



*Umweltzentrum
des Handwerks Thüringen*

Ergebnisse des Modellprojekts

Qualitätssicherung und Monitoring im Bauwesen durch
die prototypische Anwendung von lichtoptischen und
elektrischen Feuchtesensoren in der handwerklichen
Praxis

Herausgeber: Umweltzentrum des Handwerks Thüringen
In der Schremsche 3
07407 Rudolstadt
Tel.: 03672 377180
Fax: 03672 377188
E-Mail: info@umweltzentrum.de

Dezember 2012

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
1 Darstellung der Ausgangssituation	1
2 Zielstellung	4
3 Theoretische Grundlagen des Messprinzips	5
4 Aktivitäten und Ergebnisse	9
4.1 Test am kleinen Mauerwerk	9
4.2 Praxistests bei der Bau Ausbau gGmbH	12
4.2.1 Ausgewählte Materialparameter der Estrichmaterialien und Kalkmörtel	13
4.2.2 Die Messaufbauten	14
4.2.3 Ausgewählte Messergebnisse	15
5 Abschließende Fachtagung.....	18
6 Zusammenfassung.....	21
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV

1 Darstellung der Ausgangssituation

Monitoring von Bauwerkszuständen wird ein immer wichtigerer Bestandteil im Bauwesen. Die Ermittlung von Bauwerksinformationen ist sowohl im Neubau als auch im Bestand für die Qualitätssicherung, Instandsetzung sowie für die Zustandserfassung von Bauwerken von großer Bedeutung. Im Bereich des Bauwesens gilt es nicht nur Tendenzen innerhalb der technologischen Entwicklung, sondern auch Veränderungen in den Bereichen der Qualitätssicherung, der Sicherheit und der damit verbundenen Thematik der Überwachungsmessungen zu betrachten.

An der Professur Bauchemie der Bauhaus-Universität in Weimar wurde eine neue Messmethode labortechnisch entwickelt, mit welcher man den Feuchtegehalt der Poren sowie das Porenvolumen ohne mathematisch abstrakte Modelle bestimmen kann. Diese Methode bietet im Vergleich mit anderen Porosimetrie- und Feuchtegehaltbestimmungsverfahren gemäß Stand der Technik einige Vorteile. Die Erfindung ist im Besonderen im Hinblick auf die messtechnischen Erfordernisse in verschiedenartigen Revitalisierungsverfahren (Bestimmung des optimalen Sanierungszeitpunktes bzw. der Nachhaltigkeit/Wirksamkeit der technischen Maßnahmen) zu sehen. Auf diesem bautechnischen Gebiet ist es notwendig in größeren Zeitabständen an definierten Orten im Volumen von Bauteilen realitätsnah die Feuchte ohne merkliche Verfälschungen durch Störeinflüsse (gelöste Salze, Temperatur, Oberflächentrocknung) und korrosive Sensor-Degradation zu messen. Der optische Feuchtigkeitssensor ermöglicht das Monitoring der Feuchtegehalte bzw. -verteilung im Bauteilvolumen für die Bauwerksüberwachung unabhängig von dem Mauerwerkssalzgehalt bzw. -temperatur. Im Mittelpunkt steht die bisher unbekannt Kombination von vorteilhafter langzeitlicher Feuchtemessung in den örtlichen Original- bzw. Vergleichsbaumaterialien im zeitaktuellen Zustand des Bauteils mit einem IR-optischen Transmissionsprinzip der Sensoren. Zusammenfassend dargestellt, hat im Vergleich zur elektrischen Feuchtediagnostik der mittels Lichtdurchlässigkeit gemessene Durchfeuchtungsgrad nachhaltige Vorteile, welche für einen prototypischen Einsatz im Bauhandwerk entscheidende Impulse liefern können:

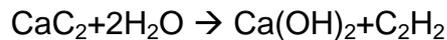
1. Unabhängigkeit vom Salzgehalt (keine Farbenänderungen durch baurelevante Schadsalze)
2. Unabhängigkeit von der Temperatur der Porenlösung (kein relevanter Temperatureinfluss)
3. Zerstörungsarme und chemisch „reaktionsneutrale“ Messungen am Bauwerkstoff (keine Elektrodenreaktion)
4. Möglichkeit des Langzeitmonitorings
5. günstige Messmethode, wartungsfrei, minimalinvasiv, die keine großen Vorbereitungen und keine aufwendige Messtechnik erfordert

Die vorhandenen Feuchtemessmethoden lassen sich in konventionelle Verfahren (CM-Methode, Darmmethode, Elektrischer Widerstand, Elektrische Kapazität, Ultraschall, Tracer-Methode) und unkonventionelle strahlungstechnische Verfahren (Röntgenstrahlung, Mikrowellen, Gammastrahlung, Neutronenstrahlung, Kernmagnetische Resonanz) einteilen. Obwohl diese Verfahren in mehr oder weniger großer Breite angewendet werden, zeigt sich, dass quantitative bzw. unverfälschte Ergebnisse zum Durchfeuchtungsgrad nur erzielbar sind, wenn Parameter wie z. B. der Salzgehalt, die Temperatur und die Vielfalt des Einflusses der inneren Phasengrenzen des zu untersuchenden Werkstoffs berücksichtigt werden. Dabei erfordert diese genaue Untersuchung oft die Teilerstörung des Bauteils. Für eine realitätsnahe unverfälschte Messung des Feuchtegehalts im Volumen von porösen Bauwerkstoffen sind elektrische Verfahren wegen des merklichen Störeinflusses von mobilen Salzionen und den sekundären Temperatureinfluss weitgehend ungeeignet.

Zwei häufig angewandte Methoden zur Feuchtemessung sind im Folgenden näher erläutert:

1. Calciumcarbid-Methode

Die CM-Messung ist ein Verfahren zur Feuchtemessung von mineralischen Baustoffen. Die Reaktion von Calciumcarbid mit Wasser bildet dabei die Basis. Calciumcarbid und Wasser reagieren bei Kontakt unter Bildung von Acetylen und Calciumhydroxid.



Bei der CM-Messung wird eine Materialprobe zerkleinert mit mehreren Stahlkugeln und einer Calciumcarbidampulle in ein Stahlbehältnis gegeben. Der Stahlbehälter wird mit einem gasdichten Verschluss, auf dem ein Druckmanometer angebracht ist, verschlossen. Im darauf folgenden Schritt wird das Stahlbehältnis geschüttelt. Die Stahlkugeln zerkleinern die Materialprobe weiter und zerstören die Calciumcarbidampulle. Das Calciumcarbid reagiert mit der Feuchtigkeit der Materialprobe zu Acetylen. Das Acetylen erzeugt einen gewissen Druck in dem Stahlbehältnis und anhand einer Tabelle kann von dem Druck auf den Feuchtegehalt der Materialprobe in Massenprozent geschlossen werden. Bei manchen CM-Messgeräten kann der Durchfeuchtungsgrad direkt am Druckmanometer in Massenprozent abgelesen werden.

2. DARR-Methode

Bei der DARR-Methode wird ein Probekörper des zu untersuchenden Bauteils entnommen und in einem Trocknungsschrank getrocknet. Gleichzeitig wird in regelmäßigen Abständen das Gewicht des Probekörpers bestimmt bis eine Gewichtskonstante eintritt. Aus der Differenz zwischen den entnommenen und getrockneten Probekörper wird der Anteil der Feuchte bestimmt.

Beide Messmethoden haben den Nachteil, dass Materialproben entnommen werden müssen und ein langzeitliches Monitoring nicht möglich ist.

2 Zielstellung

Das Ziel des Vorhabens war es, die Technologie der Messung von Bauwerksinformationen prototypisch in die praktische Anwendung zu integrieren, um damit den Anforderungen des Marktes in den Bereichen des Neubaus, der Modernisierung, der Sanierung sowie der Restauration von denkmalgeschützten Objekten Rechnung zu tragen. Das Ergebnis des Projektes sollte zum einen die Möglichkeiten des Transfers des Messverfahrens in eine praktikable Anwendung evaluieren und Voraussetzungen spezifizieren. Das Ergebnis des Transferprojektes beinhaltet die Bereitstellung eines Messverfahrens zur langzeitlichen Betrachtung von Feuchte in verschiedenen Bauwerksbereichen. Schwerpunkt in der Aufgabenstellung ist die Abstraktion beim Einsatz der Messelemente, sowie die Anwendbarkeit auf eine hohe Bandbreite von Anwendungen und Materialien, unter Berücksichtigung der Aspekte der einfachen und wenig aufwendigen Handhabung, einem geringen Kostenfaktor und der Bereitstellung von Parametern zur Qualitätssicherung handwerklicher Tätigkeit.

3 Theoretische Grundlagen des Messprinzips

Durch die Erkenntnis, dass poröse, in der Baupraxis eingesetzte Bauwerkstoffe eine quantitativ durch den Porenfeuchtigkeitsgehalt bestimmte Lichtdurchlässigkeit aufweisen, ist es möglich geworden, derartige Bauwerkstoffe mit einer Materialdicke bis zu 9 mm zu analysieren. Die Lichtdurchlässigkeitsuntersuchungen zeigten, dass die Poren je nach ihrer Struktur und lichtoptischen Matrix-Eigenschaften eine unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit besitzen. Die Lichtleitung des Wassers in den Poren eines Bauwerkstoffs ermöglicht die Messung des Feuchtegehalts. Die Lichtleitung bzw. -streuung in einem porösen Bauwerkstoff mit hoher Feuchtebelastung ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Der Einfluss des Durchfeuchtungsgrades (Dfg) auf die Lichtleitverhältnisse im Porensystem erscheint nahe liegend. In dieser stark vereinfachten, strahlenoptischen Betrachtung erfolgt die Lichtstreuung vorzugsweise durch Beugungserscheinungen an Gefügebestandteilen (Spalten, Kreisöffnungen bzw. Porenengstellen, engen Kapillarporen oder Oberflächenrauigkeiten) bzw. durch Totalreflexion an den Grenzflächen Wasser/Luft.

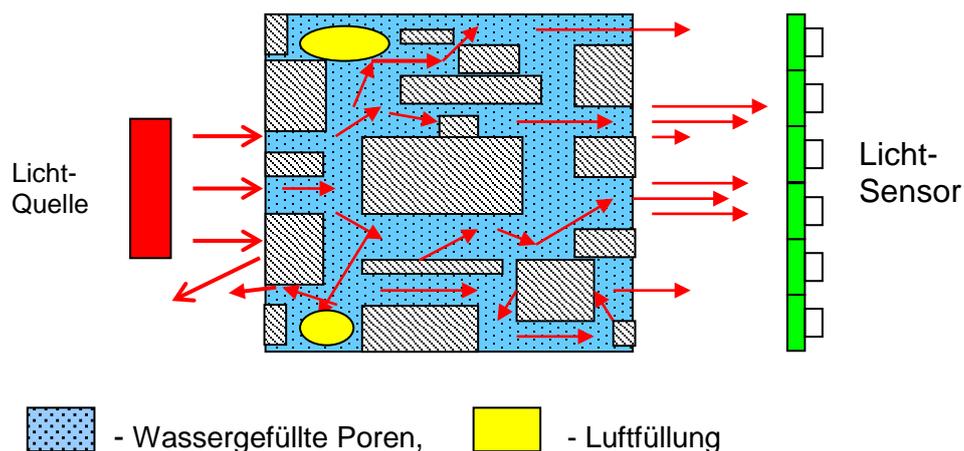


Abb. 3-1 Schema zur Lichtleitfähigkeit in den Poren des Bauwerkstoffs

Der Vorteil des neuen lichtoptischen Feuchtesensors besteht in der Integration von Lichtquelle und –empfänger in einem kompakten robusten Gehäuse und in der Unabhängigkeit der Messung von dem Salzgehalt der Porenlösung und der Temperatur. Wie bekannt ist, sind elektrische Leitfähigkeitsmessungen bei höheren Salzgehalten nicht in der Lage, quantitative feuchtediagnostische Resultate zu liefern, da die Salzkonzentration den Widerstand der Lösung maßgeblich beeinflusst. Die optische Messmethode benötigt keine korrossionsanfälligen Metallelektroden und schließt das Messergebnis verfälschende Wassersetzung (Elektrolyse) aus.

Der Aufbau des lichtoptischen Feuchtesensors ist in der Abbildung 3-2 schematisch dargestellt.

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Poröser Bauwerkstoff (PBW) | 4. Filter- und Kontaktschicht (elastisch, porös) |
| 2. Lichtquelle (LED) | 5. Elektrischer Anschluss |
| 3. Fotodiode (FD) | 6. Segment Isolationswand |

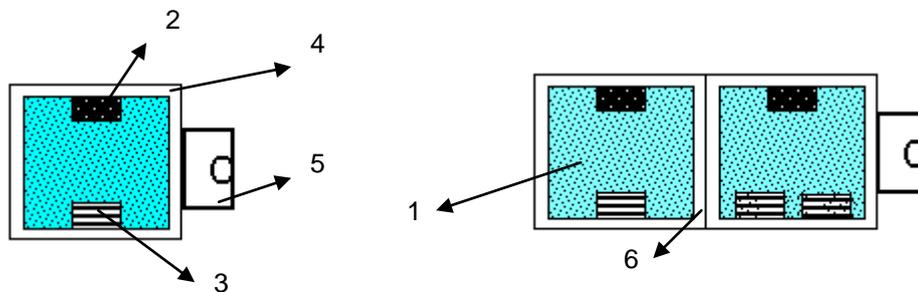


Abb. 3-2 Schematische Darstellung des lichtoptischen Ein- und Mehrsegment Sensors

Das Licht der Infrarot-LED wird durch die Porenfeuchtigkeit transmittiert und die Lichtintensität mit Hilfe der Fotodiode registriert. Je mehr Feuchtigkeit vorhanden ist, desto größer ist die Potenzialdifferenz an der Fotodiode. Im Labor werden die Werte jeden Sensors mit unterschiedlichen Durchfeuchtungsgraden kalibriert. Die Abbildung 3-3 zeigt beispielhaft die Kalibrierkurven verschiedener Bauwerkstoffe (PBW) mit unterschiedlichen Materialdicken.

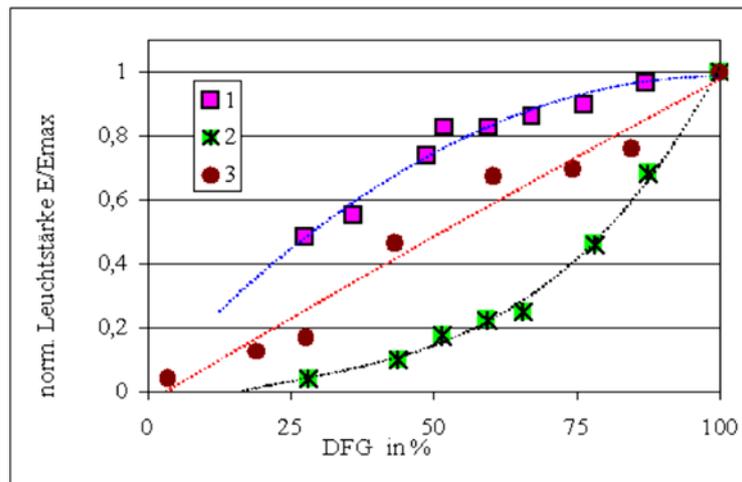


Abb. 3-3 Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad (Dfg)
1- Kalksandstein, 2- Ziegel, 3- Natursandstein

Die Bauwerkstoffmaterialien werden mit einer Diamantkreissäge in parallele Platten von wenigen Millimetern Dicke geschnitten. Die Kalibrierung wird mit deionisiertem Wasser durchgeführt. Mit dem Verdunsten wird der PBW bei Raumtemperatur auf einen bestimmten Durchfeuchtungsgrad eingestellt und anschließend gravimetrisch kontrolliert.

Die Ausführung des lichtoptischen Feuchtesensors (LOF-Sensor) kann sich konstruktiv und technologisch unterscheiden. Es können Ein- und Mehrsegment- Feuchtesensoren bzw. eine geometrisch definierte Anordnung von mehreren Sensoren zum Einsatz kommen. Abbildung 3-4 zeigt die Anwendung mehrerer lichtoptischer Feuchtesensoren im Mauerwerk.

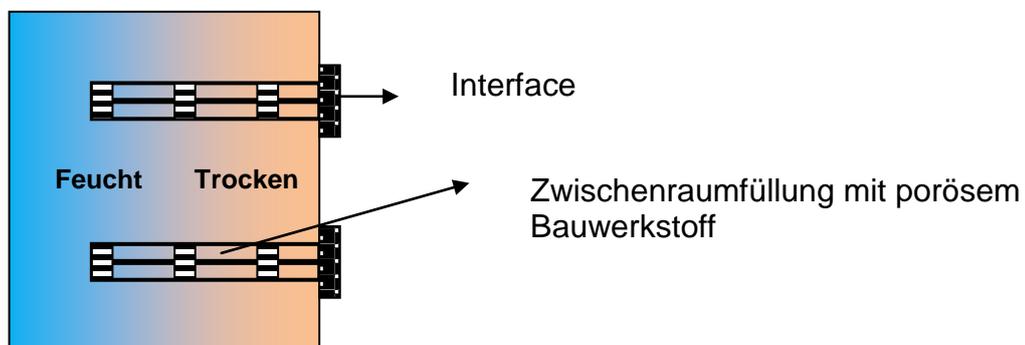


Abb. 3-4 Anwendung mehrerer lichtoptischer Feuchtesensoren im Mauerwerk

Wegen der kompakten Größe des Sensors besteht die Möglichkeit, die Sensoren beim Errichten des Bauteils am Messort einfach zu applizieren oder nachträglich über eine kleine Kernbohrung in das Bauteil einzuführen, z. B. in ein bestehendes Mauerwerk.

4 Aktivitäten und Ergebnisse

4.1 Test am kleinen Mauerwerk

Für eine Analyse des lichtoptischen Feuchtesensors wurde beschlossen, die Funktionsweise der Sensorik an einem provisorischen Mauerwerk zu analysieren. In dem Mauerwerk wurden drei Feuchtesensoren verbaut:

1. Lichtoptischer Sensor → poröser Bauwerkstoff = Kalksandstein
2. Lichtoptischer Sensor → poröser Bauwerkstoff = Mauermörtel
3. Elektrischer Sensor

Um bestimmte Feuchteschwankungen zu simulieren wurde das Mauerwerk regelmäßig mit 0,5l Wasser durchfeuchtet.

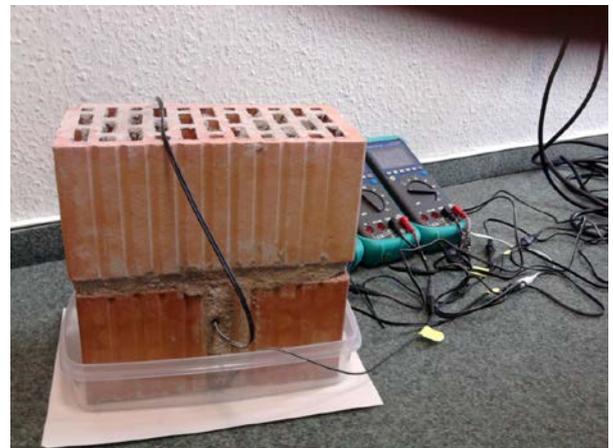


Abb. 4-1 Messaufbau Test „kleines Mauerwerk“

Über drei Multimeter PCE-DM22 sind die Messwerte automatisch ausgelesen worden. Alle drei Multimeter wurden von einem Netzteil mit Spannung versorgt, so dass eine dauerhafte Messung über mehrere Monate möglich war. Zusätzlich ist die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchte des Messraumes mittels eines Datenloggers erfasst worden.

Messergebnisse:

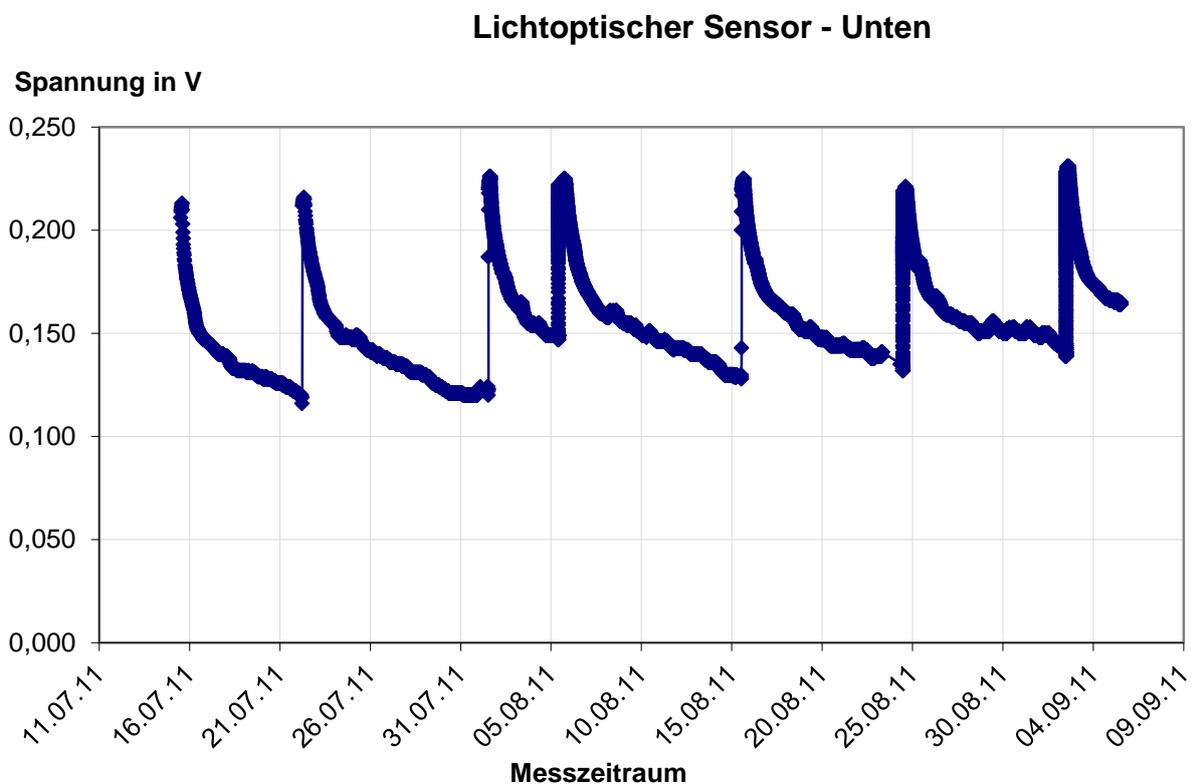


Abb. 4-2 Messergebnis Test „kleines Mauerwerk“ unterer Sensor

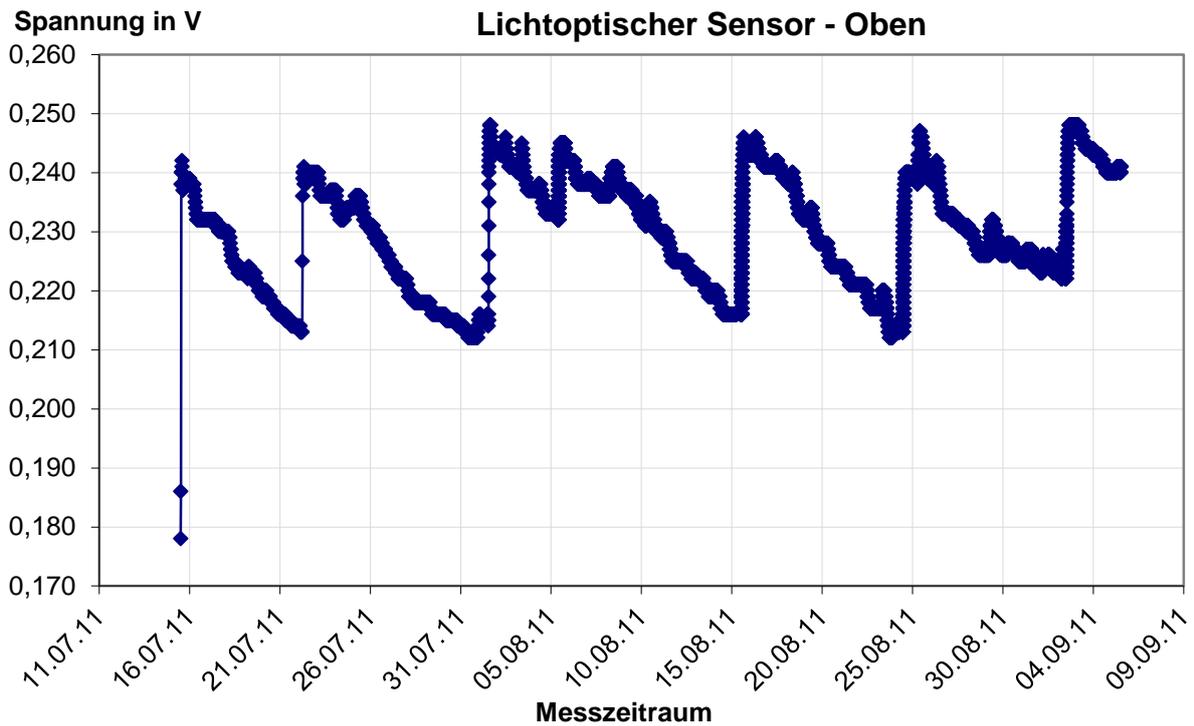


Abb. 4-3 Messergebnis Test „kleines Mauerwerk“ oberer Sensor

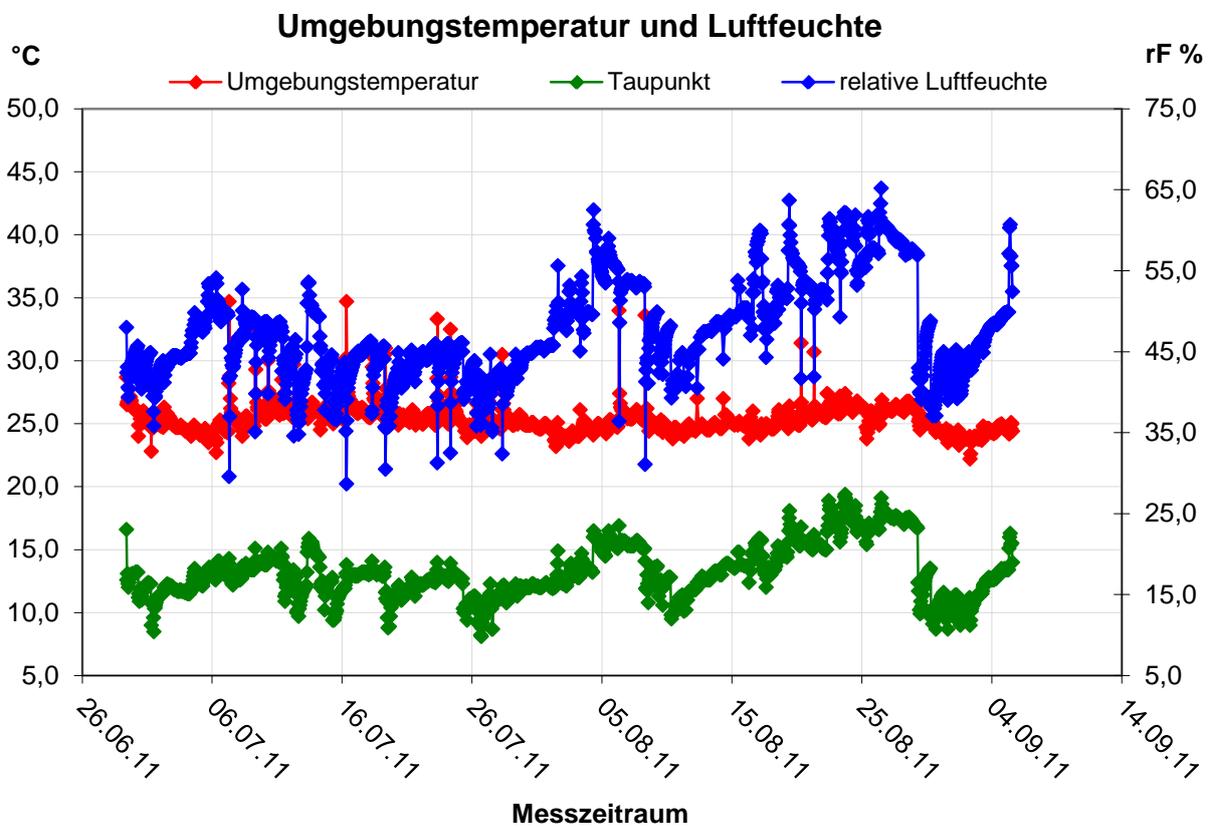


Abb. 4-4 Umgebungstemperatur & Luftfeuchte Test „kleines Mauerwerk“

An den Messergebnissen ist zu erkennen, dass die beiden lichtoptischen Feuchtesensoren auf die Veränderung der Feuchte reagiert haben. Es wurde festgestellt, dass bei dem lichtoptischen Feuchtesensor mit Mörtel im Zwischenraum ein exponentieller Trocknungsverlauf zu erkennen ist, wobei bei dem lichtoptischen Feuchtesensor mit Kalksandstein im Zwischenraum ein linearer Trocknungsverlauf zu beobachten ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Sensoren auf Veränderung der Temperatur und relative Luftfeuchte im Messraum reagieren. Steigt die Luftfeuchte im Messraum, so steigt auch die maximale Spannung der Sensoren.

4.2 Praxistests bei der Bau Ausbau gGmbH

Bei der Bau Ausbau gGmbH bestand die Möglichkeit, den lichtoptischen Sensor in porösen Bauwerkstoffen zu testen, welche in der Praxis häufig eingesetzt werden. Insgesamt wurden drei Praxistests bei der Ausbau gGmbH durchgeführt.

Folgende Aufbauten wurden verwendet:

- Zwei Estrichflächen mit einem Maß von jeweils 100x100x4 cm³ mit den Materialien:
 - Calciumsulfat-Fließestrich CAF-C25-F5 von Maxit
 - Zementestrich CT-F4, Mischungsverhältnis 1:4, Portlandzement CEM I 42,5 N
- Zwei Mauerwerke bestehend aus den Materialien:
 - Porotonziegel
 - Gasbeton

4.2.1 Ausgewählte Materialparameter der Estrichmaterialien und Kalkmörtel

Die porösen Bauwerkstoffe der Estrichflächen besitzen unterschiedliche Eigenschaften. Die offene Porosität der Bauwerkstoffe beträgt in etwa 16% - 30%. Des Weiteren besitzen die porösen Bauwerkstoffe merklich verschiedene Porenradienverteilungen.

Die offene Porosität der Proben $P_{Vol.}$ (in Vol.%) wurde mit der Gleichung 1 und der während der Untersuchungen gemessene Durchfeuchtungsgrad (D_{fg}) mit der Gleichung 2 berechnet.

- m Probenmasse in kg (t - trocken, fg - feucht-vollgesättigt)
 V_{Pr} Probenvolumen in m^3
 ρ_w spezifische Dichte des Wassers

$$P_{Vol.} = \frac{\rho_w \cdot (m_{fg} - m_t)}{V_{Pr.}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$D_{fg} = \frac{m - m_t}{m_{fg} - m_t} \cdot 100\% \quad (2)$$

Tabelle 4-1 Materialparameter

Proben	Trockenrohdichte ρ [g/cm^3]	Offene Porosität $P_{Vol.}$ [%]
Zement Estrich	2,17	16,1
CaSO ₄ Estrich	1,92	21,6
Kalkmörtel	1,93	30,3

4.2.2 Die Messaufbauten



Abb. 4-5 Messaufbau erster Praxistest



Abb. 4-6 Messaufbau zweiter Praxistest

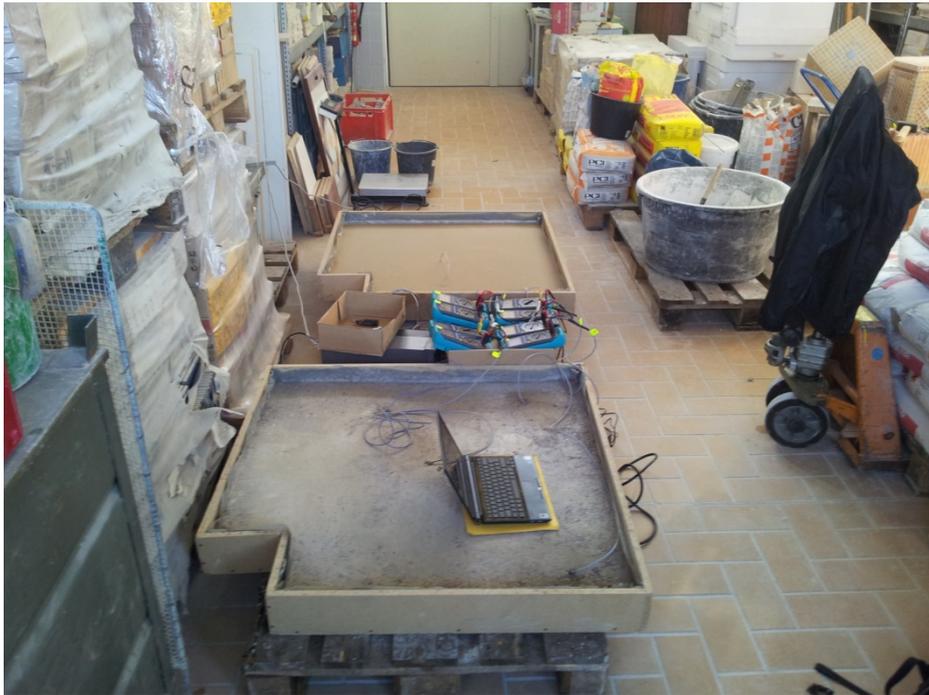


Abb. 4-7 Messaufbau dritter Praxistest

4.2.3 Ausgewählte Messergebnisse

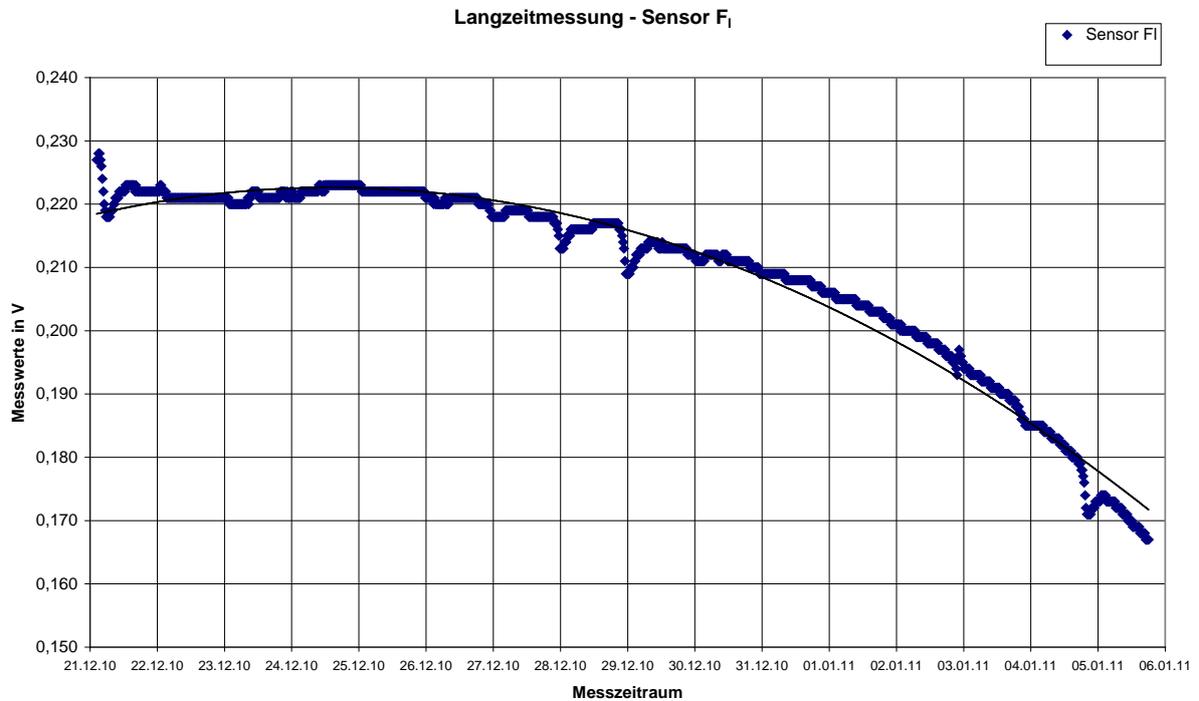


Abb. 4-8 Messergebnis eines lichtoptischen Feuchtesensors in Calciumsulfatestrich verbaut

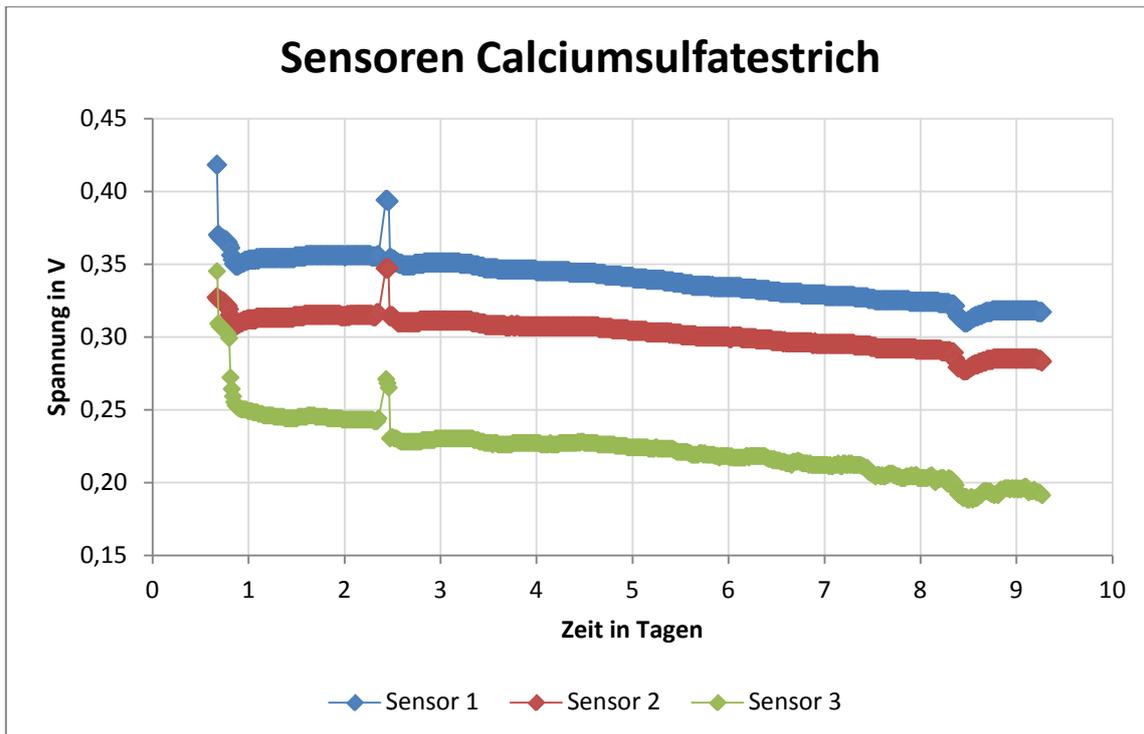


Abb. 4-9 Messergebnisse von drei Sensoren, welche im Calciumsulfatestrich verbaut waren

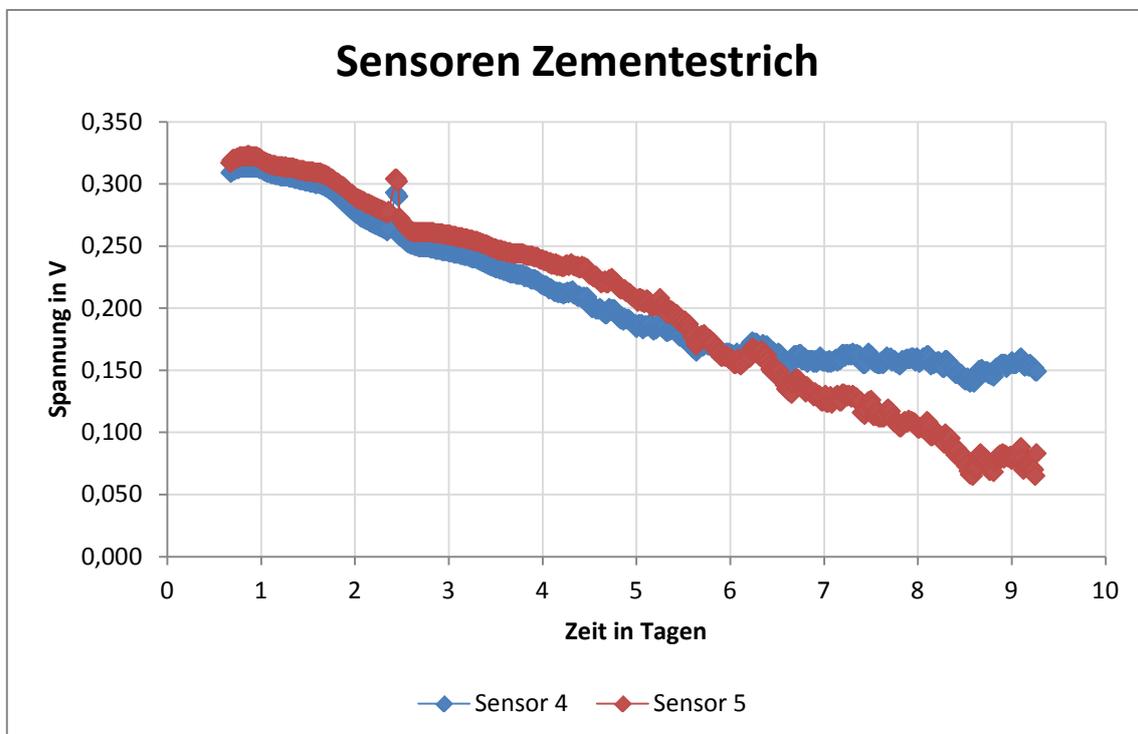


Abb. 4-10 Messergebnisse von zwei Sensoren, welche im Zementestrich verbaut waren

Die Messwerte wurden automatisch mit einem Messintervall von 20 Minuten aufgezeichnet. In den Abbildungen 4-8 – 4-10 ist in ausgewählten Diagrammen die Fotodiodenspannung als Funktion der Zeit für die Erstarrung und Erhärtung der Estriche dargestellt. Die Untersuchungen haben deutlich gezeigt, dass der LOF-Sensor sehr empfindlich ist. Die Trocknungsprozesse der Estrichproben wurden unter den gleichen Bedingungen von den LOF-Sensoren gemessen. Die Experimente belegen, dass der Feuchteausgleich zwischen den Sensorbauteilwerkstoff und dem untersuchten Bauteilwerkstoff relativ schnell erfolgt. Parallel ist zu erkennen, dass die lichtoptischen Feuchtesensoren in der Lage waren, den nötigen Feuchtegehalt in den Estrichen zu registrieren.

Neben der Feuchtemessung durch den LOF-Sensor sind zum Vergleich CM-Messungen durchgeführt worden.



4-11 Durchführungen der CM-Messung

5 Abschließende Fachtagung

Zum Abschluss des Projekts ist in der Bildungsstätte Gera-Aga der Handwerkskammer für Ostthüringen eine Fachtagung veranstaltet worden. Anhand von Präsentationen und prototypischer Praxisbeispiele wurden die Ergebnisse des Projekts mehreren interessierten Handwerkern demonstriert, neue Impulse gesetzt und ein Praxiseinsatz unterstützt.



5-1 Eröffnung der Veranstaltung durch Frank Hohle - stellv. Hauptgeschäftsführer der HWK für Ostthüringen



5-2 Beitrag zur Zusammenarbeit Bauhaus Universität Weimar und HWK für Ostthüringen durch Prof. Dr. Christian Kaps – Bauhaus Universität Weimar



5-3 Vorstellung des Messaufbaus durch Patrick Höhn – Umweltzentrum des Handwerks Thüringen



5-4 Vorstellung der Sensorik durch Ilona Hohle – HWK für Ostthüringen



5-5 Demonstrierung der Funktionalität eines Sensors anhand eines „Wassertests“ durch Dr. Oybek Bakhamov – Bauhaus Universität Weimar

6 Zusammenfassung

Die Ausführung des lichtoptischen Feuchtesensors kann sich konstruktiv und technologisch unterscheiden. Die lichtoptischen Feuchtigkeitssensoren kann man beim Errichten des Bauteils (z. B. ein Mauerwerk) am Messort applizieren oder nachträglich über eine kleine Kernbohrung in das Bauteil einführen. Der mittels Lichtdurchlässigkeit gemessene Durchfeuchtungsgrad hat mehrere Vorteile im Vergleich zur elektrischen Feuchtigkeitsdiagnostik:

1. Unabhängigkeit vom Salzgehalt
2. Kein relevanter Temperatureinfluss der Porenlösung
3. Zerstörungsarme und chemisch „reaktionsneutrale“ Messung am Bauwerkstoff
4. Günstige Messmethode, wartungsfrei, minimalinvasiv, die keine großen Vorbereitungen und keine aufwendige Messtechnik erfordert.

Aufgrund dieser Vorteile lässt die neue Messmethode ein langzeitliches Monitoring zu, da keine Mauerwerksschäden durch die Messungen entstehen.

In mehreren Feldversuchen bei der Bau Ausbau gGmbH wurde die Funktionsweise der Sensorik weiter erprobt sowie das Handling verbessert. Die Technik und das Handling der Sensoren ist so weit entwickelt worden, dass eine Anwendung zu Testzwecken auf Baustellen möglich ist. Interessierte Thüringer Handwerksunternehmen können unter Anleitung und Unterstützung der Mitarbeiter der Handwerkskammer für Ostthüringen und dem Umweltzentrum des Handwerks Thüringen die Sensorik nutzen. Messgeräte und weiteres Equipment wird durch die HWK für Ostthüringen gestellt.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1 Schema zur Lichtleitfähigkeit in den Poren des Bauwerkstoffs	5
Abb. 3-2 Schematische Darstellung des lichtoptischen Ein- und Mehrsegment Sensors	6
Abb. 3-3 Fotodiodenspannung in Abhängigkeit vom Durchfeuchtungsgrad (Dfg)) 1- Kalksandstein, 2- Ziegel, 3- Natursandstein	7
Abb. 3-4 Anwendung mehrerer lichtoptischer Feuchtesensoren im Mauerwerk.....	7
Abb. 4-1 Messaufbau Test „kleines Mauerwerk“	9
Abb. 4-2 Messergebnis Test „kleines Mauerwerk“ unterer Sensor	10
Abb. 4-3 Messergebnis Test „kleines Mauerwerk“ oberer Sensor	11
Abb. 4-4 Umgebungstemperatur & Luftfeuchte Test „kleines Mauerwerk“	11
Abb. 4-5 Messaufbau erster Praxistest.....	14
Abb. 4-6 Messaufbau zweiter Praxistest.....	14
Abb. 4-7 Messaufbau dritter Praxistest.....	15
Abb. 4-8 Messergebnis eines lichtoptischen Feuchtesensors in Calciumsulfatestrich verbaut.....	15
Abb. 4-9 Messergebnisse von drei Sensoren, welche im Calciumsulfatestrich verbaut waren.....	16
Abb. 4-10 Messergebnisse von zwei Sensoren, welche im Zementestrich verbaut waren.....	16
4-11 Durchführungen der CM-Messung	17
5-1 Eröffnung der Veranstaltung durch Frank Hohle - stellv. Hauptgeschäftsführer der HWK für Ostthüringen.....	18
5-2 Beitrag zur Zusammenarbeit Bauhaus Universität Weimar und HWK für Ostthüringen durch Prof. Dr. Christian Kaps – Bauhaus Universität Weimar	18
5-3 Vorstellung des Messaufbaus durch Patrick Höhn – Umweltzentrum des Handwerks Thüringen.....	19
5-4 Vorstellung der Sensorik durch Ilona Hohle – HWK für Ostthüringen	19
5-5 Demonstrierung der Funktionalität eines Sensors anhand eines „Wassertests“ durch Dr. Oybek Bakhramov – Bauhaus Universität Weimar	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1 Materialparameter..... 13