standardmischung mit variierten Lagerungsbedingungen, wie kürzerer Versiegelungsdauer, anderem Lagerungsklima und Fußbadlagerungen.

4 Die Messergebnisse

4.1 Die Messergebnisse der Versuchsreihe 1: Betone mit jeweils etwa gleichem Zementleim und Normallagerung

Hier stand gemäß Tabelle 1 im Fokus die Auswirkung von

- Bewehrung
- Gesteinskörnung
- Chloridgehalt
- Messtemperatur

auf die elektronische Messung. Für die Referenz-DARRWERTE dieser Reihe in **Bild 3** sind erwartungsgemäß nur geringe Unterschiede festzustellen. Der rasch härtende CEM I 42,5 R des in dieser Reihe für alle Mischungen nach Volumen und Inhalt etwa gleichen Zementleims zeigt in der versiegelten Phase zwischen 28 Tagen und 6 Monaten er-

Tabelle 2. Betonmischungen der Versuchsmatrix
Table 2. Concrete mixtures of the experiments

	Rezeptur		Leim						g	Frischbeton	
	Kurzname	Besonderheit	Wasser kg/m ³	ΔLeim kg/m ³	Zement kg/m ³	w/z -	V _{Leim} l/m ³	ΔV _{Leim} l/m ³	V _g l/m ³	LP l/m ³	Konsistenz cm
etwa gleicher Leim	Standard	) ¹	212	0	353	0,6	341	0	659	15	45
	Basalt	Basaltsplitt	208	-4	347	0,6	340	-1	660	20	47
	Kalk	Kalksplitt	208	-4	347	0,6	340	-1	660	20	46
	Main	Mainkorn	207	-5	345	0,6	348	8	652	30	46
	Werschau	Moränekorn	197	-14	328	0,6	333	-7	667	30	46
	1% CI	CI _z = 1 M.-%	211	-1	351	0,6	344	3	656	20	46
	5% CI	CI _z = 5 M.-%	208	-3	348	0,6	350	10	650	30	46
	1°C / 35°C	Messtemperatur	211	0	353	0,6	341	0	659	15	47
varierter Leim	F1	F1	168	-44	279	0,6	287	-53	713	30	32
	F1 -> F3	F1 + FM	169	-43	278	0,6	289	-52	711	30	46
	A/B 8	Mitte A/B 8	223	12	372	0,6	368	28	632	25	47
	w/z 0,4	w/z = 0,4	211	-1	528	0,4	401	60	599	20	43
	w/z 0,75	w/z = 0,75	200	-11	267	0,75	302	-39	698	15	47
	Flugasche	mit FA	212	0	313+120FA	0,6 _{eq}	380	39	620	15	45
	CEM III	CEM III	207	-4	346	0,6	338	-3	662	15	47

)¹ CEM I 42,5 R, Oberrheinkorn Mitte A/B 16, w/z = 0,60, F3, Messtemperatur ca. 20°C

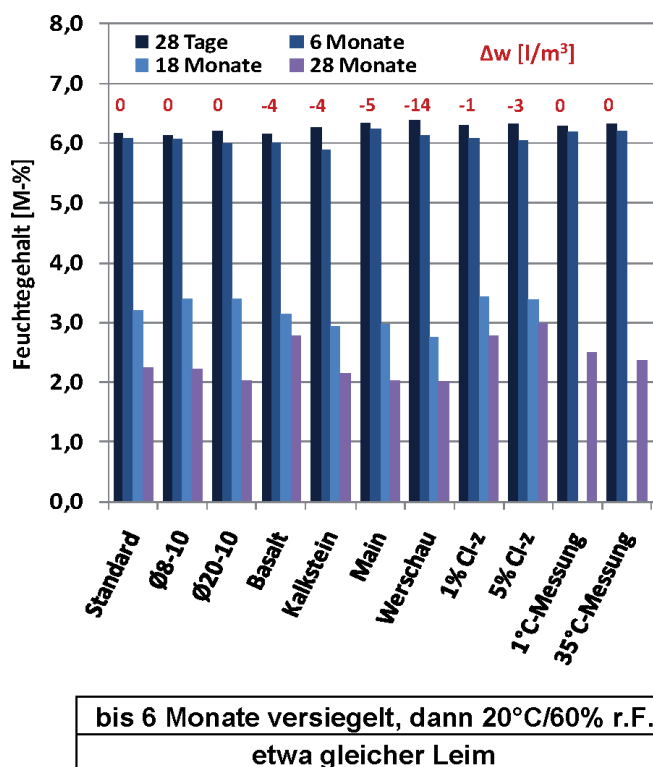


Bild 3. Die Darrwerte der Versuchsreihe 1: gleicher Leim / Normallagerung
Fig. 3. The results of kiln drying in the test series 1: same paste/ normal storage

wartungsgemäß nur eine geringe Nachbindung von Wasser. Der Chloridgehalt erweist sich in den Messungen nach 18 und 28 Monaten als in geringer Weise wasserrückhaltend: Der entsprechende Endfeuchtegehalt liegt bei ca. 3 M.-%; für die chloridfreien Vergleichsbetone bei 2 bis 2,5 M.-%. Die ELEKTRONISCHEN MESSUNGEN – beispielhaft zeigt Bild 4a die 28 Monate-Messung – folgten von den Impulsen her im Großen und Ganzen den Darrwerten, wobei aber ein prinzipielles Problem vorliegt:

Die Gerätehersteller weisen jeweils den Messwerten für den Baustoff Beton Feuchtegehalte in Massenprozent zu. Diese Herstellerkalibrierung erwies sich für keines der Geräte als zutreffend – erst nach einer parallel verschiebenden Korrektur des Messniveaus des jeweiligen Gerätes in Bild 4b ergeben die Messwerte Sinn. Diese Korrektur erfolgte hier für eine Messreihe immer so, dass die Fehlerabweichung vom Darrwert jeweils für alle Proben eines Messtermins im Mittel minimiert wird. Die Zusammenstellung der jeweiligen Korrekturwerte zeigt Tabelle 3.

Die Tatsache, dass die meisten Proben zum Messtermin nach 6 Monaten noch in Folie versiegelt waren und somit keinen natürlichen Austrocknungsgradienten aufwiesen,

Tabelle 3. Die hier angewandten Korrekturwerte zu den Herstellerangaben für die Umrechnung der elektronischen Daten in Feuchtegehalte

Table 3. The values for the correction of the manufacturer data for converting the electronic data into humidity-contents

Messung	verwendete Korrekturwerte						
	CM	Kapa-1	Kapa-2	Kapa-3	Mikro	Wid ~	Wid =
6 Monate	+2,0	-1,3	-0,3	+1,5	-0,4	-0,7	+3,3
18 Monate	+1,6	-0,7	-1,2	-0,2	-1,2	+0,6	+0,8
28 Monate	+1,0	-0,8	-1,4	entf.	-2,2	+0,8	+0,4

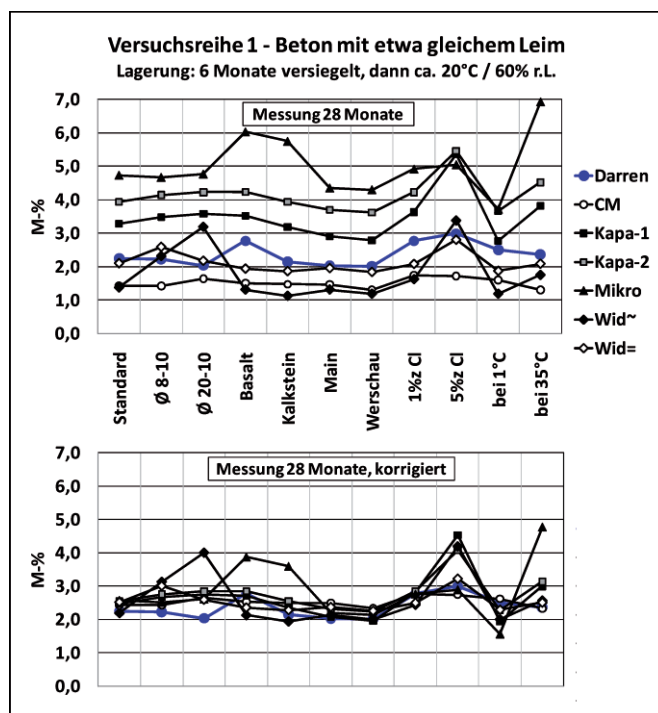


Bild 4. Die unkorrigierten und korrigierten Messwerte der Versuchsreihe 1, Zeitpunkt 28 Monate

Fig. 4. The uncorrected and corrected measured values of the test series 1, time 28 months

steht dabei im Gegensatz zur Herstellerkalibrierung der Messgeräte (vgl. Abschnitt 2.1). Vermutlich unterscheiden sich die Korrekturwerte dieses Messzeitpunktes auch deshalb zum Teil deutlich von den 18- bzw. 28-Monats-Werten, und sind daher mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten.

Diese parallelen Ergebnisverschiebungen sind offensichtlich für die Anwendung aller elektronischen Messgeräte unumgänglich, wenn auch sehr unbequem. Für die Praxis heißt dies, dass der Nutzer grundsätzlich eine gewisse grobe Kalibrierung des jeweiligen Gerätes bei jedem Ortstermin selbst durchführen muss, zumindest, indem er die Messwerte offensichtlich trockener Stellen mit den Messwerten der zu untersuchenden Bereiche vergleicht. Ein quantitativ verlässlicher Zahlenwert ist allerdings nur mit hohem Kalibrierungsaufwand zu ermitteln.

Die in der Versuchsreihe 1 zu den drei gewählten Versuchszeitpunkten nach der jeweiligen Korrektur gewonnenen Messwerte zeigt Bild 5. Die elektronische Feuchtemessung der Versuchsreihe 1 erweist sich in allen Verfahren als funktionstüchtig. Folgende Besonderheiten sind zu beachten:

Die *kapazitive Messmethode* zeigt sich mit zunehmender Versuchsdauer empfindlich auf den hohen Chloridgehalt $Cl_z = 5$ M.-%. Es wird eine zu große Feuchtigkeit angezeigt.

Die *Mikrowellenmesstechnik* ist empfindlich auf Basalt- und Kalksteinsplitt als Gesteinskörnung: Es wurden hierfür zu hohe Betonfeuchtwerte angezeigt. Auch deuten sich für diese Technik erhebliche Probleme an bei von + 20°C abweichenden Prüftemperaturen.

	6 Monate												18 Monate												28 Monate													
	Standard	Ø8-10	Ø20-10	Basalt	Kalkstein	Main	Werschau	1½z CI	5½z CI	1°C-Messung	35°C-Messung	Standard	Ø8-10	Ø20-10	Basalt	Kalkstein	Main	Werschau	1½z CI	5½z CI	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Ø8-10	Ø20-10	Basalt	Kalkstein	Main	Werschau	1½z CI	5½z CI	1°C-Messung	35°C-Messung			
Darren	6,1	6,1	6,0	6,0	5,9	6,2	6,1	6,1	6,1	6,2	6,2	3,2	3,4	3,4	3,2	2,9	3,0	2,8	3,4	3,4	3,4	3,3				2,2	2,2	2,0	2,8	2,1	2,0	2,0	2,8	3,0	2,5	2,4		
CM-Gerät	-1,0	-0,4	1,6	0,2	-0,3	-0,6	0,1	-1,0	-0,4	0,0	-0,8	-0,2	0,0	0,0	-0,2	0,4	0,2	0,3	-0,1	-0,2	0,0	-0,3				0,2	0,2	0,6	-0,2	0,3	0,5	0,3	0,0	-0,2	0,1	0,0		
Kapazitiv 1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,3	0,4	0,8	0,3	-0,1	0,5	0,2	0,3	0,5	0,5	0,0	0,2	0,2	1,5	0,0	0,0				0,2	0,4	0,7	-0,1	0,2	0,1	-0,1	0,0	1,5	-0,6	0,6		
Kapazitiv 2	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	0,0	0,1	0,0	-0,3	0,6	0,3	0,4	0,5	0,5	0,2	0,3	0,2	1,0	0,1	0,1				0,3	0,5	0,8	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	1,1	-0,2	0,8		
Kapazitiv 3	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,7	-0,2	-0,3	0,4	0,2	0,3	0,6	0,7	0,4	0,6	0,2	0,6	0,3	0,3																
Mikrowelle	0,2	0,1	0,4	0,7	0,9	-0,1	0,1	0,3	0,2	-1,5	0,6	0,5	0,1	0,3	1,7	1,6	0,0	0,2	0,2	0,4	0,1	0,5				0,3	0,3	0,6	1,1	1,4	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,9	2,4		
Widerstand ~	-0,2	0,4	0,1	0,1	0,4	0,0	0,3	0,2	0,3	-0,3	0,1	0,1	2,2	3,0	-0,2	0,0	-0,5	-0,5	-0,6	2,1	0,0	-0,8				0,0	0,9	2,0	-0,6	-0,2	0,1	0,0	-0,3	1,2	-0,5	0,2		
Widerstand =	-0,2	0,0	-0,2	-0,2	0,1	-0,9	-0,1	-0,2	0,1	-0,4	-0,3	0,7	0,7	0,7	0,0	0,3	0,1	0,2	-0,3	0,2	0,2	-0,2				0,3	0,8	0,6	-0,4	0,1	0,3	0,2	-0,3	0,2	-0,2	0,1		
bis 6 Monate versiegelt, dann 20°C/60% r.F.																																						
etwa gleicher Leim																																						

Bild 5. Alle korrigierten Messwerte der elektronischen Feuchtemessgeräte in der Versuchsreihe 1
Fig. 5. All corrected measured values of the electronic devices in the test series 1

■	Abweichung ≤ 0,5 %-Punkte
■	Abweichung ≤ 1,0 %-Punkte
■	Abweichung ≤ 1,5 %-Punkte
■	Abweichung > 1,5 %-Punkte

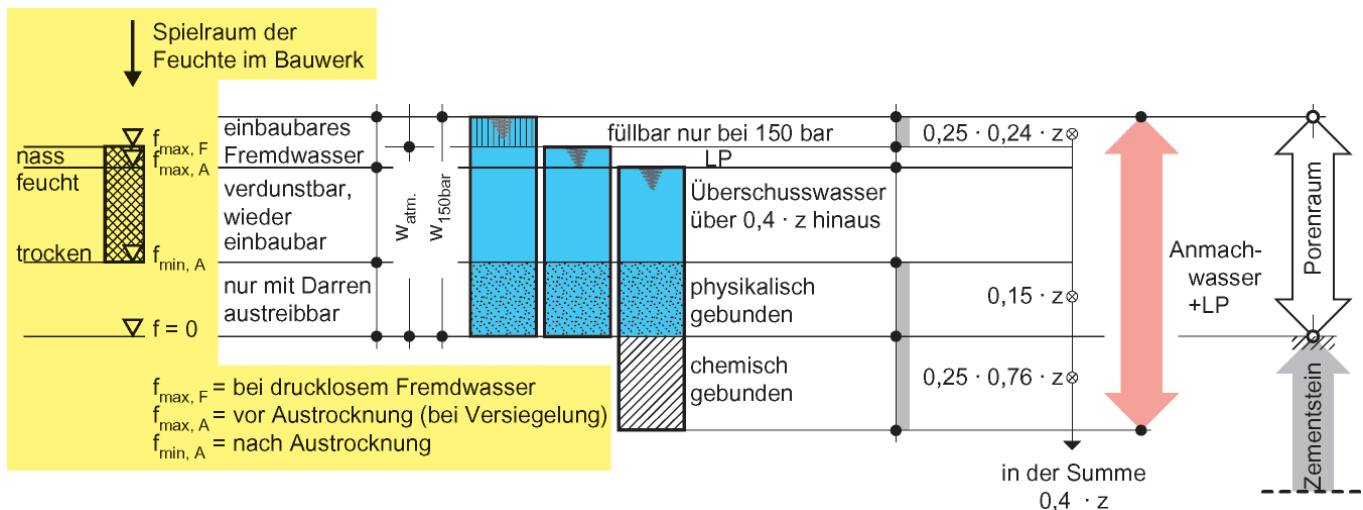


Bild 6. Das Spektrum der Wasseraufnahme-Mechanismen von Zementstein
Fig. 6. The spectrum of the water absorption mechanisms of hardened cement paste

Beide Widerstandsmessmethoden, vor allen die auf Wechselstrombasis, zeigen eine Beeinflussung der Messwerte durch die äußere Bewehrungslage und durch hohe Chloridgehalte: Es werden hier zu hohe Betonfeuchtwerte angezeigt.

Die *physikalisch-chemische CM-Methode* korreliert bekanntermaßen, unter Berücksichtigung eines Korrekturwertes in der Größenordnung von dem der Tabelle 3, gut mit den Darrwerten.

4.2 Die Messergebnisse der Versuchsreihe 2: Beton mit verschiedenen Zementleimen und Normallagerung

Hier werden die wichtigen betontechnologischen Parameter abgefragt:

- Menge des Zementleims vorgegebener Qualität, also gleichem w/z
- Zementsteinporosität über variiertem w/z
- Flugasche als Zusatzstoff
- CEM III statt CEM I

Zur Verifizierung und zur besseren Interpretation der Referenz-DARRWERTE dieser Versuchsreihe nach Bild 7 wurden zu den Zeitpunkten

- 28 Tage (versiegelter Beton)
- 28 Monate (bis 6 Monate andauernde Versiegelung, dann Austrocknung bei ca. 20 °C/ ca. 60 % r. L.)

die Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck und unter 150 bar geprüft. Bild 6 stellt eine solche Wasseraufnahmeprüfung in Kontext zu dem bekannten Zementsteinmodell (z. B. in [2]), auf Basis der Formulierung der zugehörigen Porositätsanteile nach [4]:

$w_{\text{atm.}}$ Der Wert der atmosphärischen Wasseraufnahme ist der maximale Wert der Betonfeuchte bei drucklos einwirkendem Fremdwasser.

$w_{150\text{bar}}$ Die Wasseraufnahme unter 150 bar füllt auch die feinsten Gelporen.

Diese beiden Messwerte sind wichtig für die Beurteilung der Frostsicherheit von Stein und Beton.

Tabelle 4 betrachtet die resultierenden Porositäten und stellt den Messwerten die entsprechenden rechnerischen Werte nach [2] gegenüber.

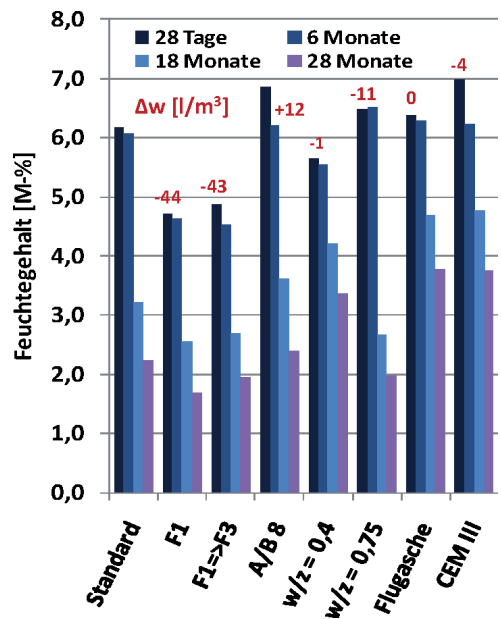


Bild 7. Die Darrwerte der Versuchsreihe 2: variierter Leim / Normallagerung
Fig. 7. The results of kiln drying in the test series 2: varied paste/ normal storage

Der rechnerische Ansatz nach [2] lautet:

$$p_{150\text{bar}} = \frac{w_{150\text{bar}}}{\rho_{\text{trocken}}} = \frac{(w - z \cdot 0,25 \cdot 0,76 \cdot m + \text{LPv} \cdot 1,0)}{\rho_{\text{trocken}}} \quad [\text{M.}\%] \quad (1)$$

$$p_{\text{atm}} = \frac{w_{\text{atm}}}{\rho_{\text{trocken}}} = \frac{(w - z \cdot 0,25 \cdot m + \text{LPv} \cdot 1,0)}{\rho_{\text{trocken}}} \quad [\text{M.}\%] \quad (2)$$

In (1) bedeuten, je bezogen auf 1 m⁵ Beton
w [kg] Masse des Anmachwassers
w/1,0 [l] Volumen des Anmachwassers
z · 0,25 = w_{chem} [kg] Masse des chemisch gebundenen Wassers

w_{chem} / 1,0 [kg] Ausgangsvolumen des chemisch gebundenen Wassers
w_{chem} · 0,76 / 1,0 [l] Volumen des chemisch gebundenen Wassers nach Einbindung; die Moleküle werden beim Einbinden dichter gepackt
w_{chem} (1 – 0,76) [kg] Masse des mit 150 bar eingedrückten Wassers, das den vorgenannten Volumenverlust in den Gelporen ersetzt
LPv [l] Volumen der Verdichtungs-poren
LPv · 1,0 [l] Masse des in die Verdichtungs-poren eingedrungenen Wassers
ρ_{tr} = g + z + 0,25 · z · m [kg/ l] Trockenrohdichte des Betons
m [l] Hydratationsgrad

Die gemessenen Werte von p_{150bar} und p_{atm} geben mit Tabelle 4 den durch die betrachteten Mischungsvariationen dieser Versuchsreihe rechnerisch vorgegebenen Trend wieder. In Tabelle 4 eingetragen sind zum Vergleich mit den Messwerten die errechneten Grenzwerte der Feuchtegehalte nach Bild 6:

f_{max, A} [M.-%] Der maximale Feuchtegehalt aus dem nicht hydratisierten Anmachwasser, der bei Versiegelung der Proben auftritt.

f_{min, A} [M.-%] Der minimale Feuchtegehalt, der nach vollständiger idealer Austrocknung im Normalklima noch verbleibt. Weiteres nicht gebundenes Restwasser liegt physikalisch gebunden vor und kann nur beim Darren bei 105 °C ausgetrieben werden.

Der Wert f_{max, A} ist der durch Darren bestimmbare Feuchtegehalt von versiegeltem Beton, an dem keine Verdunstung von nichtgebundenem Wasser stattgefunden hat. Nach [2] gilt:

Tabelle 4. Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Darrwerte in der Messreihe 2
Table 4. Comparison of the measured and computed results of kiln drying in the series of measurements 2

			Feuchtegehalte in M.-%											
			Reihe 1	Reihe 2								Reihe 3		
			Standard	F1	F1 ⇒ F3	A/B 8	Flugasche) ²	CEM III) ²	w/z 0,4	w/z 0,75	Standard			
			6 Monate versiegelt, dann ca. 20°C / 60 % r. L.								28 d versiegelt, dann 18° / 90 % 1 cm H ₂ O 4 cm H ₂ O			
28 Tage m = 0,80	f _{max, A}	berechnet	6,6	5,1	5,2	7,1	6,9	6,4	4,8	6,8	6,6			
	f _{ist}	gemessen) ¹	6,2	4,7	4,9	6,9	6,4	7,0	5,7	6,5	6,2			
	f _{min, A}	berechnet	2,0	1,5	1,5	2,1	1,8	1,9	2,9	1,5	2,0			
	p _{150bar}	gemessen) ¹	8,5	7,6	7,7	9,6	9,0	8,9	7,5	8,9	8,5			
		berechnet	8,1	7,1	7,1	9,2	8,4	7,9	6,8	8,1	8,1			
	p _{atm.}	gemessen) ¹	7,8	6,1	6,3	8,0	8,3	8,4	6,5	8,0	7,8			
		berechnet	7,3	6,5	6,5	8,3	7,6	7,1	5,7	7,5	7,3			
28 Monate m = 0,95	f _{max, A}	berechnet	5,9	4,6	4,7	6,4	5,9	6,1	3,8	6,3	5,9			
	f _{ist}	gemessen	2,2	1,7	2,0	2,4	3,8	3,8	3,4	2,0	4,0	6,0	5,9	
	f _{min, A}	berechnet	2,3	1,8	1,8	2,5	2,1	2,1	3,4	1,8	2,3			
	p _{150bar}	gemessen	7,5	7,2	7,4	8,7	8,4	8,0	7,3	7,5	7,8			
		berechnet	7,5	6,7	6,7	8,6	7,5	7,6	6,1	7,7	7,5			
	p _{atm.}	gemessen	6,5	5,6	5,7	7,5	7,6	7,5	6,4	6,9	6,9			
		berechnet	6,6	5,9	6,0	7,6	6,6	6,8	4,7	7,0	6,6			

¹ Für die 28 d-Messwerte muss die Einschränkung gemacht werden, dass sich eine der verwendeten Waagen im Nachhinein als fehlerhaft messend herausstellte, dennoch erscheinen die Messwerte als Ganzes plausibel.
² Das zugrundeliegende Berechnungsmodell nach Bild 6 wurde entwickelt für Portlandzement.

	6 Monate								18 Monate								28 Monate							
	Standard	F1	F1=>F3	AB 8	w/z 0,4	w/z 0,75	Flugasche	CEM III	Standard	F1	F1=>F3	AB 8	w/z 0,4	w/z 0,75	Flugasche	CEM III	Standard	F1	F1=>F3	AB 8	w/z 0,4	w/z 0,75	Flugasche	CEM III
Darren [M-%]	6,1	4,6	4,5	6,2	5,6	6,5	6,3	6,2	3,2	2,6	2,7	3,6	4,2	2,7	4,7	4,8	2,2	1,7	2,0	2,4	3,4	2,0	3,8	3,8
CM-Gerät	-1,0	0,8	0,6	0,0	-0,4	2,2	-0,7	0,0	-0,2	0,3	0,3	-0,2	-0,8	0,5	-0,6	-0,9	0,2	0,4	0,4	0,3	-0,7	0,3	-0,6	-0,6
Kapazitiv 1	0,1	1,6	1,6	0,1	0,5	-0,1	-0,8	-0,5	0,5	0,1	0,4	-0,1	0,1	-0,1	-0,9	-1,7	0,2	0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,2	-0,6	-1,5
Kapazitiv 2	0,0	1,4	1,4	-0,3	0,4	-0,5	-0,5	-0,4	0,6	0,3	0,5	-0,1	-0,1	0,1	-1,1	-1,6	0,3	0,4	0,2	0,1	0,0	0,1	-0,7	-1,1
Kapazitiv 3	-0,1	1,3	1,4	-0,3	0,4	-0,6	-0,7	-0,7	0,4	0,7	0,7	0,0	-0,4	0,4	-0,9	-1,2								
Mikrowelle	0,2	0,8	0,8	-0,1	0,3	-0,3	0,2	0,1	0,5	0,5	0,4	-0,2	0,1	-0,2	-0,3	-1,1	0,3	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	-0,4	-1,1
Widerstand ~	-0,2	1,4	1,4	0,0	-0,3	-0,4	-3,3	-2,9	0,1	0,1	-0,1	-0,9	-0,3	-0,7	-2,4	-2,4	0,0	0,4	0,1	-0,3	-0,2	-0,1	-1,7	-1,8
Widerstand =	-0,2	1,3	1,5	-0,1	0,4	-0,5	-0,9	-0,7	0,7	0,3	0,4	-0,6	-0,6	0,6	-1,7	-2,0	0,3	0,6	0,4	0,0	-0,6	0,2	-1,5	-1,6
bis 6 Monate versiegelt, dann 20°C/60% r.F.																								
variiertes Leim																								

Bild 8. Alle korrigierten Messwerte der elektronischen Feuchtemessgeräte in der Versuchsreihe 2

Fig. 8. All corrected measured values of the electronic devices in the test series 2

	Abweichung ≤ 0,5 %-Punkte
	Abweichung ≤ 1,0 %-Punkte
	Abweichung ≤ 1,5 %-Punkte
	Abweichung > 1,5 %-Punkte

$$f_{\max, A} = (w - z \cdot 0,25 \cdot m) / \rho_{\text{trocken}} \quad [\text{M.}\%] \quad (3)$$

Der Wert $f_{\min, A}$ ist der nur durch Darren bestimmbare Restfeuchtegehalt ideal getrockneten Betons aus dem alles an normal trockener Luft verdunstbare Wasser entwichen ist. Nach [2] gilt:

$$f_{\min, A} = (0,4 - 0,25) z \cdot m / \rho_{\text{trocken}} \quad [\text{M.}\%] \quad (4)$$

Die in Tabelle 4 eingetragenen gemessenen Darrfeuchten liegen wie erwartet für den Messzeitpunkt 28 Tage im Bereich des oberen, für den Messzeitpunkt 28 Monate im Bereich des unteren dieser beiden Grenzwerte. Mit dem Modell des Bildes 6 lässt sich nun die zeitliche Entwicklung der gemessenen Darrwerte dieser Reihe in Bild 7 nachvollziehen. Die über Konsistenzänderung gesteuerte Leimverringern gemäß Tabelle 2 für „F1“ gegenüber der Standardmischung von 53 l/m³, bei gleichem w/z, bewirkt eine deutlich geringere Anfangsfeuchte nach 6 Monaten Versiegelung von 4,6 gegenüber 6,1 M.-%. Auch nach 28 Monaten ist die Reduktion der freien Feuchte mit 1,7 gegenüber 2,2 M.-% (Tab. 4) noch messbar.

Entsprechend bewirkt die Leimvergrößerung mit „A/B8“ gegenüber „Standard“, von 341 l/m³ auf 368 l/m³, eine Vergrößerung des Feuchtegehalts: Der Feuchtegehalt ist nach 18 Monaten mit 3,6 gegenüber 3,2 M.-% sowie auch nach 28 Monaten (Tab. 4) mit 2,4 gegenüber 2,2 M.-% erhöht.

Die Verringerung von w/z = 0,6 auf 0,4 senkt den Anfangsfeuchtegehalt erheblich und hebt andererseits die Endfeuchtigkeit nach 28 Monaten erheblich an. Es wird ein höherer Anteil des Anmachwassers chemisch eingebunden; die daraus resultierende höhere Dichtigkeit des Zementsteins lässt später aber weniger des freien Wassers austreten. Der beobachtet dichtende Effekt bei w/z-Verringerung stellt sich auch ein bei den deutlich sekundär nachhärtenden Zementsteinen mit dem puzzolanischen Zusatzstoff Flugasche und dem latent hydraulischen Zumahlstoff Hüttensand. Beim CEM III erkennt man zusätzlich den geringeren Anfangs-Bindungsanteil des Zugabewassers, da der Hüttensand erst se-

kundär reagiert.

Die Erhöhung des w/z = 0,6 auf den Wert w/z = 0,75 erhöht die Anfangswassergehalte; es wird weniger Wasser eingebunden, andererseits verringert sich hier der Endwassergehalt, da der Zementstein poröser ist.

Die ELEKTRONISCHE FEUCHTEMESSUNG reagiert gemäß **Bild 8** unterschiedlich auf diese Effekte:

- Die Auswirkungen der Leimverringern und der w/z-Wert-Verringerung auf die gemessene Betonfeuchte werden gut nachvollzogen.
- Alle elektronischen Messverfahren haben allerdings erhebliche Probleme bei der Erfassung des die Zementsteinstruktur verdichtenden Effekts von Flugasche und Hüttensand: Der Ist-Feuchtegehalt wird grundsätzlich unterschätzt. Eventuell wird hier der sekundäre Erhärtungseffekt der Zusatz- bzw. Zumahlstoffe falsch interpretiert.

Der letzte Effekt ist für die Praxis der elektronischen Feuchtemessung bitter, da die Zementindustrie aus den Umweltschutzvorgaben heraus immer mehr Zumahlstoffe mit eben solchen Nacherhärtungseffekten einsetzt. Für neuere Betone ist die vergleichende „eichende“ Messung vor Ort also noch viel notwendiger als ohnehin bei der Nutzung von elektronischen Feuchtemessgeräten. Die hier erfolgten Korrekturen mit Tabelle 3 mittelt alle durchgeführten Messungen, erfasst also den beobachteten Spezialeffekt der beiden eingesetzten Zusatz- und Zumahlstoffe kaum. Eine Fortsetzung der Untersuchungsreihe für zumahlstoffreiche Zemente in dem vom Autor geleiteten Institut ist angedacht.

Für die beiden Zementleim armen Betone „F1“ erkannten die elektronischen Anfangsmessungen direkt nach dem Öffnen der Versiegelung den tatsächlich geringeren Anmachwassergehalt nicht; ein Erkennen stellte sich erst bei der 18 Monate-Messung ein.

Bei den Geräteklassen A) und B) ist grundsätzlich mit stärkeren Abweichungen zu rechnen, wenn kein natürlicher Austrocknungsgradient vorliegt.

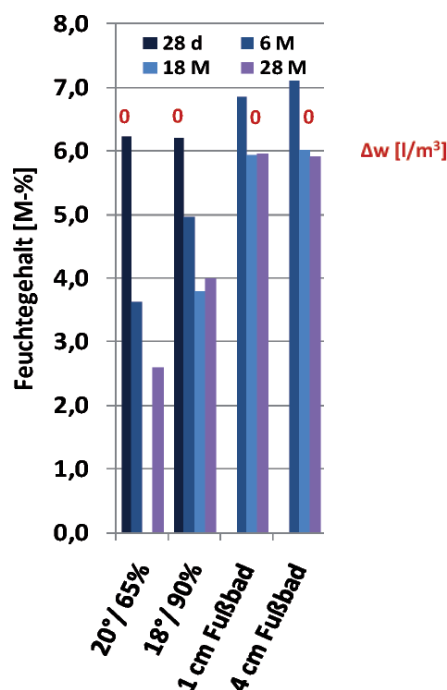


Bild 9. Die Darrwerte der Versuchsreihe 3: Standardmischung / variierte Lagerung
Fig. 9. The results of kiln drying of the test series 3: Standard mixture/ varied storage

	6 Monate				18 Monate				28 Monate			
	20°/ 65%	18°/ 90%	1 cm Fußbad	4 cm Fußbad	20°/ 65%	18°/ 90%	1 cm Fußbad	4 cm Fußbad	20°/ 65%	18°/ 90%	1 cm Fußbad	4 cm Fußbad
Darren [M-%]	3,6	5,0	6,9	7,1		3,8	5,9	6,0	2,6	4,0	6,0	5,9
CM-Gerät	1,5	-0,4	-0,1	-0,8		0,5	0,9	0,0	-0,2	-0,1	-1,0	0,0
Kapazitiv 1	0,0	-0,3	-2,6	-2,5		1,3	-1,5	-1,5	0,0	1,1	-0,8	-1,4
Kapazitiv 2	1,4	0,7	-1,3	-1,6		0,8	-1,6	-1,7	0,0	0,2	-1,6	-1,9
Kapazitiv 3	1,9	0,6	-1,3	-1,5		0,1	-2,1	-2,1				
Mikrowelle	0,5	-0,6	-1,6	-1,9		0,3	-2,5	-2,5	0,3	-0,3	-3,5	-2,4
Widerstand ~	2,6	0,1				2,0			0,2	0,9		
Widerstand =	1,3	0,0				1,0			0,2	0,4		
bis 28d versiegelt, dann variierte Lagerung												
etwa gleicher Leim												

	Abweichung ≤ 0,5 %-Punkte
	Abweichung ≤ 1,0 %-Punkte
	Abweichung ≤ 1,5 %-Punkte
	Abweichung > 1,5 %-Punkte

Bild 10. Alle korrigierten Messwerte der elektronischen Feuchtemessgeräte in der Versuchsreihe 3
Fig. 10. All corrected measured values of the electronic devices in the test series 3

4.3 Die Messergebnisse der Versuchsreihe 3: Standardbetone mit variierten Lagerbedingungen

Diese Versuchsreihe erfasst eine nur kurze Versiegelungslagerung von 28 d vor der dann beginnenden Austrocknung bzw. vor der Lagerung in feuchtem Klima. Zwei Fußbadlagerungen ergänzen diese Reihe, die gemäß [2] bei der Dicke der Betonplatten von nur 5 cm zur Durchfeuchtung der Proben führen.

Die Referenz-DARRWERTE in Bild 9 zeigen, dass das hier frühere Entsiegeln der Proben, bereits nach 28 d statt nach 6 Monaten, sich bei der Lagerung 20 °C/ 65 % r. L. für den Feuchtegehalt nach 28 Monaten im Vergleich zu dem entsprechenden Wert nach Bild 7 kaum mehr auswirkt, da der verwendete Zement CEM I 42 R sehr schnell reagiert.

Das kühlere, feuchte Lagerungsklima 18°C/ 90 % r. L. führt nach 28 Monaten erwartungsgemäß zu deutlich höherem Darrfeuchtegehalt als die Normallagerung. Beide Fußbadlagerungen führen, wie bei der Probekörperhöhe von nur 5 cm mit [2] erwartet, zur Durchfeuchtung des Zementsteins der betrachteten Betone.

Die ELEKTRONISCHE FEUCHTEMESSUNG in dieser Versuchsreihe, dargestellt in Bild 10, reagiert wie folgt auf die vorgenommenen Variationen: Es liegen hier besonders viele Fehlmessungen vor. Dies weist wieder auf das Problem der Feuchteerfassung von jungen Betonen mit nicht vorhandenen Feuchtegradienten hin. Für die 6-Monats-Messung ist dies auch der Tatsache geschuldet, dass die verwendeten Korrekturwerte aus den Mittelwerten aller Abweichungen berechnet wurden, wobei die große Mehrzahl der 6-Monats-Messungen jedoch an bis dahin versiegelten Proben stattfand, so dass in der Reihe 3 die Korrekturwerte nur unzureichend repräsentativ sind. Die 28 Monate Messung zeigte bei den Problemen nicht mehr. Auffallend ist die entsprechend

festgestellte deutliche Unterschätzung der Kapillarsättigung der Betonplatten bei Fußbadlagerung für alle getesteten elektronischen Geräte: Auch hier liegt kein Feuchtegradient vor. Für die Anwendungspraxis heißt dies, dass bereits moderate Anzeigesprünge auf Feuchteprobleme hinweisen können.

5 Zusammenfassung

Sechs elektronische Feuchtemessgeräte wurden angewendet auf Betonplatten variierten Komponenten, Zementsteingehalte und Vorlagerungen. Als Referenzverfahren dienten das Darrverfahren und die CM-Methode, unterstützt durch theoretische Überlegungen.

Als Anfangsschwierigkeit der elektronischen Feuchtemessung stellte sich heraus, dass es keine allgemein gültige Kalibrierung dieser Geräte für die Anwendung „an Beton“ gibt, obwohl die Hersteller entsprechende Auswertungstabellen vorhalten. Nachdem je Messzeitpunkt eine eigene Kalibrierung auf die hier geprüften Betonplatten vorgenommen wurde, zeigten alle Geräte eine brauchbare Anwendbarkeit, mit allerdings einigen systematischen Abweichungen: Die Betonzusammensetzung bei gleichem Zementsteingehalt betreffend ergab sich:

- Die Werte der Widerstandsmessmethoden können durch die äußere Bewehrungslage und Chloride beeinflusst sein.
- Bezüglich der Gesteinskörnung zeigte die Mikrowellenmesstechnik eine Beeinflussung durch das dichte Basalt- und Kalksteinkorn. Ferner liegt eine deutliche Messtemperaturabhängigkeit vor.

- Die kapazitative Messmethode wird durch hohe Chloridgehalte des Betons beeinflusst.

Die sich fundamental auf die Feuchtegehalte auswirkenden Änderungen des Zementsteinvolumens im Beton wurden prinzipiell befriedigend abgebildet. Leider gibt es aber für alle getesteten Geräte Probleme bei Betonen mit signifikanten Flugasche- und Hüttensand-Anteilen am Bindemittel: Offensichtlich wird der sekundäre Erhärtungseffekt von Zuzug- bzw. Zusatzstoffen messtechnisch nicht richtig erfasst: Der Ist-Feuchtegehalt wird unterschätzt.

Besondere Vorsicht ist bei den zerstörungsfreien Messgeräten geboten, wenn der Beton kein natürliches Austrocknungsprofil aufweist; ein solches liegt z. B. nicht vor bei behinderter Abtrocknung (in den Versuchen durch die Versiegelung) oder bei vollständiger Hinterfeuchtung.

Die aufgezählten Schwächen unterstreichen die Notwendigkeit, bei der Anwendung der Geräte eine vor Ort Kalibrierung

am jeweiligen Untersuchungsobjekt vorzunehmen, mindestens durch die Null-Messung an einem nicht durch Feuchte beeinflussten Bereich des betrachteten Betons.

Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Beuth Verlag Berlin, Ausgabe 2001
- [2] Schäper, M.; Kreye, J.: Die kritischen Randbedingungen einer Innenbeschichtung Weißer Wannen. Beton- und Stahlbetonbau 98, Januar 2003, Heft 1, S. 30–41
- [3] Scholl, A.: Feuchtemessung von Beton – Entscheidende Parameter, Geräte. Diplomarbeit im Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen am Institut für Baustoffe und Konstruktion der Hochschule RheinMain, Sept. 2008
- [4] Rostasy, F.S.: Baustoffe für Architekten und Bauingenieure, Kohlhammer Verlag, Stuttgart 1983, ISBN 3–17–007928-X