



Institut für Diagnostik  
und Konservierung an Denkmalen  
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 94/2012

---

## Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle

Abschlussbericht AZ 29378

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 29378



Projektträger: Zisterzienserinnenabtei Klosterstift St. Marienthal  
St. Marienthal 1  
02899 Ostritz

Berichterstattung: Dr. rer. nat. Christoph Franzen  
Dipl.-Min. Matthias Zötzl  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

und Beiträge von Projektbeteiligten: Andreas Schramm, bhd-GmbH  
André Glauche, Stuckateurmeister  
Lina Schaper, Praktikantin am IDK

Anzahl der Seiten: 79

Anlagen: 48 Seiten

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

---

**Arbeitsstellen in den Ländern:**

**Sachsen:**  
Schloßplatz 1  
01067 Dresden  
Tel.: 0351 48430 408/09/10/27  
Fax.: 0351 48430 468  
Internet: [www.idk-info.de](http://www.idk-info.de)

**Sachsen-Anhalt:**  
Domplatz 3  
06108 Halle  
Tel.: 0345 472257 21/22/23  
Fax.: 0345 472257 29  
e-mail: [info@jdk-info.de](mailto:info@jdk-info.de)

**Vorstand:**

Prof. Stephan Pfefferkorn  
Boje E. Hans Schmuhl  
Ellen Schmid-Kamke  
**Geschäftsführer:**  
Dipl.-Ing. Uwe Kalisch  
**Registergericht Dresden:** VR 2891

**Bankverbindung:**

Ostsächsische Sparkasse Dresden  
**IBAN.:** DE52850503003120115524  
**BIC:** OSDDDE81XXX  
**Kto-Nr.:** 3120 115 524 **BLZ:** 850 503 00  
**St-Nr.:** 201 140 11356  
**Ust-ID:** DE234216408

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>29378</b>	Referat	<b>45</b>	Fördersumme	<b>21.200 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	-----------------

**Antragstitel** **Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal**

**Stichworte** Hochwasser, Schäden, Denkmal, Trocknung, Mikrowelle, Restaurierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>2 Jahre</b>	<b>13/04/2011</b>	<b>13/07/2012</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Zisterzienserinnenabtei Klosterstift St. Marienthal St. Marienthal 1 02899 Ostritz	Tel
		Fax
		Projektleitung Abtei/IDK
		Bearbeiter Dr. C. Franzen

**Kooperationspartner** Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Schlossplatz 1, 01067 Dresden, Dr. Christoph Franzen, Dipl.-Min. Matthias Zötzl

### ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Durch ein Hochwasserereignis 2010 kam es zu einer teilweisen Schädigung und starken Durchfeuchtung der historischen Gipsstuckausstattung in der Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal. Die natürliche Abtrocknung dieser Ausstattungselemente geht nur schleppend voran. Es besteht die hohe Gefahr weiterer Schädigung und Gefährdung auch anderer Einbauteile. Als eine mögliche Beschleunigung der Abtrocknung soll Mikrowellenstrahlung als geringinvasive Methode zur Mauerwerkstrocknung eingesetzt werden. Einerseits könnten sich so die Elemente erhalten lassen, da sonst das Risiko eines vollständigen Rückbaus der historischen Ausstattung besteht, andererseits muss zwingend geklärt werden, ob Behandlungsmethode für das Material geeignet und nachhaltig einsetzbar ist. Die weiteren Schädigungen und Verluste an historischer Originalsubstanz sollen so gering wie möglich gehalten werden ohne das Maß für den Aufwand und ein nachhaltiges Vorgehen zu verlieren.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Durch Versuche und Vorversuche wird die Wirkung der Mikrowellenstrahlung auf das historische Material untersucht. Ein bis zweimaliger Einsatz des Mikrowellentrocknungsgerätes an Originaloberflächen ist vorgesehen. Dabei Dokumentation der entstehenden Temperaturen am und im Material (soweit im Originalmaterial möglich) und Vor- und Nachuntersuchungen der Feuchtegehalte, evtl. Salze. Herstellung von Probekörpern aus vergleichbarem Gipsstuckmaterial. Untersuchung dieser Probekörper im Labor. Daher ist auch unter Laborbedingungen der Einsatz der Mikrowellentrocknungstechnik mit Dokumentation der Temperaturentwicklung und -verteilung im Gipsstuckmaterial vorgesehen. Hierbei können über gezielte destruktive Beprobung der Probekörper und anschließender Untersuchung, Veränderungen des Materials untersucht werden.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Beim experimentellen Einsatz von Mikrowellentrocknungsgeräten an Probekörpern und in bzw. an der Michaeliskapelle konnten mehrere Ergebnisse festgestellt werden:

- Durch eine Antenne einseitig in ein Mauerwerk eingebrachte Mikrowellen führen zu einer Erwärmung der Oberfläche und des oberflächennahen Bereichs. Die Wärmeleistung nimmt in die Tiefe im Dezimeterbereich ab.
- Die Verteilung der induzierten Temperatur an der Oberfläche ist ungleichmäßig über den Antennenquerschnitt. Es wird dringend empfohlen, für Mikrowellenantennen in der Bautrocknung die Effekte der Antennen zu berechnen und zu simulieren.
- Durch die Mikrowellenbehandlung können an der Oberfläche teilweise Temperaturen erreicht werden, die weit über den Stabilitätstemperaturen der Phasen liegen, die an historischen Oberflächen vorliegen können (hier beispielsweise Gips). Das Aufbringen von weniger Leistung korreliert mit einem Einbringen von weniger möglicher Trocknungsleistung in das Mauerwerk.
- Die Auflage der Antennen an profilierte, gestaltete Oberflächen ist nicht immer ohne weiteres möglich.
- Auch bei Erwärmung eines Mauerwerksabschnittes bleibt der Abtransport der Feuchte aus dem Mauerwerk hinaus ein Engpass zur effektiven Trocknung.

Unter Berücksichtigung der großen Mauerwerksstärke und dem Ergebnis an den nachgestellten Stuckflächen Schäden induziert zu haben, kann eine Trocknung der historischen Mauern der Michaeliskapelle mittels Mikrowelle als effiziente und ungefährliche Methode mit dem Ziel viel Originalsubstanz nachhaltig zu schützen, nicht empfohlen werden. Es wurden zusammen mit den Projektbeteiligten andere Vorgehensweisen erarbeitet, nach unterstützter natürlicher Abtrocknung möglichst viel historische Originaloberfläche aus Stuck halten und aufarbeiten zu können.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Am 17. April 2012 fand eine Präsentation in der Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal statt. Projektergebnisse und Abschlussbericht werden recherchierbar am Hornemann-Institut hinterlegt. Veröffentlichungen der Ergebnisse als mündliche und schriftliche Beiträge in Fachorganen werden vorbereitet.

## ***Fazit***

Der Einsatz von Mikrowellentrocknung an historischem Baubestand ist problematisch. Zum einen liegt meist ein heterogenes Mauerwerk vor, das die Voraussage zum Eindringen der Mikrowellen in das Mauerwerk sowie Abschätzung der Schadensfreiheit der Wechselwirkung der Strahlung mit dem Baumaterial erschwert. Zum anderen ist mit relativ großen Mauerwerksstärken und empfindlichen historischen Oberflächen umzugehen.

Daher kann der Einsatz der Mikrowellentrocknung am Denkmal nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Vor dem Einsatz sind die Randbedingungen intensiv zu prüfen, um Schäden zu vermeiden. Auch sollte geprüft werden, ob durch konservative Verfahren wie gezielter und optimierter Trocknung durch natürliche oder unterstützte Lüftung nicht ebenso, und unter geringerem Einsatz von Energie, eine Abtrocknung feuchter Bauteile gewährleistet werden kann.

## Inhalt

0	Projektkennblatt.....	2
1	Einleitung .....	6
2	Beschreibung der Michaeliskapelle .....	6
2.1	Lokalisierung .....	6
2.2	Baukörper.....	7
2.3	Gliederung des Innenraums .....	7
2.4	Gestaltung und Dekor des Innenraums .....	8
2.5	Bau- und Restaurierungsgeschichte .....	9
2.6	Neißeflut am 7./8. August 2010, Folgen für die Klosteranlage .....	9
3	Einführung in die Mikrowellentrocknung .....	11
4	Versuche und Untersuchungen in der Michaeliskapelle.....	14
4.1	MW-Versuche am 5.5.2011 .....	14
4.2	Versuchsbeschreibung .....	15
4.3	Voruntersuchungen an Ausblühsalzen (XRD-Analysen).....	16
4.4	Voruntersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung .....	18
4.5	MW-Behandlung, Messung der Temperaturverteilung im Mauerwerk.....	21
4.6	Feuchteuntersuchungen begleitend zur MW-Behandlung.....	25
4.7	Untersuchungen an MW-behandeltem Gipsstuck .....	28
4.8	XRD-Untersuchungen an Gipsstuckproben .....	33
4.9	TG-Untersuchungen an Gipsstuckproben.....	33
4.10	Wasseraufnahme nach Karsten.....	34
4.11	Auswertung Vor-Ort-Untersuchungen.....	36
5	Auswertung von Klimadaten .....	36
5.1	Vorgehensweise und Messkonzept .....	37
5.2	Ergebnisse der Raumklimamessungen .....	39
5.3	Fazit zum Klima, Empfehlungen .....	40
6	Laboruntersuchungen, Probekörpermessungen .....	42
6.1	Probekörperbeschreibung .....	42
6.1.1	Probekörpermauerwerk mit Temperaturmesssonden .....	42
6.1.2	Stuckmarmor .....	44
6.1.3	Probepatte mit Gipsstuck.....	47
6.2	Versuchsdurchführung Probekörper .....	48
6.3	Ergebnisse Probekörperuntersuchungen.....	49
6.3.1	Messung der Temperaturverteilung im Mauerwerk .....	49
6.3.2	Infrarotthermographiemessungen.....	52
6.3.3	Feuchteuntersuchungen vor und nach der MW-Behandlung .....	53
6.4	Ergebnisse der Untersuchungen am Gipsstuck .....	57
6.4.1	ESEM-Untersuchungen .....	58
6.4.2	Feststellungen an der Probepatte .....	60
6.5	Diskussion der Probekörperergebnisse .....	62
6.6	Trocknungsversuch mit Radiowellen .....	62
7	Mikrowellenversuch an der Außenwand der Kapelle .....	65
7.1	Einleitung Außenwandversuch .....	65
7.2	Versuchsdurchführung.....	65

7.3	Ergebnisse der Temperaturmessungen .....	68
7.4	Feuchteuntersuchungen .....	72
7.5	Zusammenfassung und Diskussion Außenwandversuch .....	76
8	Zusammenfassung und Fazit .....	77
9	Quellen- und Literaturangaben .....	78

Anlagen:

Bericht Schramm bhd, 5.5.2011 .....	9 Seiten
Röntgendiffraktogramme .....	4 Seiten
DTA/TG – Kurven .....	2 Seiten
Karstenmessungen .....	5 Seiten
Klimadiagramme .....	9 Seiten
Bericht Schramm bhd, 19.7.2012 .....	16 Seiten
Arbeitsbericht Glauche .....	3 Seiten



Abb. 1 Michaeliskapelle Kloster St. Marienthal

## 1 Einleitung

Der Abschlussbericht zum Förderprojekt „Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal“ AZ 28762 mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) setzt sich zusammen aus Ergebnissen einzelner Zwischenberichte, die über den Projektzeitraum hinweg erarbeitet wurden, sowie zusätzlichen Kapiteln einer übergeordneten Auswertung und Zusammenfassung der Projektergebnisse.

## 2 Beschreibung der Michaeliskapelle

Die Beschreibung der Michaeliskapelle und Angaben zur Beschreibung der Flut wurde im Wesentlichen von Lina Schaper im Rahmen ihres Praktikums beim IDK zusammengestellt.

### 2.1 Lokalisierung

Die Kreuz- und Michaeliskapelle gehört zum Kloster St. Marienthal und ist zentral in der Klosteranlage gelegen. Die Zisterzienserinnenabtei St. Marienthal liegt südlich von Ostritz, im Osten von Sachsen in einer Region, die durch Braunkohleindustrie geprägt wurde. Das Kloster liegt im Tal unmittelbar an der Neiße, die hier auch die Grenze zu Polen markiert.

Wegen der Lage innerhalb des Klosterkomplexes kann die Michaeliskapelle als ein Baukörper des Baukomplexes des Klosters betrachtet werden (Abb. 2, Abb. 3). Die Klosteranlage als Baukomplex besteht aus einem geschlossenen Konventbau mit architektonisch eingegliedertem Klosterkirche, Abtei und Propstei. Zudem gruppieren sich mehrere Neben- und Wirtschaftsgebäude um einen größeren Hof, welcher sich nordwestlich des Konventbaus erstreckt. Der geschlossene Konventbau ist um einen Innenhof mit Kreuzgang angelegt. Nord- und Westflügel sind nach Osten und Westen hervorgezogen und bilden so zusätzliche Hofsituationen.

Der Westtrakt ist als Schauseite ausgestaltet. Die vorgezogenen Flügel tragen je eine Kuppel im Abschluss. Davon schließt der nördliche Flügel mit der Michaeliskapelle ab. Vor der Kapelle erstreckt sich der Klosterhof als zentrale Freifläche der Anlage. Über mehrere Blickachsen einsehbar, ist die Michaeliskapelle damit ein zentraler Punkt der Klosteranlage.

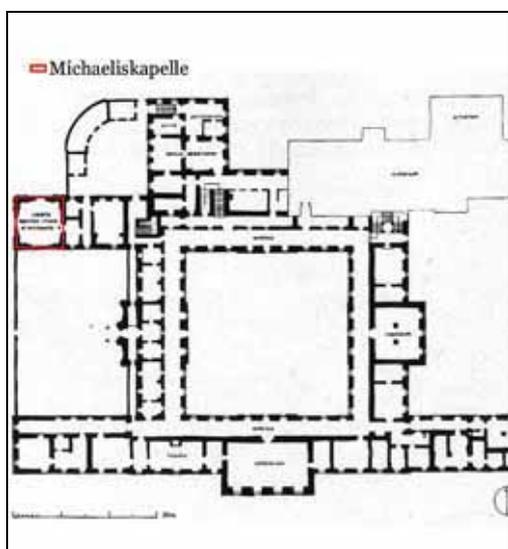


Abb. 2 Grundriss Klosteranlage (genordet)<sup>1</sup>

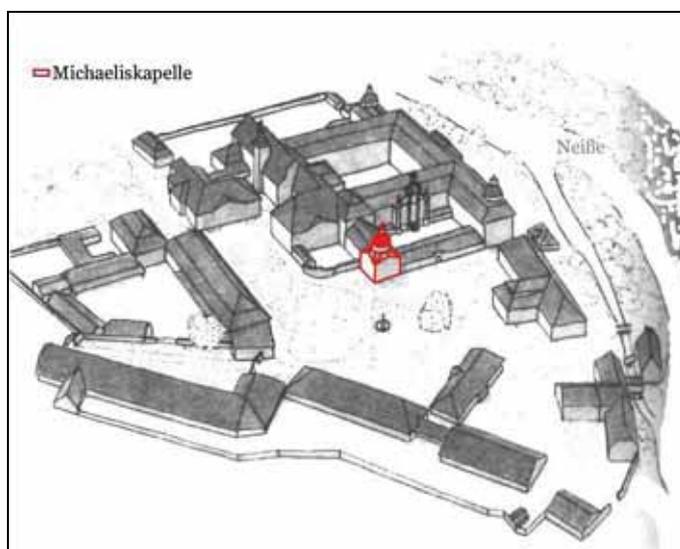


Abb. 3 Aufriss Klosteranlage (von Nordwesten)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hütter, Elisabeth; UNUM IN VERITATE ET LAETITIA, *Denkmalpflegerische Instandsetzung des Zisterzienserklosters St. Marienthal*, Sonderdruck, St. Benno-Verlag, Leipzig 1970, S.36, Abb.2

<sup>2</sup> Klose, Brigitte u. Dietrich; *Schriften des Internationalen Begegnungszentrums St. Marienthal*, Bd. 4, *Analyse der Umweltschäden und Erstellung einer Nutzungskonzeption für den Klosterhof St. Marienthal*, S.151, Abb.136

## 2.2 Baukörper

Die Michaeliskapelle steht auf einem nahezu quadratischen Grundriss. Der viereckige Unterbau entspricht in der Höhe dem zweigeschossigen Flügel. Die Schauseiten der freistehenden Nord- und Westfassaden sind mit Fensteröffnungen versehen. Der Eingang befindet sich an der Nordseite des Gebäudes.

Im Inneren wird der viereckige Baukörper durch Nischen in ein –nicht ganz gleichseitiges- Oktagon umgeformt. Diese Figurennischen, welche die Ecken des Baus umformen, sind damit im Konstruktionsprinzip Pendentifs bzw. Hängezwickel, die den Unterbau nach oben mit einem kreisrunden Gesims abschließen lassen. Zwischen Pendentifs und Kuppel befindet sich über dem breiten, kreisrunden Gesims der achteckige Tambour, der von Fenstern durchbrochen ist. Die Kuppel darüber endet oben mit einem kleinen durchbrochenen Aufbau, der Laterne.



Abb. 4 Michaeliskapelle von Nordwesten<sup>3</sup>



Abb. 5 Innenraum mit Kreuzaltar (Westwand)

## 2.3 Gliederung des Innenraums

Wie bereits in der Betrachtung des Baukörpers deutlich wurde, hebt sich die Innenarchitektur der Kapelle von der vorgegebenen Architektur ab. Der zentral wirkende Innenraum gliedert sich in Unterbau- und Kuppelzone, welche jeweils nochmals vertikal in zwei Zonen untergliedert sind.

Der Unterbau führt eine zweigeschossige Gliederung des Baukörpers fort. Die Geschossteilung erfolgt über ein breites Gesims. Im unteren „Geschoss“ bestimmen die Gliederung die vier Figurennischen, welche die Raumumformung ins Oktagon erzeugen. Fortgeführt wird diese Gliederung oberhalb des Gesimses durch vier Fresken mit Scheinarchitekturrahmungen, ähnlich gestaltet wie die Figurennischen darunter. Die vier sich gegenüberliegenden Wandzonen dazwischen entsprechen den vier Seiten des im Ursprung quadratischen Grundrisses. Sie sind breiter als die Seiten mit Figurennischen. An der Nordseite befindet sich das rundbogige Eingangsportal, wobei der Eingang im unteren Geschoss segmentbögig abschließt und die Zone darüber mit einem Fenster versehen ist. Die korrespondierenden Wandflächen zeigen dieselbe Rundbogensgestaltung, welche in der Höhe die zweigeschossige Gliederung übergreift. An diesen Seiten wird das geschossteilende Gesims aufgebrochen und mündet als Kapitell der Scheinarchitekturrahmung der Portalform. Der Raum des zweiten Geschosses wird hier vom Rundbogen eingenommen. Den oberen Abschluss bildet ein breites, kreisrundes Gesims als Übergang zur Kuppelzone.

Die Kuppelzone gliedert sich in Tambour und Kuppel mit Laterne. Der oktagonale Tambour fungiert als Zwischenglied oberhalb des Baukörpers und dient der Erhöhung der Kuppel. Zudem ist

<sup>3</sup> Fotos des IDK, aufgenommen 2009

er mit Fensteröffnungen zur Beleuchtung versehen. Mit einem weiteren kreisrunden Gesims schließt die Kuppel an. In der freskalen Ausmalung der Kuppel führen Scheinarchitekturen, in Form von vier illusionistisch gemalten Pilastern, die Gliederung fort. Damit wird die oktagonale Aufteilung des Unterbaus wieder zu vier Flächen zusammengeführt. Den oberen Abschluss bildet die Ringöffnung, welche die Lichtlaterne trägt.

## 2.4 Gestaltung und Dekor des Innenraums

In der Gestaltung der Kreuz- und Michaeliskapelle werden zwei ikonographische Themen veranschaulicht: die Verehrung des Kreuzes mit dem Kreuzaltar an der Westwand und die Verehrung des Erzengels Michael mit dem Altar an der Südwand. In den Nischen der vier Ecken der Kapelle stehen vier lebensgroße Figuren: Maria Magdalena, Petrus, Maria und Johannes der Evangelist. Die vier Fresken in den Zwickelfeldern darüber zeigen die vier Evangelisten mit ihren Attributen (Matthäus mit Engel, Marcus mit Löwe, Lucas mit Stier und Johannes mit Adler). In den Händen halten sie Schriftbänder mit den Worten: PASSUS, CRUCIFIXUS, MORTUUS und SEPULTUS. Das Thema der Passion Christi und der Kreuzverehrung wird auch im Kuppelfresko wieder aufgegriffen: eines der vier Felder zeigt die Anbetung des Kreuzes. Korrespondierend zu dieser neutestamentarischen Szene zeigt das gegenüberliegende Bildfeld die Anbetung der ehernen Schlange als alttestamentarische Szene. Die anderen beiden Bildfelder sind mit Dekormotiven, wie dem Blumenstrauß, gleich gestaltet.

Die dominierende Dekortechnik in der Michaeliskapelle ist die Stuckmarmorierung. Die zuvor beschriebene Gliederung der Wände mit Architekturelementen wird durch die Verkleidung mit Stuckmarmor hervorgehoben: Die Nischen und die Portalumrahmungen sind in hellen Sienaerde-Farbtönen marmoriert. Die Rahmen der Nischen und der Bildfelder darüber sind kontrastreich in schwarz-weißer Äderung davon abgesetzt. Die Gesimse und die Sockelzone sind in Rottönen mit blautichiger Äderung marmoriert. Zu den farbig marmorierten Stuckelementen der Wände stehen die weißen Alabastergips geschliffenen Flächen der Wandrücklagen im Kontrast.

Die Altäre sind ebenfalls mit Stuckmarmor gestaltet. Die verschiedenen Farbfacetten wechseln sich innerhalb der Gestaltung ab. So ist beispielsweise die Altarplatte rötlich marmoriert und der Altarunterbau, in Form eines Sarkophags, in schwarzem Grundton und weißer Maserung ausgeführt. Die Oberfläche der Figuren ist in weißem, geschliffenem Alabastergips gestaltet. Die plastischen Ornamente sind größtenteils vergoldet.

### *Werktechnik*

Die plastischen Ornamente und Figuren sind mit Gipsstuck auf einem Holzkern ausgeführt. Die Stuckgipsverkleidung der Wände wurde auf einem Unterputz ausgeführt. Die Grundlage eines Stuckmarmors bildet Alabastergips mit Tierleim und Pigmenten. Da die Pigmente für einen Stuckmarmor alkalibeständig sein müssen, ist zu vermuten, dass für die Farbnuancen der Michaeliskapelle vorrangig Erden / Eisenoxide zum Einsatz kamen, wie Sienaerde / Terra di Siena natur (ocker) und gebrannt (rot bis braun), Caput Mortuum (Eisenoxidrot) und Pflanzenschwarz (Kohleschwarz). Zur Erhöhung der Härte wurde der Gips oft mit Alaunlösung vorbehandelt. Die Zugabe von Knochenleim bei der Verarbeitung diente der Abbindeverzögerung. Die Materialien wurden zu einer Masse mit teigiger Konsistenz verarbeitet. Diese erhielt durch Kneten und Walzen ihre Marmorierung. Die gewalzte Masse wurde auf einem Unterputz aufgebracht. Nach dem Auftrag wurde die Fläche mehrmals geschliffen und gespachtelt, um Festigkeit und Glanz zu erhöhen. Abschließend wurde die Oberfläche poliert und konnte mit einem Überzug (Öle oder Wachse) versehen werden.

Die Vergoldungen wurden mit Blattgold auf proteingebundenem rotem Bolus mit leimgebundenem Kreidegrund ausgeführt. Neben glanzvergoldeten Partien, sind Versilberungen und Lasuren auf poliertem Gold und Silber zu finden. Die versilberten Partien waren vermutlich abschließend mit einem Schellacküberzug –oder entsprechendem- gegen Oxidation geschützt. Die Wandmalereien wurden in Freskotechnik ausgeführt.

## 2.5 Bau- und Restaurierungsgeschichte

Das Kloster in seiner jetzigen äußeren Form entstammt verschiedenen Bauperioden. Die Klosteranlage fußt auf dem Fundament von Vorgängerbauten des Zisterzienserstifts, welche auf das 13. Jahrhundert zurückgehen. Die augenscheinlich einheitlich barocke Anlage ist Mitte des 18. Jahrhunderts fertig gestellt worden. Die Michaeliskapelle entstand im nördlichen der beiden nach Westen vorgezogenen Flügel der Klosteranlage. Nach urkundlicher Erwähnung bestand hier die Kapelle bereits vor 1700, vermutlich ein Vorgängerbau<sup>4</sup>. Der Bau in seiner heutigen Gestalt, wurde 1756 zum Fest der Kreuzerhöhung und von Äbtissin Scholastika Walde (1754-1764) geweiht. Damit wurde die Michaeliskapelle, als Teil der barocken Klosteranlage, zuletzt ausgestattet.

Der nach außen zweigeschossige Flügel schließt mit der Kapelle, welche von einer Kuppel mit Laterne bekrönt wird, ab. Der benachbarte südwestliche Flügel entsprach diesem in der architektonischen Gestaltung, wurde jedoch zu Beginn des 19. Jahrhunderts um ein Stockwerk erhöht. Seit der Erbauung der Kapelle wurden keine gravierenden baulichen Veränderungen an der Michaeliskapelle vorgenommen. Bauliche Eingriffe beschränkten sich hier auf Renovierungs- und Restaurierungsmaßnahmen.

Die Michaeliskapelle war -sowie der Rest der Klosteranlage- aufgrund der Tallage direkt an der Neiße häufiger von Hochwasser bedroht. Dies hatte zur Folge, dass schon früh vermehrt Schäden auftraten und Eingriffe in die Originalsubstanz erforderlich waren. Umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen an der Klosteranlage, insbesondere an Fassaden und Dächern, sind seit der Nachkriegszeit dokumentiert.

Im Innenraum der Michaeliskapelle begann man 1968 mit verschiedenen Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten. Diese wurden 1971 abgeschlossen. In diesem Zeitraum erfolgten bei den Fresken Putzfestigungen und Ergänzungen, Reinigungen, Festigungen und Retuschen<sup>5</sup>. Am Kruzifix erfolgten Freilegungen und das Altarbild des Michaelisaltars wurde restauriert. Es erfolgten auch bildhauerische Ausbesserungen bzw. Ergänzungen. So erneuerte man beispielsweise die Ornamente der Nischen durch neugeschnitzte Teile. An den Nischenornamenten und an anderen Dekorelementen fanden umfangreiche Neuvergoldungen statt. Dabei wurden mürbe Partien abgeschliffen und der Kreidegrund erneuert. Hierfür verwendete man Knochenleim an Stelle von Hautleim, welcher für einen feinen Kreidegrund eher geeignet wäre und weniger zum Verspröden neigt. Vergoldet wurden 39 Teilstücke der vier Nischenornamente. Bearbeitete Ausstattungsstücke waren Oratoriumsgitter, Kartuschen, Kreuzaltar und Michaelisaltar<sup>6</sup>.

## 2.6 Neißeflut am 7./8. August 2010, Folgen für die Klosteranlage

Die Michaeliskapelle wurde, sowie die gesamte Klosteranlage, durch die Hochwasserkatastrophe vom 7. bis 8. August 2010 schwer geschädigt. Mit einem Wasserstand von bis zu 2,30 m im Klostergelände war es die höchste Überschwemmung in der Geschichte des Klosters.

Auslöser hierfür war ein starker Dauerregen, der zunächst die Flüsse der Region ansteigen ließ und sich mit den extremen Wassermassen aus zwei Stauseen in der Neiße zu einer enormen Flutwelle entwickelte. Das Hochwasser stieg innerhalb sehr kurzer Zeit, sodass es - trotz der Hochwasserschutzmaßnahmen und zusätzlicher Schutzwände - nicht möglich war, die Wassermassen aufzuhalten. Der Wasserhöchststand von bis zu 2,30 m wurde innerhalb kürzester Zeit im Gelände und fast allen Gebäuden der Klosteranlage erreicht. Nach knapp 24 Stunden floss die Neiße wieder aus dem Kloster ab. Die Erdgeschosszonen waren durchnässt. Zudem blieben dicke Schlammablagerungen, sowie angeschwemmtes Geäst und Treibholz zurück.

Unmittelbar nach der Flut wurden erste Maßnahmen zur Hochwasserschadensbeseitigung und zur Bauwerkstrocknung geplant und eine Notsicherung durchgeführt. Nachdem die Gebäude von groben Schlammablagerungen u. Ä. gereinigt wurden, konnte der Schadensumfang abgeschätzt werden. In den unteren Geschossebenen fast aller Gebäude waren in Mauerwerk, Fassaden, Innenarchitektur, Gestaltungs- und Verkleidungselementen sowie an Ausstattungsstü-

<sup>4</sup> Zisterzienserinnenabtei St. Marienthal, *Ein Führer durch das Kloster*, St. Benno-Verlag, Leipzig 1982

<sup>5</sup> Konservierung und Reinigung des Kuppelgemäldes durch Maler Herrmann und Kaiser

<sup>6</sup> Informationen zu Restaurierungsmaßnahmen in der Vergangenheit stammen aus Altakten des Archivs des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Dresden

cken Schäden zu verzeichnen. Dabei handelte es sich vorrangig um Feuchteschäden und deren Folgeschäden, zudem mechanische Schäden durch den Druck der Flutwelle und angespültes Geäst sowie Ab- und Einlagerungen. In den Abb. 6 bis Abb. 9 ist die Kante, bis zu den das Hochwasser stand, gut erkennbar.

Es folgte direkt eine konservatorische Notversorgung zum Abtrocknen der Gebäude und Bergen mobiler Ausstattungsstücke. Zur ganzheitlichen Konservierung und Restaurierung der Klosteranlage, war es notwendig, Sachverständige verschiedener Disziplinen einzubinden. Dementsprechend wurden interdisziplinär Konzepte zum weiteren Vorgehen erarbeitet. Im Rahmen der Analyse der Feuchteschäden wurde u. a. das Schadenspotential durch Zersetzungs- bzw. Fäulnisprozesse bei organischen Materialien betrachtet. Betroffen hiervon war insbesondere die Michaeliskapelle mit ihren Stuckmarmorelementen. Die stuckmarmorverkleideten Innenwände waren bis in ca. 1,70 m Höhe durchnässt und es zeigten sich erste Zersetzungserscheinungen des Glutinleimanteils im Stuckmarmor.



Abb. 6 Michaeliskapelle, innen, 9. Aug. 2010



Abb. 7 Michaeliskapelle, innen, 9. Aug. 2010



Abb. 8 Michaeliskapelle, innen, 9. Aug. 2010



Abb. 9 Kloster, innen, 9. Aug. 2010

### 3 Einführung in die Mikrowellentrocknung

Als Mikrowellen werden hochfrequente, elektromagnetische Wellen bezeichnet im Frequenzbereich von etwa 1 GHz bis 300 GHz, entsprechend einem Wellenlängenspektrum von 30 cm bis 1 mm. Das Spektrum der Mikrowellen umfasst damit Teile des Dezimeterwellenbereiches sowie den Zenti- und Millimeterwellenbereich und wird begrenzt durch die Radiowellen und durch den infraroten Bereich des optischen Spektrums (Abb. 10). Für technische Anwendungen sind unter anderem Frequenzen bei 433 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz freigegeben.

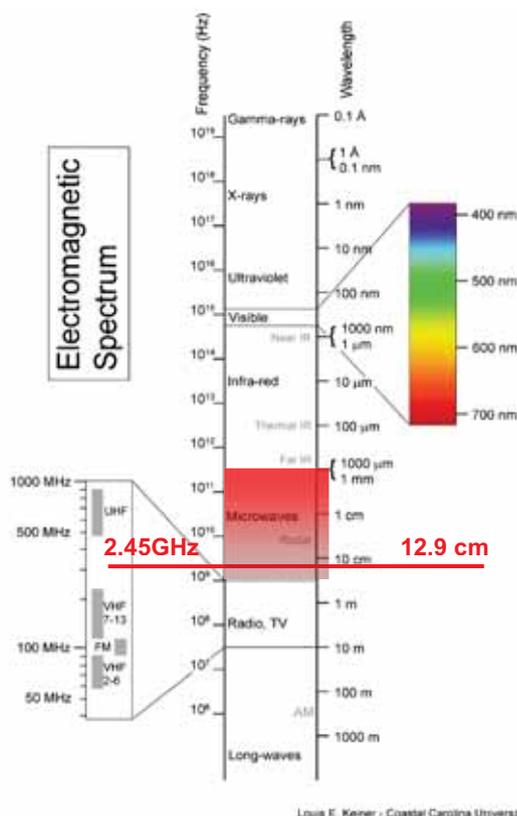


Abb. 10 Der Bereich der Mikrowellen sowie die Arbeitsfrequenz eingetragen in eine Übersicht über das elektromagnetische Spektrum (Bild: <http://kingfish.coastal.edu/marine/Animations/Images/Electromagnetic-Spectrum-3.png>)

Von entscheidender Bedeutung für eine Erwärmung von Stoffen in Hochfrequenzfeldern ist die Ausbreitung der elektromagnetischen Energie in dem betreffenden Stoff. Ein Teil der Energie elektromagnetischer Wellen kann auf Feststoffe, auf die die Wellen auftreffen oder sie durchlaufen, übertragen werden. Nichtmetallische Stoffe weisen nur eine äußerst geringe elektrische Leitfähigkeit auf. Daher können sich elektromagnetische Wellen in ihnen ausbreiten. Die Art der Ausbreitung wird im Wesentlichen von den dielektrischen Eigenschaften des Materials bestimmt. Beschrieben wird diese Eigenschaft durch die Dielektrizitätskonstante. Wird ein Material einem elektrischen Gleichfeld ausgesetzt, so bewirkt die Kraft, die vom elektrischen Feld auf die Ladungen innerhalb der Stoffes ausgeübt wird, eine Verschiebung der Ladungen bezüglich ihrer Position und Orientierung. Wenn nun ein elektrisches Wechselstromfeld angelegt wird, so erfolgt die Verschiebung im Takt des Wechselfeldes, es kommt zu einem ständigen Richtungswechsel der Dipole und Ladungen.

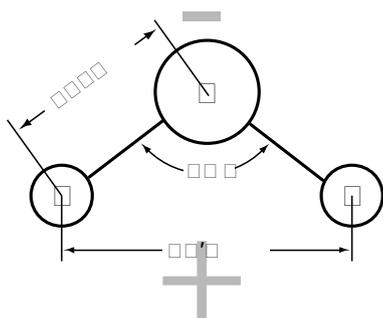


Abb. 11 Der Dipolcharakter des Wassermoleküls

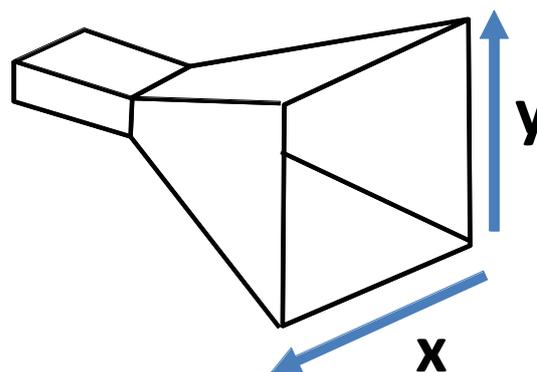


Abb. 12 Schema einer Hornantenne

Das Wellenlängenspektrum der Mikrowellen ist besonders zum Anregen von Dipol- und Multipolschwingungen von Molekülen geeignet. Die Erwärmung von Stoffen durch Mikrowellen ist frequenzabhängig. Die Absorption der Mikrowellen wird bestimmt durch den dielektrischen Verlustfaktor, den spezifischen elektrischen Widerstand sowie magnetische Verluste. Der Anregungseffekt kommt bei der Schwingungsanregung von Wassermolekülen besonders zum Tragen und wird auch in Mikrowellenherden genutzt. Die Wassermoleküle als Dipole (Abb. 11) versuchen sich laufend nach dem elektromagnetischen Wechselfeld auszurichten, wobei als dielektrischer Verlust Wärme entsteht. Die in Mikrowellenherden und bei den meisten Magnetronen im Bausektor verwendete Frequenz liegt bei 2,45 GHz.

Als elektromagnetische Wellen können Mikrowellen reflektiert und gebrochen werden und auch interferieren. Mit zunehmender Frequenz treten die quasi-optischen Eigenschaften von Hochfrequenzfeldern immer deutlicher hervor. Dies zeigt sich nicht nur in der Ausbreitung der Wellen, sondern wird auch bei deren Absorption und Emission durch Materie. Bei abnehmender Wellenlänge, das heißt zunehmender Frequenz, spielen Quanteneffekte eine immer größere Rolle. Mikrowellen werden von Metallen und elektrischen Leitern reflektiert und nur wenig absorbiert. Elektromagnetische Wellen oberhalb einer Frequenz von etwa 1 GHz können zunehmend schlechter mit einem Koaxialkabel übertragen werden, da die Verluste im Dielektrikum mit der Frequenz zunehmen. Daher werden Mikrowellen oft in verlustärmeren Hohlleitern geführt oder über Hohlantennen auf das Behandlungsobjekt übertragen. Die Mikrowellenstrahlung wird in Elektronenröhren, sogenannten Magnetronen, erzeugt und verstärkt. Die Applikation an das zu behandelnde Objekt geht im hier diskutierten Fall über Hornantennen, wie in Abb. 12 dargestellt.

Gemeinhin wird von einer gleichmäßigen Abstrahlung der Mikrowellen aus den Hornantennen ausgegangen, wie sie in Abb. 13 dargestellt ist. Wegen der Effekte von Brechung, Reflexion, positiver und negativer Überlagerung der elektromagnetischen Wellen ist das tatsächliche Abstrahlungsbild aus den Hornantennen völlig verschieden von dieser Annahme. Daher sollte vor dem Einsatz von Mikrowellenstrahlung mit Hornantennen die tatsächliche Ausbreitung mit ihren Minima und Maxima berechnet und untersucht werden.

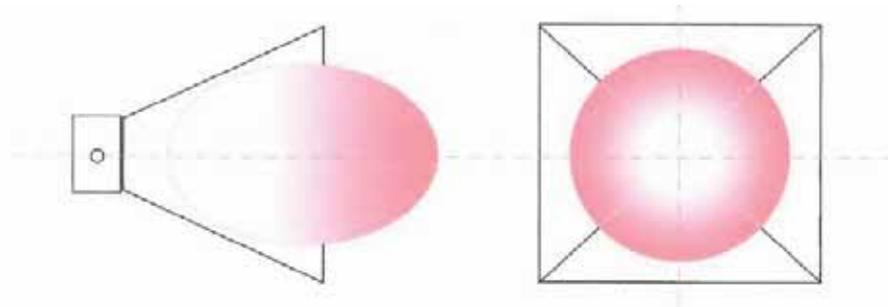


Abb. 13 Stark vereinfachte Annahme zur Abstrahlung der Mikrowellen aus einer Hornantenne (Abbildung aus einer Firmeninformation)

Von den im Projekt eingesetzten Hornantennen waren die Ausbreitungseffekte der Mikrowellen in den Hornantennen leider nicht bekannt. Durch die Experimente zeigt sich aber, dass die Ausbreitung und Abstrahlung auf die behandelten Oberflächen ungleichmäßig erfolgt. Auch musste im Vorfeld des Projektes häufig mit der Vorstellung umgegangen werden, die Mikrowellenstrahlung würde ja 'von innen', beispielsweise 'hinter' der Gipsstückfläche ihre Wirkung entfalten. Sogar Abb. 14 unterstützt dieses Bild, da die Eindringbirne an ihrer Grenzfläche im Feststoff im Inneren stark rot markiert ist und zur Antenne hin abnimmt. Unter Berücksichtigung der physikalischen Gegebenheiten wirken die Mikrowellenstrahlen aber dennoch zunächst da, wo sie als erstes auf- und vor allem auf Wasser treffen. Von der Oberfläche zum Inneren eines Festkörpers nimmt die Energie immer weiter ab, die Strahlung wird gedämpft. Daher ist bei einseitiger Bestrahlung davon auszugehen, dass die Oberflächezone zunächst am intensivsten bestrahlt wird und nach den dielektrischen Eigenschaften ihrer Komponenten die Mikrowellen weiter durchlässt.

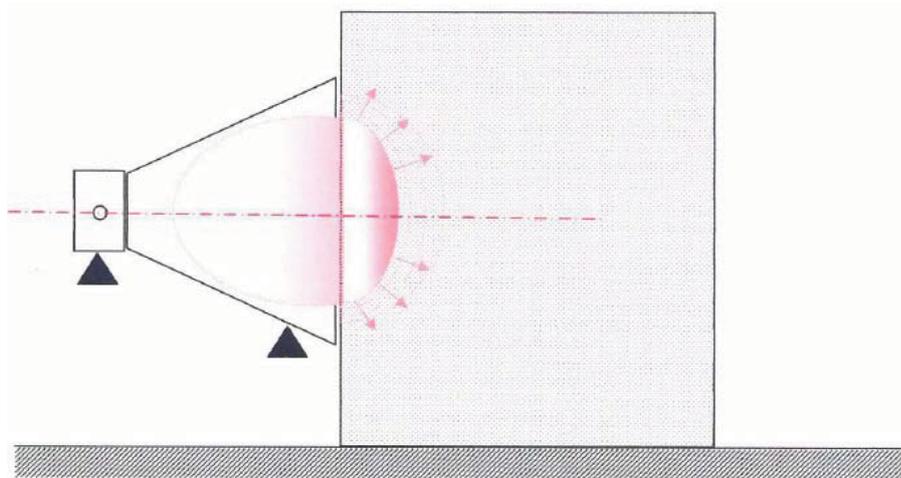


Abb. 14 Vereinfachte Darstellung der Ausbreitung der Mikrowellen in einen Baukörper (Abbildung aus einer Firmeninformation)

Im Einzelnen genauso, aber in der Summe anders stellt sich die Situation dar, wenn mit gegenübergestellten Hornantennen in einem Anstand, in dem sich die Strahlen überlagern können gearbeitet werden kann. Durch die addierende Wirkung zweier Magnetronen kann es in der Mitte des zu behandelnden Objektes zur Ausbildung eines Temperaturmaximums kommen, wie es beispielsweise schematisch in Abb. 15 dargestellt ist. Das ist ausschließlich beim Einsatz mehrerer Quellen der Fall.

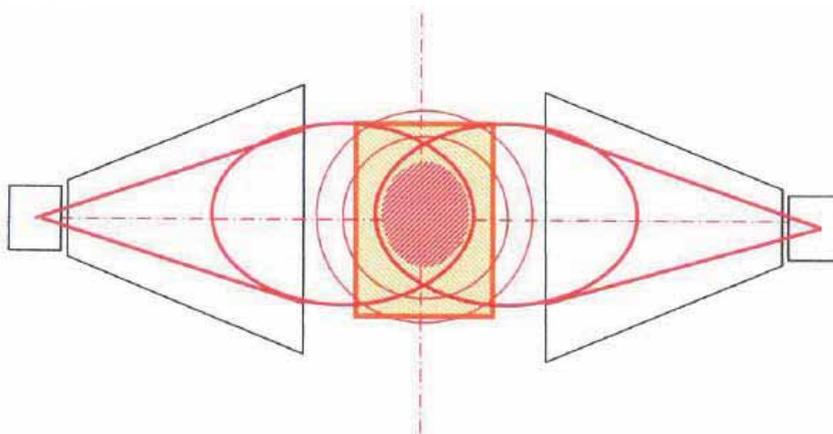


Abb. 15 Gegenübergestellte Hornantennen

An einer Mauer treffen die Mikrowellen einseitig auf den Baukörper auf und werden im Mauerwerk absorbiert. Die Volumenleistungsdichte nimmt von der Oberfläche nach innen exponentiell ab. Eine Berechnung der tatsächlichen Eindringtiefe von Mikrowellen in heterogenes Mauerwerk erscheint durch das Fehlen vieler zur Berechnung notwendiger Parameter derzeit komplex, wird aber dringend empfohlen.

## 4 Versuche und Untersuchungen in der Michaeliskapelle

### 4.1 MW-Versuche am 5.5.2011

Große Anteile dieses Kapitels sind in dem unveröffentlichten IDK-Bericht DD 54/2011 festgehalten. So konnten die Zwischenergebnisse den Projektbeteiligten rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.

In Absprache mit den Verantwortlichen des Klosters und dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen wurde eine Musterfläche innerhalb der Michaeliskapelle für die Versuche ausgewählt. Der im Frühjahr 2010 restaurierte Wandabschnitt kann als repräsentativ für den Putzstückbestand der Michaeliskapelle angesehen werden. Der Wandbereich stand am 07. und 08. August 2010 mit dem unteren Teil mehrere Stunden im Hochwasser. In diesem Wandabschnitt wurde für die Bewertung der Höhe der Feuchte- und Salzkonzentration sowie der Verteilung im Mauerwerk, ein Höhen- und Tiefenprofil vor und nach dem Mikrowellenversuch angelegt. Als vorteilhaft erwies sich, dass in diesem Wandbereich die Feuchtesituation bereits vor dem Hochwasserereignis, sowie wenige Monate danach im Januar 2011 analytisch erfasst wurde und somit auf Grundlage dieser Ergebnisse die Abtrocknung besser beurteilt werden kann.

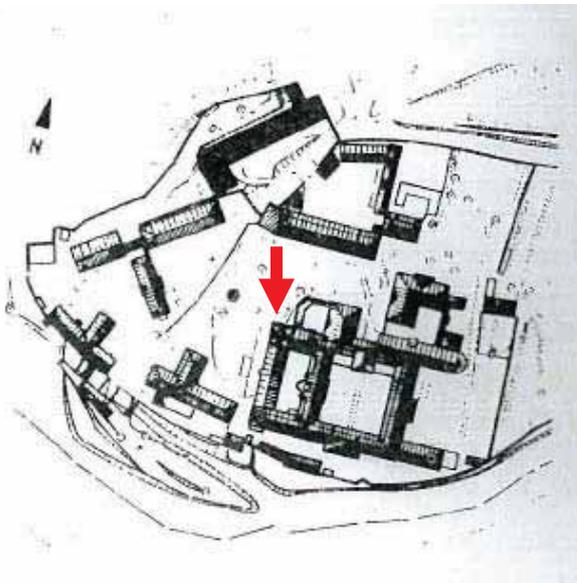


Abb. 16 Lage der Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal

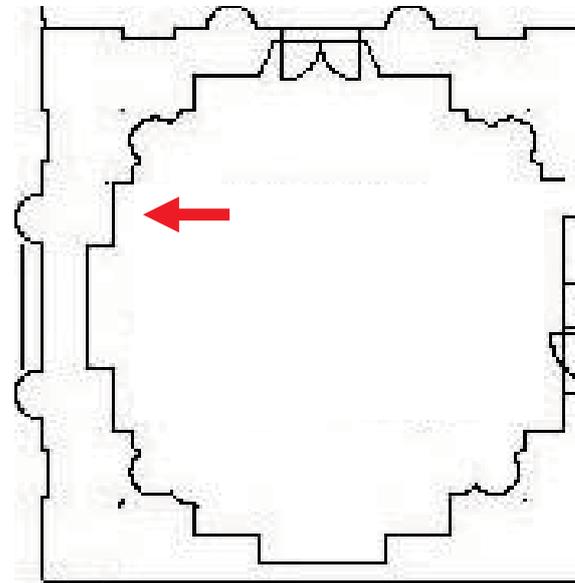


Abb. 17 Grundriss der Michaeliskapelle mit eingezeichneter Probefläche an der Ostwand



Abb. 18 Musterfläche, Aufnahme 14. Aug. 2009 vor Restaurierung und vor Hochwasser 2010



Abb. 19 Musterfläche, Aufnahme am 09. Aug. 2009, wenige Stunden nach Abfließen des Hochwassers

## 4.2 Versuchsbeschreibung

Die Mikrowellentrocknungsversuche wurden am 05.05.2012 an einer Gipsstuckmusterfläche in einem Musterflächenbereich durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Mikrowellengerät der Firma bhd Dresden. Dabei erfolgte vor und nach der MW-Behandlung die Dokumentation der Temperaturen und Feuchten an der Oberfläche, im Gipsstuck und im Bruchsteinmauerwerk, soweit in der Originalsubstanz möglich. Die Tab. 1 listet die Geräte- und Versuchsparameter. Die Mikrowellenbehandlung erfolgte an drei in einem Höhenprofil liegenden Testflächen. Die Maße dieser Flächen entsprechen der Auflagefläche der Hornantenne 40 x 33 cm (s.a. Abb. 89), an denen vor dem MW-Versuch Bohrmehlproben die Materialfeuchtebestimmung entnommen wurden. Die Aufheizzeit betrug an jeder Testfläche 20 Minuten. Es folgte eine Abkühlphase von weiteren 20 Minuten. Die Temperaturverteilung während der Aufheiz- und Abkühlphase an der Gipsstuckoberfläche und im darunterliegenden Mauerwerk wurde messtechnisch begleitet. Die Oberflächentemperatur wurde mit einer IR-Kamera durch Herrn Schramm (bhd-GmbH) aufgezeichnet. Mittels gegen Mikrowellestrahlung abgeschirmter Temperaturmesssonden, die von bhd-GmbH eingesetzt wurden, konnten die Temperaturen in 5 cm, 10 cm und 15 cm Tiefe im Mauerwerk erfasst werden. Die Bestimmung der Feuchteverteilung vor und nach dem MW-Versuch erfolgte an einem Höhen- und Tiefenprofil, angelegt in 3 Höhenstufen in 20 cm, 80 cm, 140 cm Höhe und je 8 Tiefenstufen.

Tab. 1 Geräte- und Versuchsparameter bei Mikrowellentrocknungsversuch in der Kapelle

Geräteparameter	Wert/Einheit
Leistung	900 W
Frequenz	2,45 GHz
Auflagefläche der Hornantenne	40 x 33 cm
Lufttemperatur	ca. 14°C
Wandtemperatur	ca. 15°C
Aufheizzeit	20 Minuten
Abkühlzeit	20 Minuten



Abb. 20 Musterfläche, MW-Behandlung mit in 3 Höhenstufen, Aufnahme am 05.05.2011

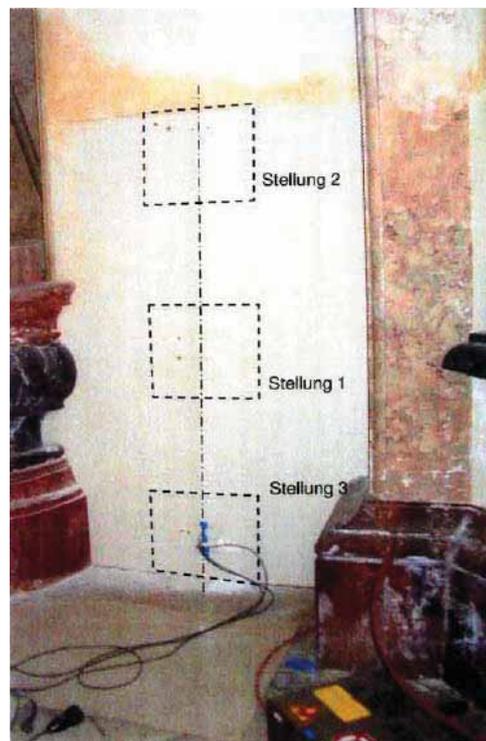


Abb. 21 Musterfläche, MW-Behandlung mit in 3 Höhenstufen, Quelle: bhd-Bericht

### 4.3 Voruntersuchungen an Ausblühsalzen (XRD-Analysen)

Im Zuge der langsamen natürlichen Abtrocknung der Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle kam es zu starken Salzausblühungen auf Gipsstuckoberflächen. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden am 19.10.2010 Ausblühsalze auf Gipsstuckoberflächen in der Michaeliskapelle beprobt und phasenanalytisch untersucht (s.a. IDK-Bericht DD107/2010). Die Tab. 2 gibt eine Probenübersicht. Das Ausblühen des Salzes MTK\_ES1 (Abb. 25, Abb. 26) wurde nach einem Mikrowellentrocknungsversuch des durch Hochwassereinwirkung durchfeuchteten Gipsstucks beobachtet. Unmittelbar nach der Trocknung erfolgte die Beprobung (Abb. 25 und Abb. 26). Das Ausblühsalz MTK\_ES2 entstand infolge der Hochwassereinwirkung nach langsamer natürlicher Abtrocknung an der Gipsstuckoberfläche am Altartisch (Abb. 22 und Abb. 23). Der mit der XRD-Analyse ermittelte Phasenbestand wird in Tab. 2 dargestellt. Die beiden Röntgendiffraktogramme sind dem Bericht in der Anlage beigefügt.

Tab. 2 Ermittelter Phasenbestand der Ausblühsalzproben

Probennummer	Entnahmeort	Phasenbestand	Bauschädliche Salze
<b>MKT_ES1</b>	Marienthal, Kapelle, N-Seite, Probefläche, Ausblühsalz nach MW-Behandlung	Thenardit $\text{Na}_2\text{SO}_4$ Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Quartz, $\text{SiO}_2$	Thenardit $\text{Na}_2\text{SO}_4$
<b>MKT_ES2</b>	Marienthal, Kapelle, Altartisch, rechte Seite, schwarzer Gipsstuck	Thenardit $\text{Na}_2\text{SO}_4$ Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Thenardit $\text{Na}_2\text{SO}_4$



Abb. 22 Probenahmepunkt MTK\_ES2



Abb. 23 vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 24 mit Probenahmepunkt MTK\_ES2



Abb. 25 Probenahmepunkt MTK\_ES1



Abb. 26 vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 27 mit Probenahmepunkt MTK\_ES1

In beiden Proben wird das Natriumsulfat Thenardit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) nachgewiesen. Das leichtlösliche Salz wandelt sich bei höherer Luftfeuchte unter Wasseraufnahme und Volumenvergrößerung in Mirabilit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) um. In Abb. 28 werden Phasenstabilitätsbereiche der Natriumsulfate Thenardit und Mirabilit in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte dargestellt. Die festgestellten Natriumsulfate sind als stark bauschädigend bekannt (Steiger & Dannecker 1998). Quarz und Gips werden als Bestandteile aus dem Materialuntergrund interpretiert.

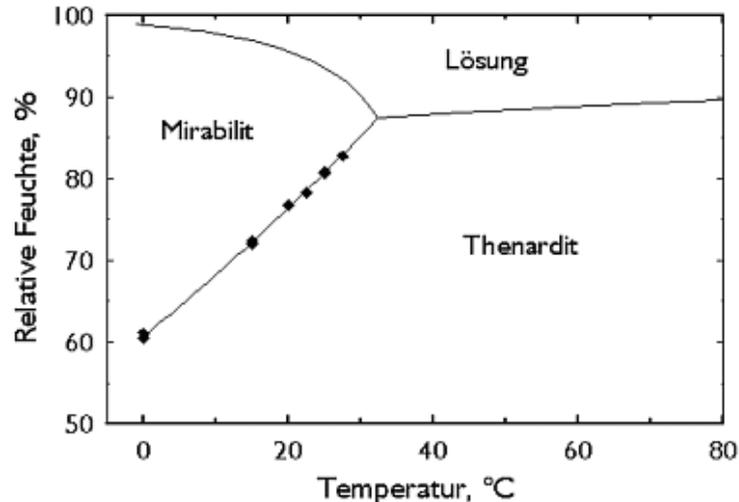


Abb. 28 Stabilitätsbereiche der Natriumsulfate Thenardit und Mirabilit in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte (aus [www.salze-im-porenraum.de](http://www.salze-im-porenraum.de))

Die Natriumionen können verschiedenen Ursprung haben. Sie wurden zusammen mit den Sulfationen durch die Hochwassereinwirkung gelöst. Sowohl bei einer langsamen Trocknung, wie beispielsweise am Altartisch als auch bei einer schlagartigen Hitzebehandlung wie durch die Mikrowelle, erfolgt eine Kristallisation der leichtlöslichen Salze an den Oberflächen.

#### 4.4 Voruntersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung

Aus einer Untersuchung im Vorfeld der Restaurierungsarbeiten im August 2009, die ein Jahr vor dem Hochwasserereignis durchgeführt wurde, stehen in geringem Umfang Untersuchungsergebnisse zur Feuchtesituation vor dem Hochwasser zur Verfügung (IDK-Bericht DD62/2009). Die Probenahme erfolgte am 14.08.2009. Es wurde je ein Höhen- und Tiefenprofil im Bereich der (späteren) MW-Musterfläche erbohrt (Abb. 29, Abb. 30). Die Tab. 3 zeigt Probennummer, Probenahmepunkte, Material und Fragestellungen.



Abb. 29 Profil MKK\_TP2, vor der Restaurierung, Aufnahme am 26.08.2009 (aus IDK-Bericht DD62/2009)

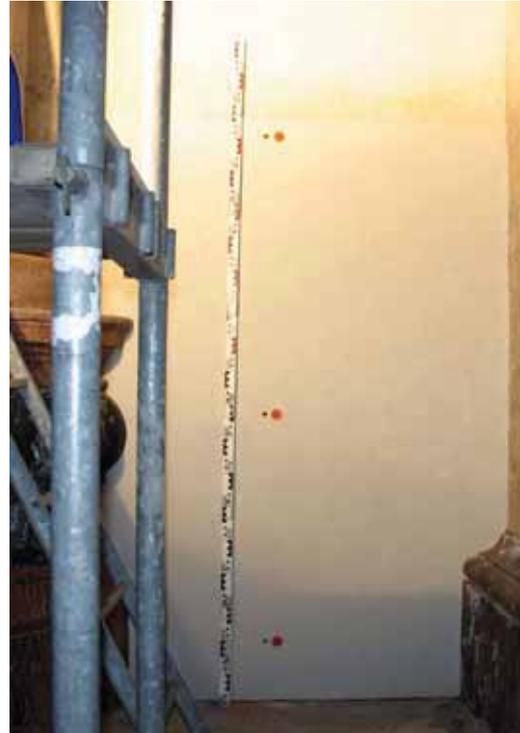


Abb. 30 Profil MK\_TP2, nach dem Hochwasser, Aufnahme am 26.01.2011

Fünf Monate nach der Flut erfolgte eine erste Untersuchung der Mauerwerksdurchfeuchtung in der Michaeliskapelle am 26.01.2011. Dazu wurden Bohrmehlproben in dem bereits im August 2009 beprobten Höhen- und Tiefenprofil (Abb. 30) in vergleichbaren Tiefenstufen dem Mauerwerk entnommen und ebenfalls die Darrfeuchte ermittelt (siehe Tab. 3). Die Tab. 3 sowie Abb. 31 und Abb. 32 stellen die Feuchteverteilung in Abhängigkeit von der Höhe und der erbohrten Profiltiefe dar. Die Ergebnisse zeigen 5 Monate nach dem Hochwasserereignis noch immer eine deutliche Durchfeuchtung des Mauerwerks.

Tab. 3 Probenübersicht und Probenahmepunkte der Untersuchungen vom 14.08.2009 und 26.01.2012

Probennummer	Probenahmepunkte	Material	Bemerkung
MK_TP2_1/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 0,2 m über Bodenoberkante 0-2 cm	Bohrmehl, Stuckgips, nicht historisch	Sandstein mit Stuckgipsverkleidung, Hohlstelle unter der Gipsverkleidung
MK_TP2_1/2	2-4 cm	Bohrmehl, Putzmörtel, hellgrau	
MK_TP2_1/3	6-8 cm	Bohrmehl, Putzmörtel	bei 5 cm Materialwechsel auf etwas dunkleren Putz
MK_TP2_2/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 0,87 m über Bodenoberkante 0-2 cm	Bohrmehl, Stuckgips, nicht historisch und Putz, hellgrau	Mauerwerk mit Stuckgipsverkleidung
MK_TP2_2/2	2-4 cm	Bohrmehl, Putz	hellgrau
MK_TP2_2/3	6-8 cm	Bohrmehl, rotes Ziegelmehl	Bei 5 cm Materialwechsel in roten Ziegelstein
MK_TP2_3/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 1,7 m über Bodenoberkante 0-2 cm	Bohrmehl, Stuckgips, nicht historisch	Mauerwerk mit Stuckgipsverkleidung
MK_TP2_3/2	2-4 cm	Bohrmehl, Putzmörtel	grau
MK_TP2_3/3	6-8 cm	Bohrmehl, rotes Ziegelmehl	Bei 5 cm Materialwechsel auf roten Ziegelstein

Tab. 4 Vergleich der Ergebnisse der Feuchteverteilung am 14.08.2009 und am 26.01.2011

Probe	Probenahmepunkte	Feuchte vor Restaurierung 14.08.2009 [M%]	Feuchte nach Hochwasser 26.01.2011 [M%]
MK_TP2_1/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 0,2 m über Bodenoberkante 0-2 cm	1,23	5,21
MK_TP2_1/2	2-4 cm	10,75	3,00
MK_TP2_1/3	6-8 cm	7,83	9,54
MK_TP2_2/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 0,87 m über Bodenoberkante 0-2 cm	1,23	5,28
MK_TP2_2/2	2-4 cm	4,87	8,86
MK_TP2_2/3	6-8 cm	3,81	8,32
MK_TP2_3/1	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 40 cm rechts neben Altar, 1,7 m über Bodenoberkante 0-2 cm	0,61	4,83
MK_TP2_3/2	2-4 cm	0,80	5,12
MK_TP2_3/3	6-8 cm	0,09	4,85

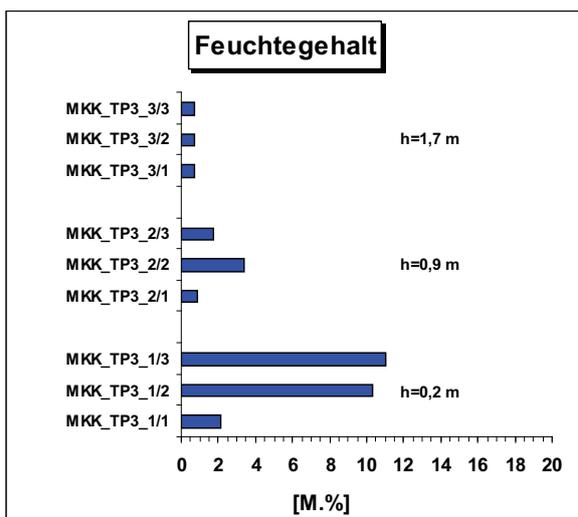


Abb. 31 Feuchteverteilung im Mauerwerk am 14.08.2009, ein Jahr vor der Flut

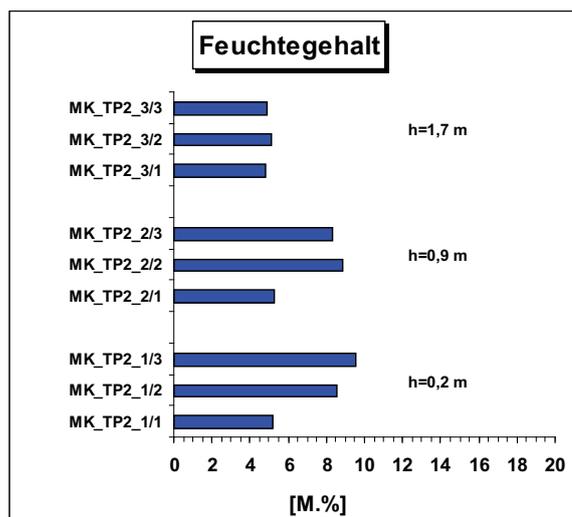


Abb. 32 Feuchteverteilung im Mauerwerk am 26.01.2011, 5 Monate nach der Flut

An beiden Terminen (14.08.2009 und am 26.01.2011) wurde die Salzbelastung der Gipsstuckoberfläche und des Mauerwerks an den gewonnenen Bohrmehlproben untersucht. Oberflächennah wird anhand hoher Sulfatwerte der Gipseinfluss deutlich. Im Vergleich zu den Ergebnissen vom 14.08.2012 wird analytisch keine Zunahme einer Belastung mit bauschädlichen Salzen festgestellt (Tab. 5).

Tab. 5 Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.%						
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MKK_TP2_1/1 14.08.2009	5,75	0,36	1,65	0,11	15,26	0,01	0,03
MK_TP2_1/1 26.01.2011	2,47	0,11	0,02	0,09	8,98	0,01	0,04
MKK_TP2_1/2 14.08.2009	0,77	0,07	0,08	0,12	2,02	0,01	0,06
MK_TP2_1/2 26.01.2011	0,92	0,01	0,01	0,01	0,98	<0,01	<0,01
MKK_TP2_1/3 14.08.2009	0,35	0,00	0,02	0,02	0,24	0,03	0,04
MK_TP2_1/3 26.01.2011	0,79	<0,005	<0,005	0,01	0,41	0,01	0,02
MK_TP2_2/1	2,04	0,10	0,01	0,04	4,85	0,01	0,01
MK_TP2_2/2	1,55	0,01	0,01	0,01	1,99	0,01	0,01
MK_TP2_2/3	0,26	0,02	0,03	0,03	0,66	0,01	0,01
MK_TP2_3/1	1,30	0,00	0,01	0,06	3,69	0,01	0,07
MK_TP2_3/2	1,47	0,02	0,85	0,07	3,50	0,01	0,06
MK_TP2_3/3	0,20	0,01	0,01	0,02	0,40	0,01	0,03
MK_TP2_3/1_Gips	1,01	0,05	0,00	0,06	2,66	0,02	0,07

#### 4.5 MW-Behandlung, Messung der Temperaturverteilung im Mauerwerk

Die Mikrowellenbehandlung erfolgte mit einer auf die Gipsstuckoberfläche aufgesetzten Hornantenne an drei in einem Höhenprofil liegenden Testflächen (Abb. 39). Beginnend mit der mittleren Testfläche, wurden die auf der Oberfläche sowie im Material und Mauerquerschnitt entstehenden Temperaturen dokumentiert. Dazu wurden in jedem Feld drei Messsonden untereinander im Abstand von 5 cm, in drei verschiedene Tiefen (5, 10 und 15 cm) gesetzt und die Temperaturentwicklung innerhalb einer Aufheiz- und Abkühlphase von je 20 min registriert. Die Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 sowie die Diagramme (Abb. 33 bis Abb. 35) zeigen das Temperaturregime für die drei untersuchten Flächen in drei verschiedenen Tiefen. Begleitend wurde mit einer IR-Kamera (Firma BHD) die Oberflächentemperatur registriert und die Temperaturverteilung aufgezeichnet (Abb. 36 bis Abb. 38).

Nach 20 Minuten Aufheizzeit werden in 5 cm Tiefe Temperaturen von 92°C (mittleres Feld), 56°C (oberes Feld) und 42°C (unteres Feld) festgestellt. In der Tiefe von 10 cm werden Temperaturen von 26°C (mittleres Feld), 30°C (oberes Feld) und 32°C (unteres Feld) gemessen und in einer Tiefe von 15 cm Temperaturen von 26°C (mittleres Feld), 20°C (oberes Feld) und 21°C (unteres Feld) registriert. Die z. T. sehr deutlichen Temperaturunterschiede innerhalb einer Tiefe (Temperatursonde) resultieren aus der ungleichmäßigen Erwärmung des Wand- und Mauerbereiches. Dennoch kann festgestellt werden: Die Temperatur nimmt mit der Tiefe ab und hat ihren höchsten Wert auf der Gipsstuckoberfläche.

Tab. 6 Ergebnisse der Sondenmessungen: oberes Feld, Temperatur/Zeit, Einstellung 9, 900 W, Lufttemperatur 14°C, Oberflächentemperatur bis 91°C

Tiefe der Sonde in cm	Startzeit	30 s	2,5 min	5,0 min	7,5 min	10 min	12,5 min	15 min	17,5 min	20 min	- 5,0 min	- 10 min	-15,0 min	-20 min
5	17,0	19,0	23,0	26,0	29,0	31,5	34,0	36,5		42,0	38,0	36,2	34,5	32,5
10	16,0	19,5	21,0	22,0	24,0	25,0	26,0	27,5		30,0	26,5	27,0	26,5	27,0
15	15,4	16,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,0	17,5		20,0	19	20,0	21,0	21,0

Tab. 7 Ergebnisse der Sondenmessungen: Mittelfeld, Bohrung in 87 cm Höhe, Temperatur/Zeit, Einstellung 9, 900 W, Lufttemperatur 14°C, Oberflächentemperatur bis 87°C

Tiefe der Sonde in cm	Startzeit	30 s	2,5 min	5,0 min	7,5 min	10 min	12,5 min	15 min	17,5 min	20 min
5	16,0	26,0	35,0	44,0	51,0	59,0	66,0	74,0	82,0	92,0
10	16,5	16,8	17,5	19,0	19,0	20,5	21,5	23,0	24,5	26,0
15	19,0	19,0	19,0	22,0	23,0	24,0	24,5	25,0	25,5	26,0

Tab. 8 Ergebnisse der Sondenmessungen: unteres Feld, Temperatur/Zeit, Einstellung 9, 900 W, Lufttemperatur 14°C, Oberflächentemperatur bis 56°C

Tiefe der Sonde in cm	Startzeit	30 s	2,5 min	5,0 min	7,5 min	10 min	12,5 min	15 min	17,5 min	20 min	- 5,0 min	- 10 min	-15,0 min	-20 min
5	15,2	18,0	24,0	29,5	34,5	39,0	41,5	48,0	52,0	56,0	50,5	47,5	45,0	43,0
10	15,3	16,3	17,0	19,5	22,0	24,0	26,0	28,5	31,0	32,0	33,0	33,5	33,5	33,5
15	15,8	15,5	16,0	16,5	18,0	18,0	18,0	19,0	20,0	20,5	20,5	21,0	22,0	22,0

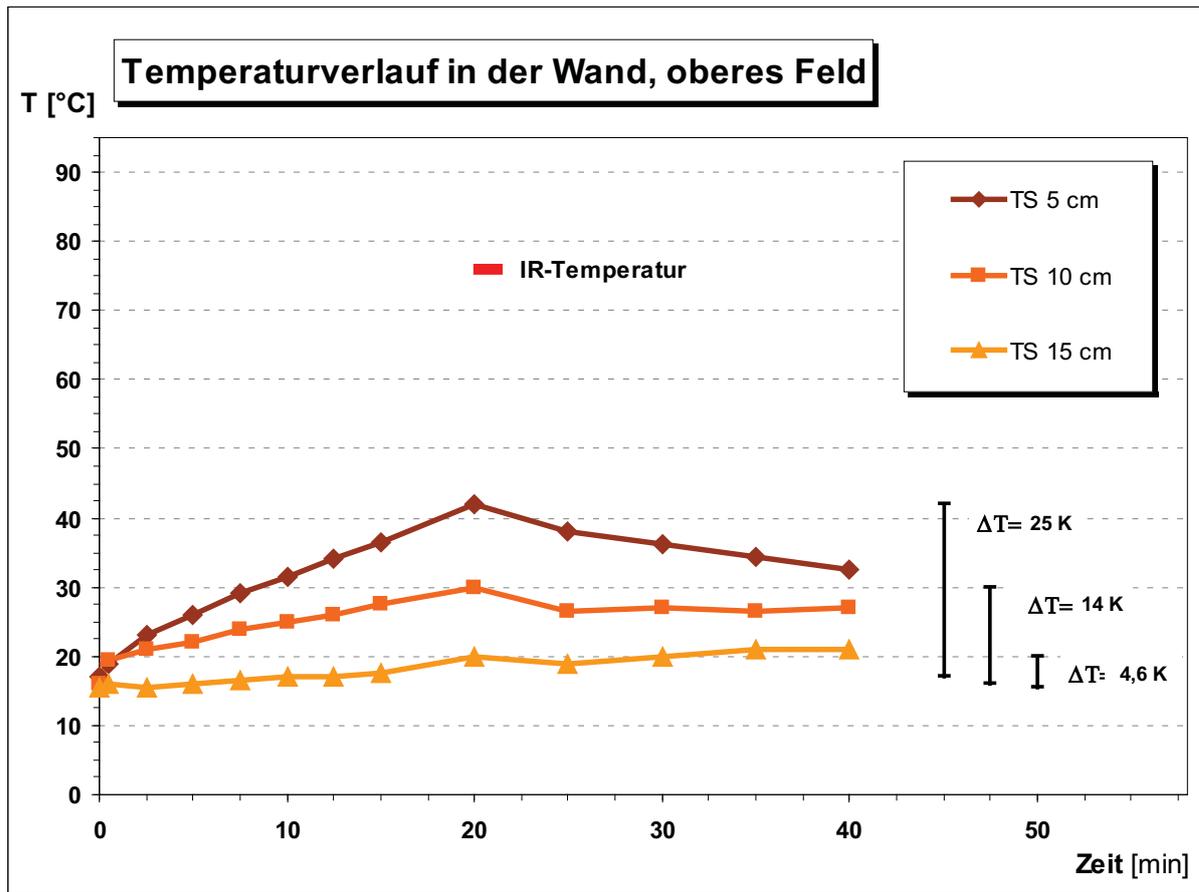


Abb. 33 Michaeliskapelle, oberes Messfeld

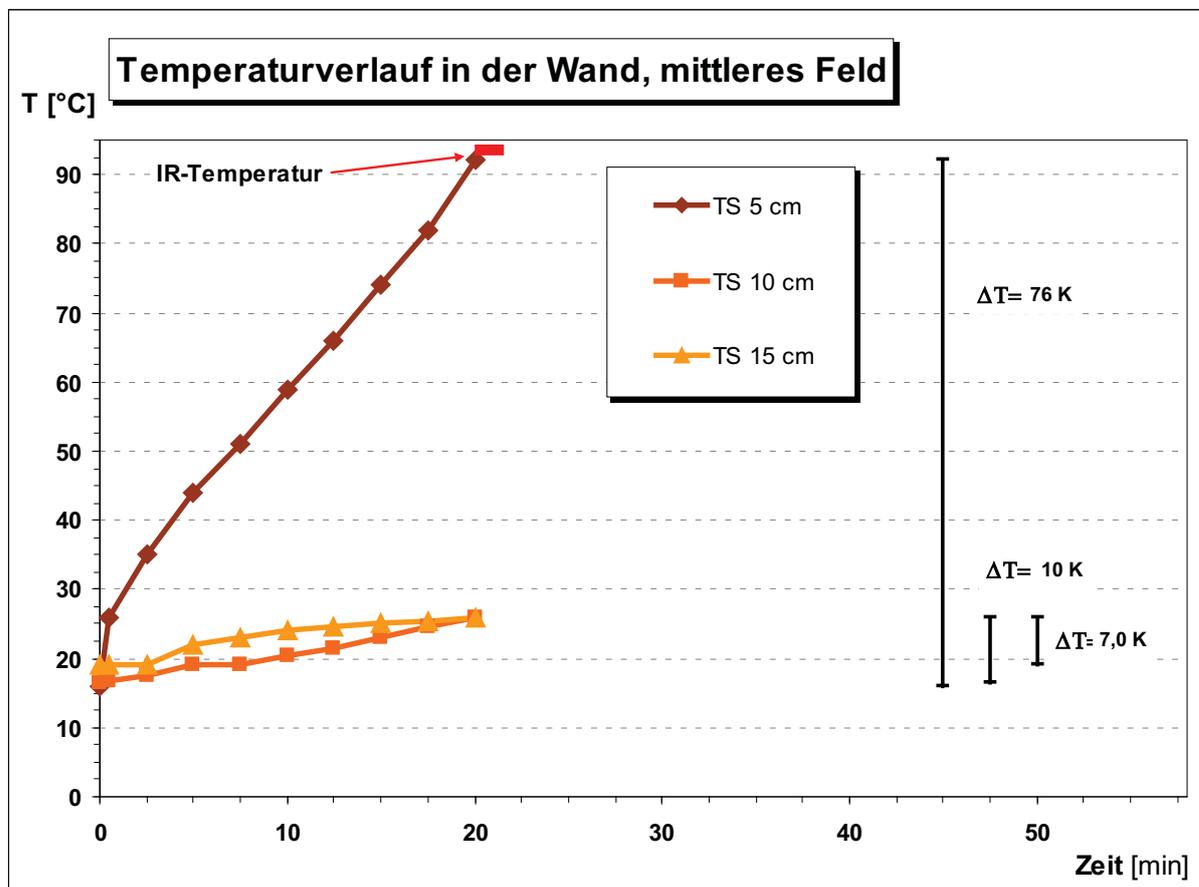


Abb. 34 Michaeliskapelle, Mittelfeld

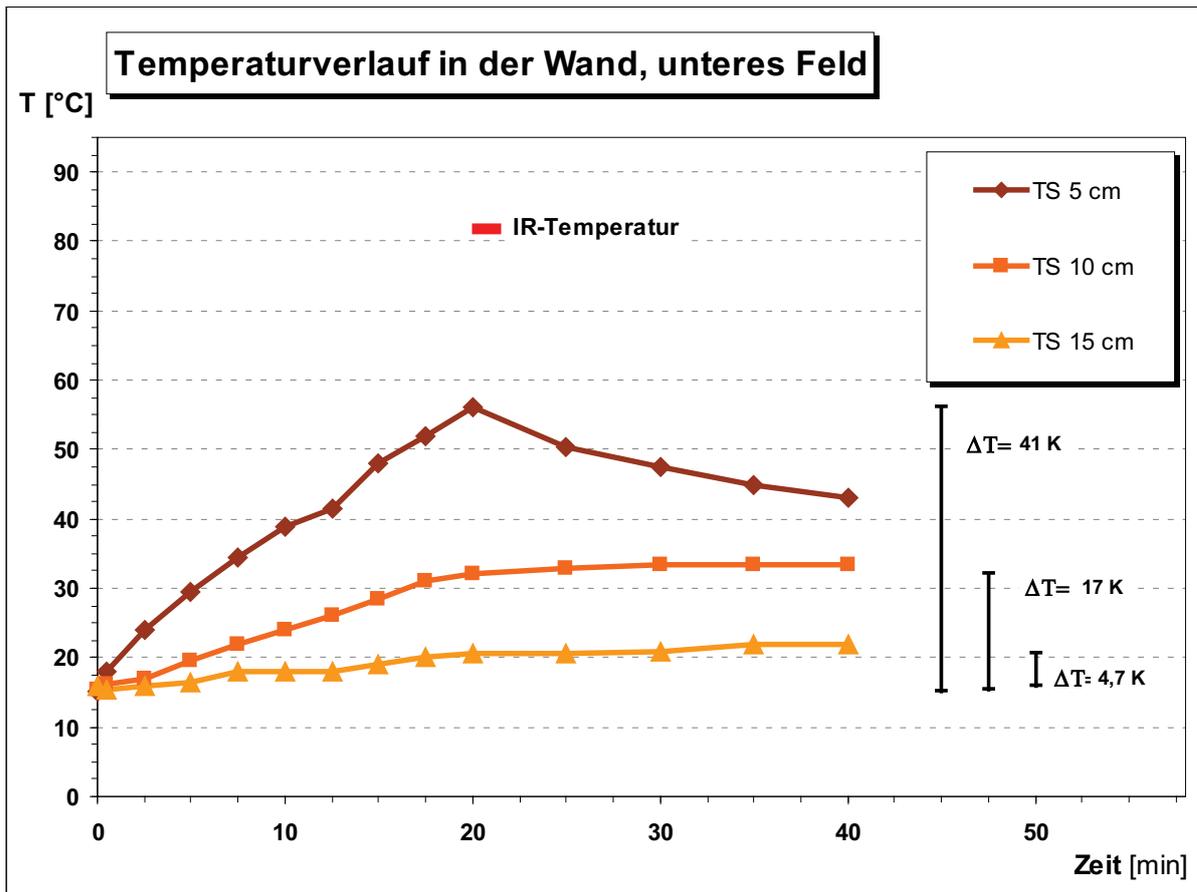


Abb. 35 Michaeliskapelle, unteres Messfeld

Die mit der IR-Kamera aufgezeichnete Oberflächentemperatur ist ungleichmäßig verteilt und zeigt vorwiegend zwei Zentren. Das entstehende Temperaturverteilungsbild ähnelt einer ‚8‘ (siehe auch Abb. 36 bis Abb. 38). Neben sehr hoch aufgeheizten Bereichen mit Flächen von einigen cm<sup>2</sup>, bestehen flächige Bereiche mit nur geringen Temperaturen. Der Temperaturunterschied zwischen diesen unterschiedlich aufgeheizten Bereichen ist hoch, was wiederum auf Grund unterschiedlicher Wärmedehnung zu Spannungen im Material führen kann. Es werden in zwei untersuchten Feldern bereits nach weniger als 20 Minuten lokal Temperaturen von ca. 90°C (87°C und 91°C) festgestellt (Abb. 37 und Abb. 38), die deutlich oberhalb der schon bei 60°C einsetzenden Gipsentwässerung. Diese erste Entwässerung von Gips (CaSO<sub>4</sub> x 2 H<sub>2</sub>O) ist mit der Phasenumwandlung zu β-Halbhydrat (CaSO<sub>4</sub> x 0,5 H<sub>2</sub>O) verbunden.

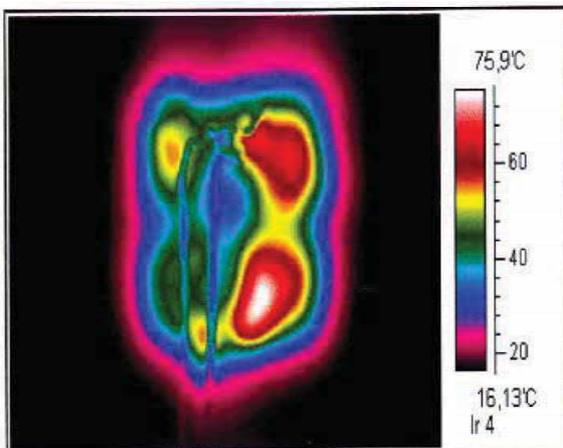


Abb. 36 IR-Oberflächentemperaturverteilung, oberes Messfeld, Stellung 2, Quelle: bhd-Bericht

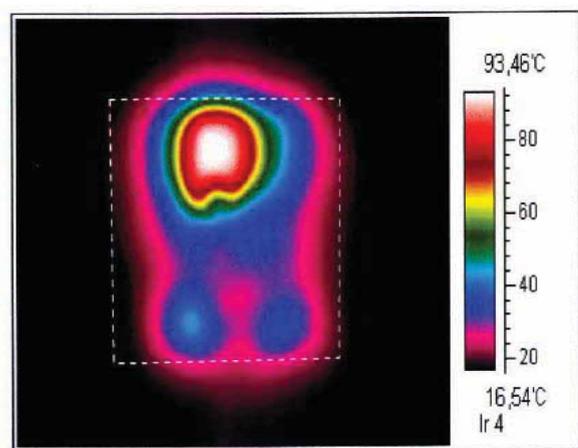


Abb. 37 IR-Oberflächentemperaturverteilung, mittleres Messfeld, Stellung 1, Quelle: bhd-Bericht

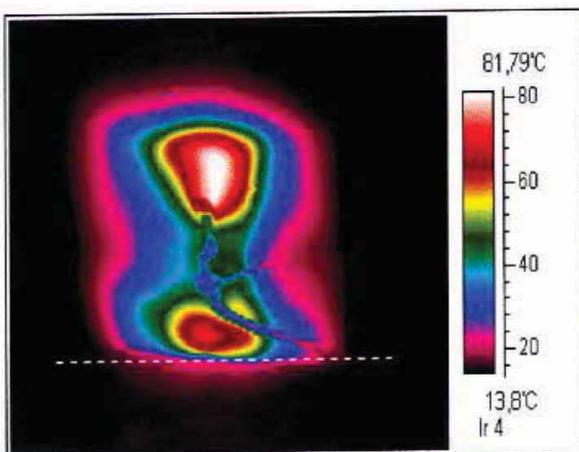


Abb. 38 IR-Oberflächentemperaturverteilung, unteres Messfeld, Stellung 3, Quelle: bhd-Bericht



Abb. 39 Musterfläche, MW-Behandlung mit in 3 Höhenstufen, Quelle: bhd-Bericht

#### 4.6 Feuchteuntersuchungen begleitend zur MW-Behandlung

Für vergleichende Feuchteuntersuchungen vor und direkt nach der Mikrowellenbehandlung wurde im Bereich der Musterfläche ein Höhen- und Tiefenprofil mit 3 Höhen- und je 8 Tiefenstufen angelegt (Abb. 40 bis Abb. 42), Bohrmehlproben entnommen (Abb. 43) und die Darrfeuchte bestimmt.



Abb. 40 Obere Musterfläche, h=1,70 m

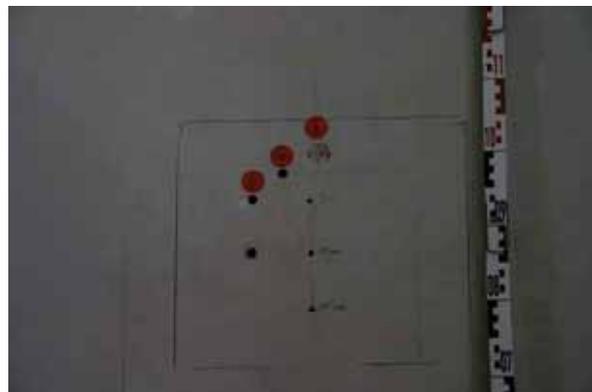


Abb. 41 Mittlere Musterfläche, h=1,0 m



Abb. 42 Untere Musterfläche, h=0,2 m



Abb. 43 Probenahme von Bohrmehlproben an der Musterfläche

Die Beprobung des Mauerwerks erfolgte je Höhenprofil in 8 Tiefenstufen. Innerhalb der ersten Tiefenstufe wurde nur der Gipsstuck beprobt. Die mit der Tiefe folgende Probe umfasst den gesamten Gipsstuck sowie einen Teil des unterhalb liegenden Putzes (0-2 cm). Es folgten 6 weitere Proben im Abstand von 2 cm bis in eine Tiefe von 14 cm.

Die Tab. 9 zeigt die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen vor und nach dem Mikrowellenversuch. Die Abb. 44 bis Abb. 46 veranschaulichen die Untersuchungsergebnisse der Einzelflächen grafisch. Voruntersuchungen: Oberflächennah werden Feuchten von 4 Ma.-% gemessen. Unterhalb der Gips- und Putzoberfläche (Tiefenstufe 2-4 cm) steigt die Feuchte auf 5 Ma.-%, in der Höhenstufe 20 cm über FOK auf 7 Ma.-%, an. In allen Höhenstufen (ca. 20, 100 und 170 cm) steigt die Feuchtebelastung des Mauerwerks mit zunehmender Profiltiefe weiter an. In der Tiefe werden Werte von 7 bis 8 Ma.-% Feuchte festgestellt. In 20 cm Höhe fällt die Feuchte zwischen 4 und 10 cm Tiefe auf geringere Werte ab, was auf Materialunterschiede im heterogenen Bruchsteinmauerwerk zurückgeführt werden kann. Die Feuchteuntersuchungen nach dem Mikrowellenversuch zeigen uneindeutige Ergebnisse einer möglichen Feuchteumverteilung. Die Unregelmäßigkeiten sind vermutlich auf Materialunterschiede im heterogenen Bruchsteinmauerwerk zurückzuführen. Auf Grund der unbekanntenen Bedingungen sind keine eindeutigen Ergebnisse erkennbar.

Tab. 9 Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen, vor und nach der MW-Behandlung

<b>Probe</b>	<b>Einwaage</b> [g]	<b>Feuchte</b> <b>Voruntersuchung</b> [Ma.-%]	<b>Feuchte</b> <b>Nachuntersuchung</b> [Ma.-%]	<b>Feuchte</b> <b>(Differenz)</b> [Ma. %]
<b>Höhenstufe ca. 170 cm</b>				
<b>MKM_TP1/0</b>	ca. 170 cm / Gips	<b>3,52</b>	<b>2,6</b>	0,92
<b>MKM_TP1/1</b>	0-2cm	<b>3,53</b>	<b>3,94</b>	-0,41
<b>MKM_TP1/2</b>	2-4cm	<b>4,64</b>	<b>4,58</b>	0,06
<b>MKM_TP1/21</b>	4-6cm	<b>6,39</b>	<b>4,64</b>	1,75
<b>MKM_TP1/3</b>	6-8cm	<b>6,59</b>	<b>4,74</b>	1,85
<b>MKM_TP1/4</b>	8-10cm	<b>4,67</b>	<b>4,99</b>	-0,32
<b>MKM_TP1/5</b>	10-12cm	<b>7,01</b>	<b>5,08</b>	1,93
<b>MKM_TP1/6</b>	12-14cm	<b>7,21</b>	<b>4,73</b>	2,48
<b>Höhenstufe ca. 100 cm</b>				
<b>MKM_TP2/0</b>	ca. 100 cm / Gips	<b>3,61</b>	<b>3,24</b>	0,37
<b>MKM_TP2/1</b>	0-2cm	<b>4,84</b>	<b>3,68</b>	1,16
<b>MKM_TP2/2</b>	2-4cm	<b>6,84</b>	<b>5,42</b>	1,42
<b>MKM_TP2/21</b>	4-6cm	<b>7,03</b>	<b>1,46</b>	5,57
<b>MKM_TP2/3</b>	6-8cm	<b>7,17</b>	<b>0,68</b>	6,49
<b>MKM_TP2/4</b>	8-10cm	<b>6,1</b>	<b>0,64</b>	5,46
<b>MKM_TP2/5</b>	10-12cm	-	<b>0,47</b>	-
<b>MKM_TP2/6</b>	12-14cm	-	<b>0,24</b>	-
<b>Höhenstufe ca. 20 cm</b>				
<b>MKM_TP3/0</b>	ca.20 cm / Gips	<b>3,64</b>	<b>4,2</b>	-0,56
<b>MKM_TP3/1</b>	0-2cm	<b>5,05</b>	<b>4,09</b>	0,96
<b>MKM_TP3/2</b>	2-4cm	<b>7,11</b>	<b>5,32</b>	1,79
<b>MKM_TP3/21</b>	4-6cm	<b>2,63</b>	<b>7,16</b>	-4,53
<b>MKM_TP3/3</b>	6-8cm	<b>0,2</b>	<b>7,82</b>	-7,62
<b>MKM_TP3/4</b>	8-10cm	<b>2,26</b>	<b>6,25</b>	-3,99
<b>MKM_TP3/5</b>	10-12cm	<b>5,93</b>	<b>5,7</b>	0,23
<b>MKM_TP3/6</b>	12-14cm	<b>8,28</b>	<b>5,02</b>	3,26

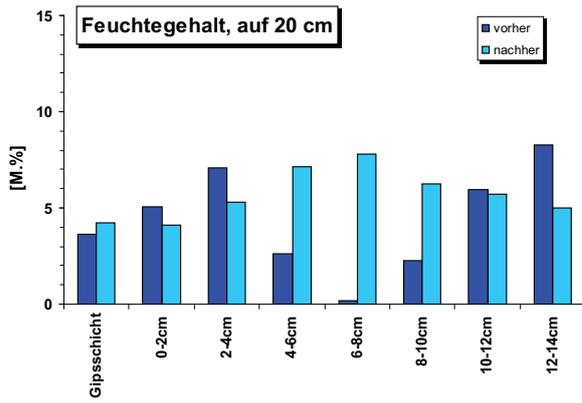


Abb. 44 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen an der Probefläche auf 20 cm Höhe

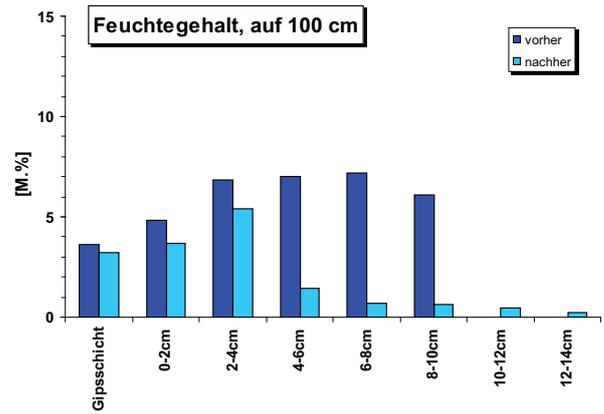


Abb. 45 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen an der Probefläche auf 100 cm Höhe

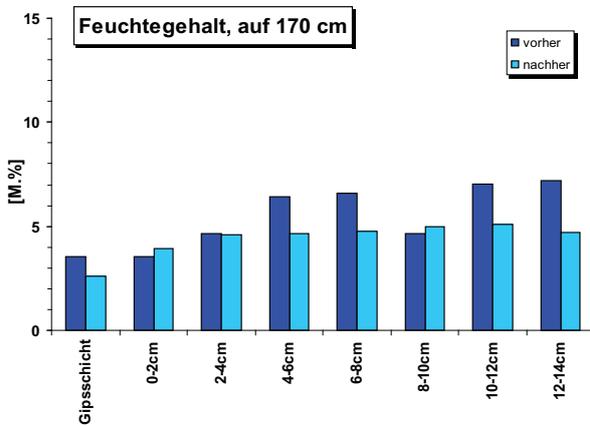


Abb. 46 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen an der Probefläche auf 170 cm Höhe

#### 4.7 Untersuchungen an MW-behandeltem Gipsstuck

Von der mit MW-Strahlung behandelten Stuckoberfläche wurden Proben vor und nach der Mikrowellenbehandlung entnommen und vergleichend untersucht. In Tab. 10 werden Probennummer, Probenahmepunkt, Material und Fragestellung aufgeführt. Die Abb. 47 und Abb. 48 dokumentieren die Probenahme.

Tab. 10 Probenübersicht, Probenahmepunkte

Probennummer	Probenahmepunkte	Material	Fragestellung
M_G v MW	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 50 cm rechts neben Hauptaltar, ca. 1 m über Bodenoberkante 0-2 cm	Stuckgips vor Mikrowellentrocknung	- Mineralphasenbestand - Gefügebeschaffenheit
M_G n MW	0-2 cm	Stuckgips nach Mikrowellentrocknung	- Mineralphasenbestand - Gefügebeschaffenheit

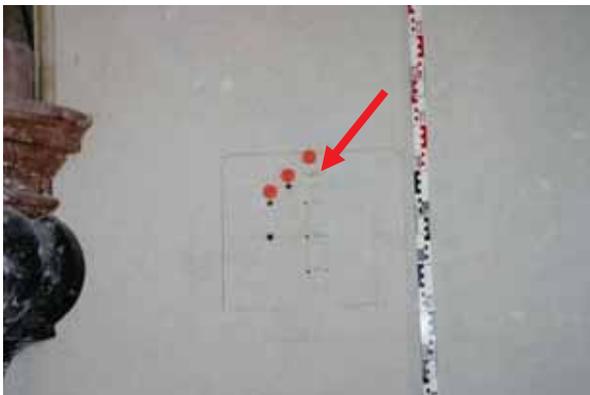


Abb. 47 Musterfläche, Beprobung der Gipsstuckoberfläche vor und nach dem Mikrowellenversuch

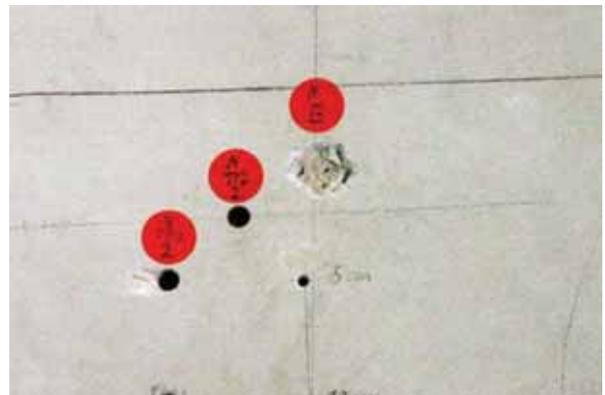


Abb. 48 Musterfläche, Beprobung der Gipsstuckoberfläche vor und nach dem Mikrowellenversuch

Die Abb. 49 bis Abb. 54 zeigen die Untersuchungsergebnisse des unbehandelten Materials. An den Proben wurden orientierte Dünnschliffe angefertigt und diese untersucht. Die Untersuchungen zeigen eng verzahnte Gipskristalle in einem dichten Gefüge. Dieses dichte Gefüge resultiert aus der Materialfeinheit und Phasenzusammensetzung des Ausgangsstoffs „Alabastergips“. Das Gipsgefüge ist homogen, es zeigt einen gleichmäßig verteilten Porenraum, der auf 10 und 20 % geschätzt wird. Die Oberfläche (Abb. 55, oberer Bildteil) ist in Bereichen ausgebrochen und mürbe (heller Rand). Im oberen Bildbereich wird ein beginnender Bruch parallel zur Oberfläche deutlich.

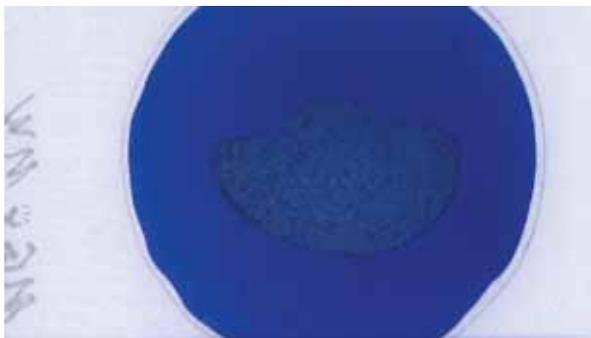


Abb. 49 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Dünnschliff des Gipsgefüges vor MW-Versuch, Schnitt parallel zur Oberfläche, Dünnschliffscan, 28 x 48 mm

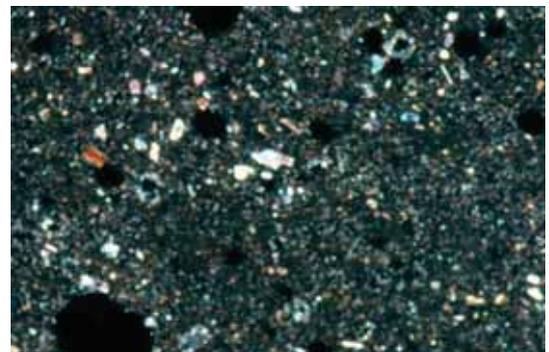


Abb. 50 Dünnschliffaufnahme der Probe im Übergang Unterputz (rechts) – Gipsstuck (links) (Nicols ||, Bildbreite: 1,9 x 1,29 mm)

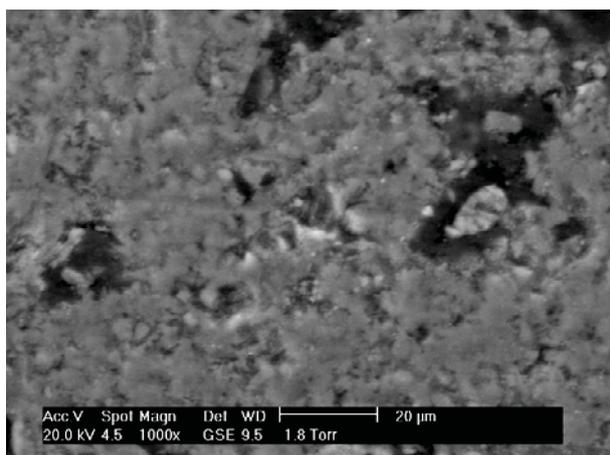


Abb. 51 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch

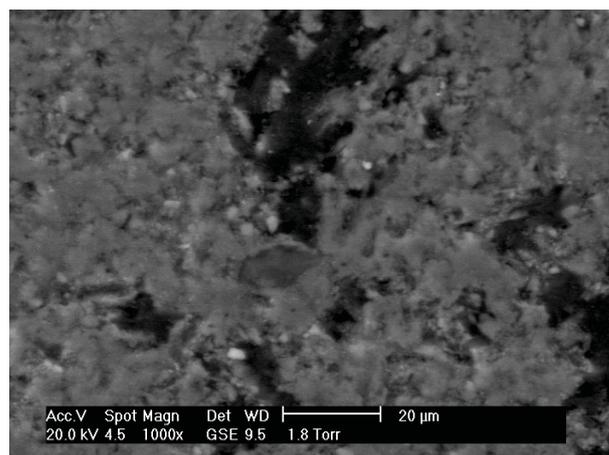


Abb. 52 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch

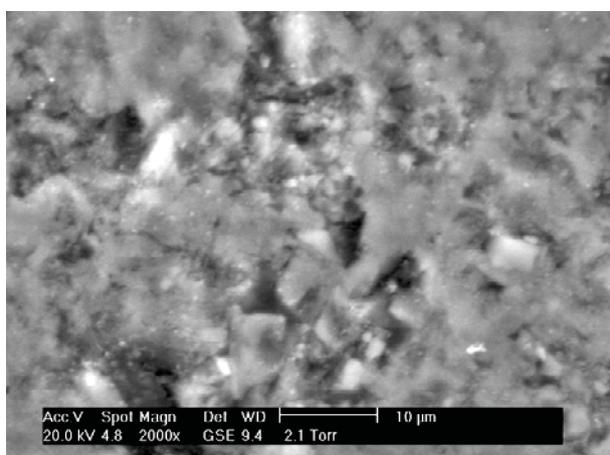


Abb. 53 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch

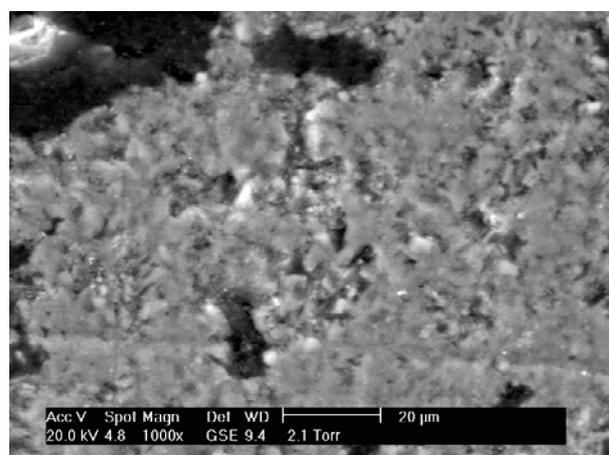


Abb. 54 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch

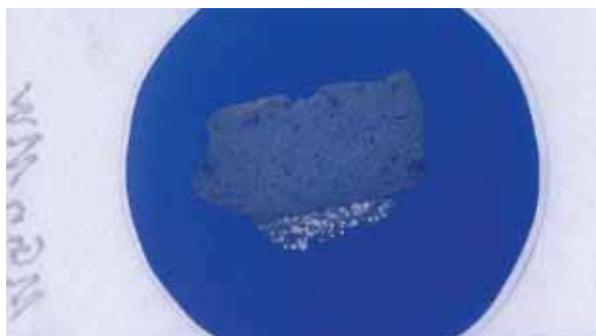


Abb. 55 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Dünnschliff des Gipsgefüges nach MW-Versuch, roter Pfeil markiert Oberfläche, geschädigte Oberfläche mit Ausbrüchen, Dünnschliffscan, 28 x 48 mm

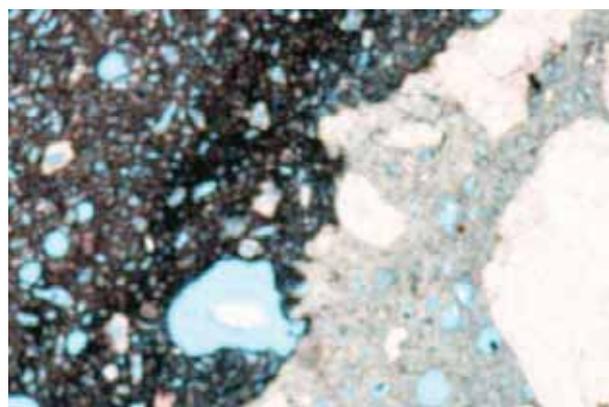


Abb. 56 Dünnschliffaufnahme der Probe im Übergang Unterputz (rechts) – Gipsstuck (links) (Nicols ||, Bildbreite: 1,9 x 1,29 mm)

Mit der Polarisationsmikroskopie kann das sehr feine Gipsgefüge nicht ausreichend aufgelöst werden. Daher wurde die höher auflösende Methode der Rasterelektronenmikroskopie eingesetzt. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen das bereits beschriebene dichte Gefüge (Abb. Abb. 57, Abb. 59). Teilweise liegen reliktsche Anhydrite vor. Die EDX-Analysen (jeweils neben den Aufnahmen angeordnet) zeigen neben den Calciumsulfatbestandteilen Calcium und Schwefel eine Weiß-Pigmentierung des Gipses mit Titandioxid. Des Weiteren werden Magnesium und Silizium nachgewiesen. Hier handelt es sich um Verunreinigungen im Gips. Aluminiumionen, die auf die Anwendung von Alaun ( $KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$ ) hinweisen könnten, wurden nicht nachgewiesen.

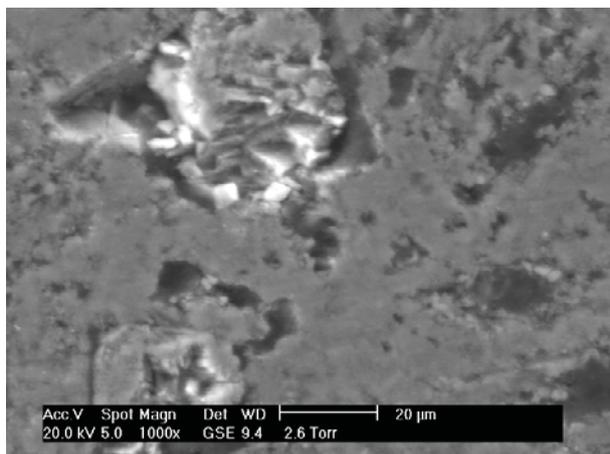


Abb. 57 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, größere Kristalle im Porenraum

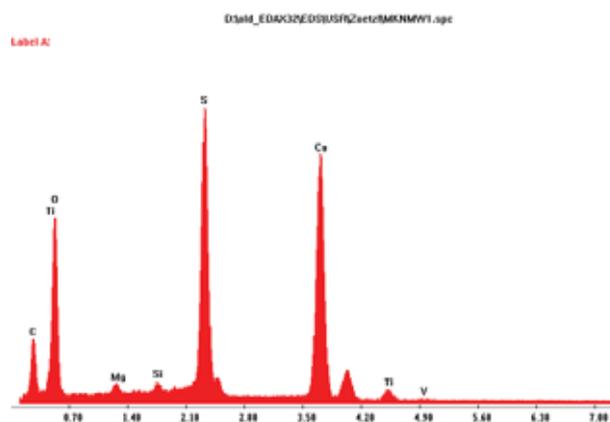


Abb. 58 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch, EDX-Spektrum, Gips mit  $TiO_2$ -Weißpigment, geringer Anteil an Mg (Verunreinigung)

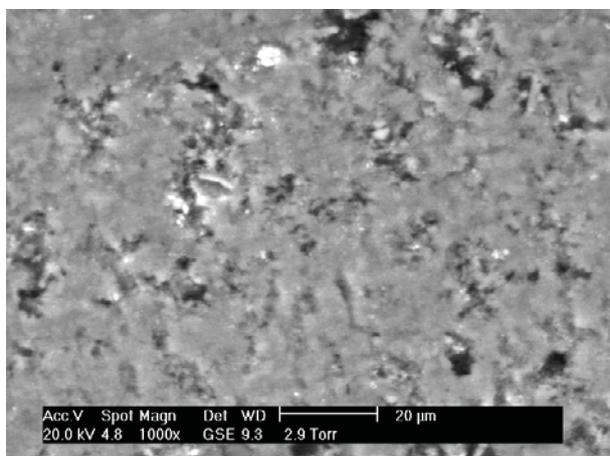


Abb. 59 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, dichtes Gefüge

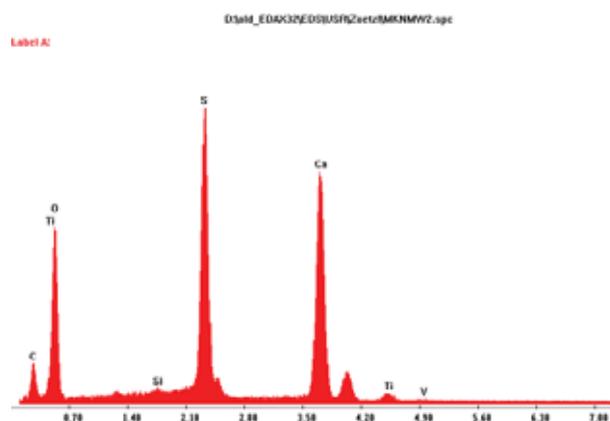


Abb. 60 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch, EDX-Spektrum, Gips mit  $TiO_2$ -Weißpigment, geringer Anteil an Mg (Verunreinigung)

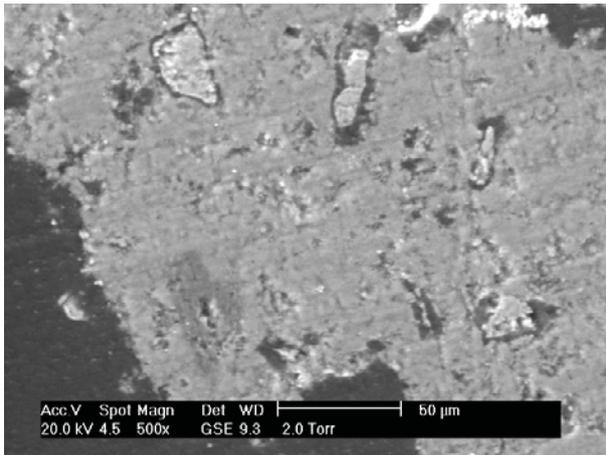


Abb. 61 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, dichtes Gefüge, Kristallisation im Porenraum

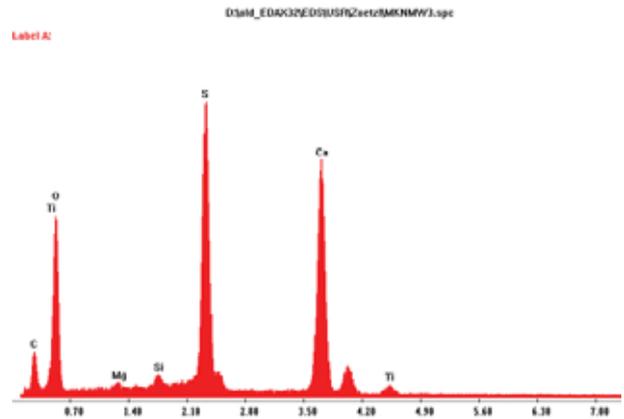


Abb. 62 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge vor MW-Versuch, EDX-Spektrum, Gips mit  $\text{TiO}_2$ -Weißpigment, geringer Anteil an Mg (Verunreinigungen)

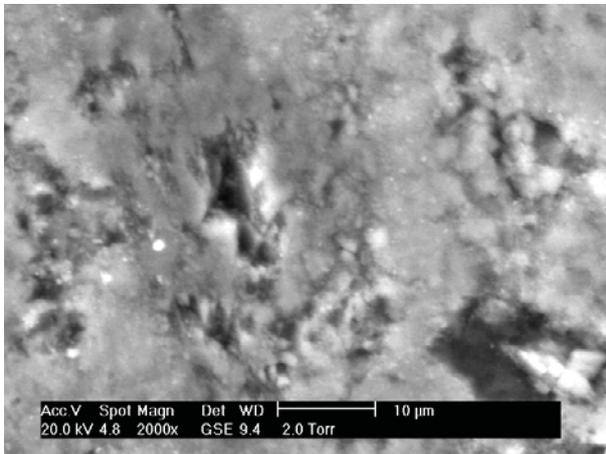


Abb. 63 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, dichtes Gefüge

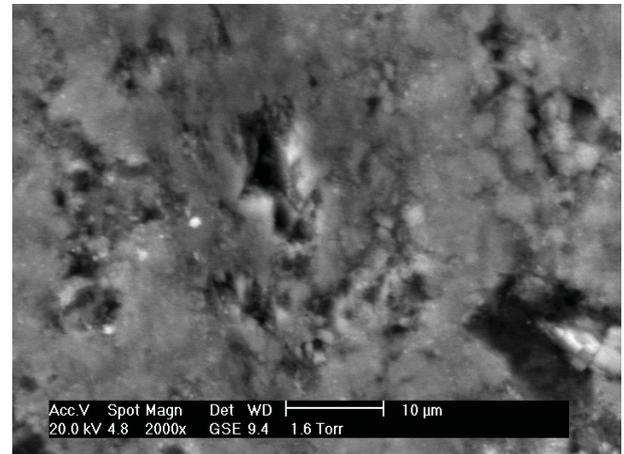


Abb. 64 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, dichtes Gefüge

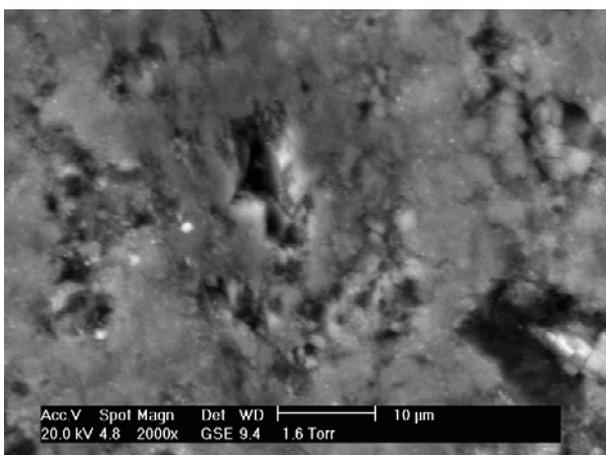


Abb. 65 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, dichtes Gefüge

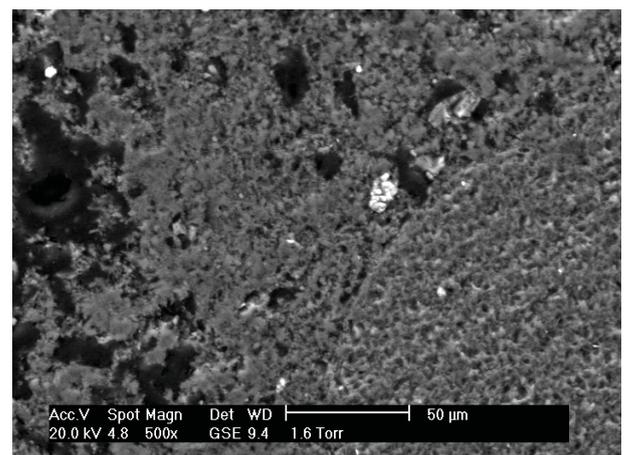


Abb. 66 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, Übergang zum dahinterliegenden Mörtel

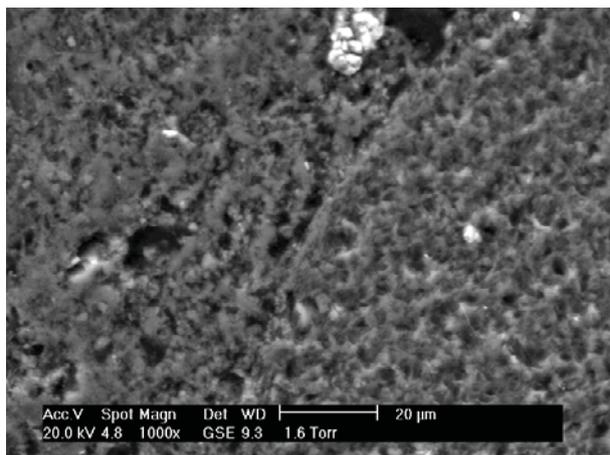


Abb. 67 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, Übergang zum dahinterliegenden Mörtel

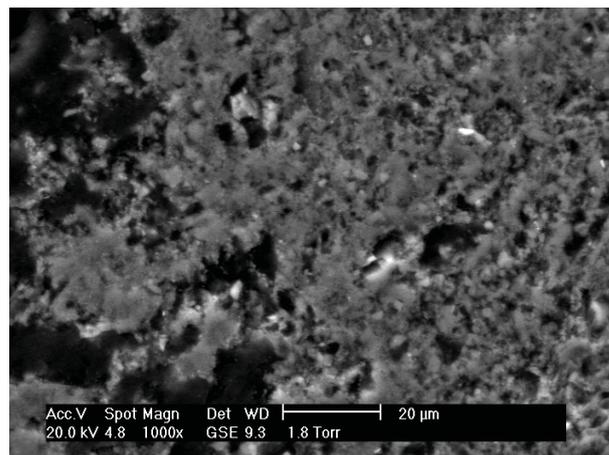


Abb. 68 Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstuckoberfläche, Gipsgefüge nach MW-Versuch, Übergang zum dahinterliegenden Mörtel

#### 4.8 XRD-Untersuchungen an Gipsstückproben

Für eine Analyse mittels Röntgenpulverdiffraktometrie wurden Gipsstückproben vor und nach dem Mikrowellentrocknungsversuch entnommen. Der Phasenbestand der Proben wurde ermittelt (Tab. 11). In beiden Proben treten die Calciumsulfate Anhydrit, Bassanit und Gips sowie Quarz auf. Der Quarzanteil ist dem unterliegenden Kalkmörtel zuzuordnen, er ist kein Gipsstückbestandteil. In der Probe M\_GnMW (nach der MW-Trocknung) werden höhere Anhydrit-Intensitäten im Röntgendiagramm registriert, was auf eine Entwässerung infolge des MW-Versuches hindeutet. Anhand der Peakintensitäten können Mengenanteile im Präparat abgeschätzt werden, die jedoch aufgrund des Einflusses der bevorzugten Orientierung von Gips und Anhydrit (Textureffekte bei 0k0-Reflexen) Ungenauigkeiten aufweisen können. Dieser Einfluss wurde in der Präparation der XRD-Proben berücksichtigt und damit minimiert. Da Anhydrit und Bassanit bereits im unbehandelten Gipsstück enthalten sind, wird eine unvollständige Umsetzung der Ausgangsstoffe zu Gips festgestellt. Untersuchungen einer Rohstoffprobe zeigten eine Mischung aus Bassanit und Anhydrit. Da die Proben noch einer exakteren Analyse mittels TG/DTA unterzogen wurden, erfolgten keine quantitativen XRD-Analysen.

Tab. 11 Probenübersicht, Probenahmepunkte

Probennummer	Probenahmepunkte	Material	Mineralphasenbestand
M_G v MW	Kapelle, W-Seite, Innenraum, 50 cm rechts neben Hauptaltar, 1 m über Bodenoberkante 0-2 cm	Bohrmehl, Stuckgips vor Mikrowellentrocknung	Gips ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) Bassanit ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) Quarz ( $\text{SiO}_2$ )
M_G n MW	2-4 cm	Stuckgips nach Mikrowellentrocknung	Gips ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) Bassanit ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) Quarz ( $\text{SiO}_2$ )

#### 4.9 TG-Untersuchungen an Gipsstückproben

Aufgrund von möglichen Textureffekten bei röntgendiffraktometrischen Analysen wurde die für die Ermittlung der exakten Phasenzusammensetzung die Thermoanalyse angewendet. Gips  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  dehydratisiert nach Literaturangaben (Henning et. al., 1989) stufenweise nach folgendem Temperaturregime (Tab. 12):

Tab. 12 Entwässerung von Gips

Temperaturbereich	Reaktion
60 bis 150°C	Gipsentwässerung ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) und Phasenumwandlung zu $\beta$ -Halbhydrat ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ )
150°C bis 310°C	weitere Entwässerung und Phasenumwandlung von $\beta$ -Halbhydrat ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) zu $\beta$ -Anhydrit III ( $\text{CaSO}_4 \times 0 \text{H}_2\text{O}$ )
> 350°C	Phasenumwandlung von $\beta$ -Anhydrit III ( $\text{CaSO}_4 \times 0 \text{H}_2\text{O}$ ) zu Anhydrit II ( $\text{CaSO}_4 \times 0 \text{H}_2\text{O}$ )
> 800°C	Zerfall von Anhydrit II in CaO und $\text{SO}_3$

Da bei der Mikrowellentrocknung nur Temperaturen bis ca. 120 C relevant sind, wurde sich auf die Phasenumwandlungen von Gips zu  $\beta$ -Halbhydrat ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) und erweitert zu Anhydrit III konzentriert. In diesem Bereich der DTA- Kurve liegt ein Doppelpeak vor, der die Entwässerung von Gips zu  $\beta$ -Halbhydrat und von  $\beta$ -Halbhydrat zu Anhydrit III beschreibt. Der Kurvenverlauf zeigt bei beiden Proben (vor und nach der MW-Behandlung) vergleichbare Zusammensetzungen (siehe Tab. 13). Die geringe Differenz liegt im Bereich des Fehlers. Anhand dieser Untersuchungen wurden keine Unterschiede in der Phasenzusammensetzung festgestellt.

Damit wird der durch die Röntgenanalyse suggerierte angestiegene Anhydritgehalt nach der MW-Behandlung eindeutig widerlegt.

Tab. 13 Gipsentwässerung zu  $\beta$ -Halbhydrat und Anhydrit III

Probenummer	Entwässerung Gips zu $\beta$ -Halbhydrat [%]	Entwässerung $\beta$ -Halbhydrat zu Anhydrit III [%]
M_G v MW	13,79	5,07
M_G n MW	13,31	5,04

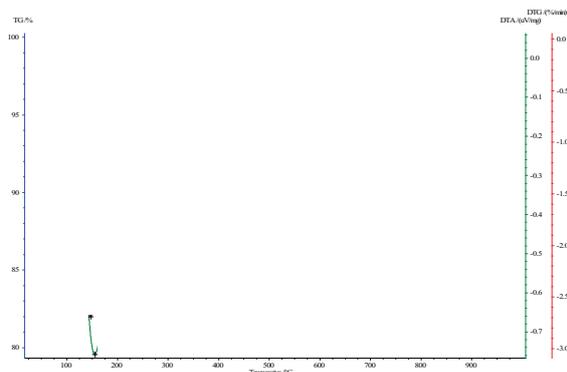


Abb. 69 Gipsgefüge vor MW-Versuch, TG/DTA-Kurve

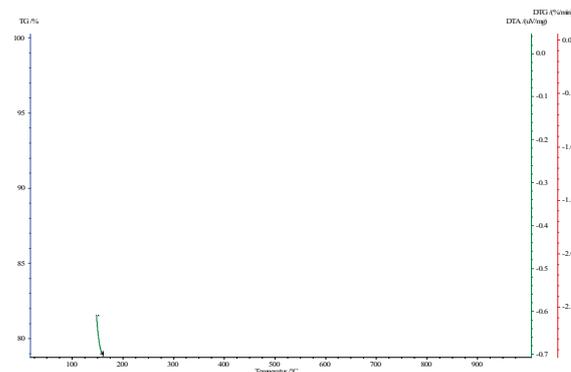


Abb. 70 Gipsgefüge nach MW-Versuch, TG/DTA-Kurve

#### 4.10 Wasseraufnahme nach Karsten

Die Wasseraufnahme verschiedener vom Hochwasser betroffener und nicht betroffener Gipsstuckoberflächen (Abb. 71 bis Abb. 74) wurde untersucht. Dabei zeigte sich, dass im Sockelbereich auf historischen Gipsstuckoberflächen ein erfolgreiches Ansetzen des Karstenschen Prüfröhrchens nicht möglich war. Auf Grund einer sehr hohen Porosität in diesen Bereichen lief das Röhrchen sofort leer und das Wasser trat im Umkreis des Prüfröhrchens aus dem Gipsstuck wieder aus. In einem anderen Bereich des Sockels wurde ein stark saugender Stuckgips festgestellt (MK\_WA\_2). Die ebenfalls vom Hochwasser betroffenen, kurz vor dem Hochwasser 2010 erneuerten Stuckgipsoberflächen werden mit wasserabweisend bis wasserhemmend eingestuft. In polierten Bereichen, oberhalb der Hochwassermarke, zeigen sich sehr geringe Wasseraufnahmen mit der Einstufung „wasserhemmend“.

In stark durch das Hochwasser beanspruchten Bereichen mit historischem Gipsstuck löst das Wasser die abschließende Versiegelung und die Politurschicht aus der Gipsstuckoberfläche heraus und führt dadurch zu einer Steigerung der Wasseraufnahme.

Insgesamt zeigt der Stuckgips eine weitgehend hohe Wasserbeständigkeit. Der Ausgangsstoff ist ein Mehrphasensystem mit einem „reaktionverzögertem“ Anhydrit, der zu einer Nacherhärtung führt. Diese Nacherhärtung sorgt vermutlich für eine Verdichtung des Gefüges.

Tab. 14 Übersicht über Karstenmessungen, Klassifizierung nach DIN 52617

Probenummer	Messort	w-Wert [ $l/(m^2 \cdot h^{0,5})$ ]
MK_WA_1	Marienthal, Michaeliskapelle, linke Seite (neben Klimamessung), HW-Bereich	0,38 (wasserabweisend)
MK_WA_2	Marienthal, Michaeliskapelle, Sockel unten rechts, HW-Bereich	2,99 (stark saugend)
MK_WA_3	Marienthal, Michaeliskapelle, oben rechts polierte Fläche	0,38 (wasserabweisend)
MK_WA_4	Marienthal, Michaeliskapelle, oben links polierte Fläche	0,32 (wasserabweisend)
MK_WA_5	Marienthal, Michaeliskapelle, mittlere Höhe bei Klimamessung, HW-Bereich	1,12 (wasserhemmend)



Abb. 71 MK\_WA\_1



Abb. 72 MK\_WA\_2



Abb. 73 MK\_WA\_2



Abb. 74 MK\_WA\_4

#### 4.11 Auswertung Vor-Ort-Untersuchungen

Im Januar 2011 wurden vor Ort in der Michaeliskapelle Feuchteproben entnommen und mit früheren Daten verglichen. Auch nach einem halben Jahr nach dem Hochwasserereignis sind noch problematisch hohe Feuchten im Mauerwerk nachweisbar. Im Mai 2011 wurde eine erste Versuchphase zum Einsatz von Mikrowellengeräten zur Trocknungsunterstützung direkt vor Ort in der Michaeliskapelle eingesetzt. Die etwas ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Gipsoberfläche bei der MW-Behandlung wurde als Effekt des Mauerwerksaufbaus interpretiert. Entsprechend den an der Musterfläche durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Aussagen zum Mikrowellentrocknungsversuch formulieren:

1. Relativ zur Mauerstärke eine geringe Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung, geringe Erwärmung in der dritten Tiefenstufe bei 15 cm
2. Ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Oberfläche, punktuelle hot-spots
3. Hohe Oberflächentemperaturen
4. Alle drei beprobten Tiefenprofile zeigen in allen Tiefenstufen uneinheitliche und uneindeutige Ergebnisse einer Feuchteumverteilung

Die offen gebliebenen Fragen zu den Untersuchungen an der Probestfläche in der Michaeliskapelle fordern weiterführende Analysen unter bekannten Versuchsbedingungen. Diese Voraussetzungen bietet der für diesen Versuch hergestellte Probekörper. Die Ergebnisse zeigen noch immer eine deutliche Mauerwerksdurchfeuchtung. Die Gipsstuckoberfläche, die geglättet, geschliffen und poliert wurde, behindert ein Abtrocknen des Mauerwerks. Eine Abnahme der Gipsstuckoberfläche (z. B. bis in Höhe der Putzkante der letzten Rest.-Maßnahme) unterstützt die Abtrocknung des Mauerwerks erheblich. Die für Gips bekannte gute Feuchteabsorption ergibt sich aus der hohen Porosität. Stuckgips, ist feinkristallin und damit dichter als Baugips, er zeigt einen deutlich kleineren Porenraum. Bei ständigem Feuchtigkeitsüberangebot führt die starke Durchfeuchtung zu einem erheblichen Festigkeitsrückgang bzw. zu einer Zerstörung des Gipsgefüges. Die offen gebliebenen Fragen zu den Untersuchungen an der Probestfläche in der Michaeliskapelle fordern weiterführende Analysen unter bekannten Bedingungen. Diese Voraussetzungen bietet die Untersuchung am Probekörper.

### 5 Auswertung von Klimadaten

Große Anteile dieses Kapitels sind in dem unveröffentlichten IDK-Bericht DD 59/2012 festgehalten. So konnten Zwischenergebnisse den Projektbeteiligten rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal“ AZ 29378 konnten auch raumklimatische Aufzeichnungen, die in der Kapelle seit März 2009 durchgeführt werden, ausgewertet werden. Durch diese langfristige Klimaaufzeichnung war es möglich, die raumklimatischen Veränderungen durch das Flutereignis vom August 2010 zu erfassen und zu bewerten. Im Rahmen des Wiederaufbaus der Klosteranlage wurden weitere Klimamesssensoren installiert, so unter anderem zur messtechnischen Erfassung von Mauerwerksfeuchten. Diese Messdaten konnten nun auch für das Forschungsprojekt genutzt werden.

## 5.1 Vorgehensweise und Messkonzept

Die Auswertung der Raumklimamessungen in der Michaeliskapelle bezieht sich auf den Untersuchungszeitraum vom 17.03.2009 bis zum 14.11.2012. Zum Einsatz kamen Datenlogger vom Typ DK 325 mit Messfühlern der Firma Driesen + Kern GmbH und vom Typ Testo 175-H2.

Die Genauigkeit der Messfühler beträgt:

Temperatur: bei 0°C - +40°C	± 0,3°C
rel. Feuchte: bei 10% - 90%	± 1,8% rel.LF

Die Messungen erfolgten mit einem Messtakt von einer viertel Stunde. Es wurden ein Messpunkt für die raumklimatische Entwicklung und zwei Messpunkte für die Luftfeuchteveränderung in einem abgedichteten Bohrloch angelegt. Die Lage der Messpunkte wird in Tab. 15 grafisch dokumentiert.

Tab. 15 raumklimatische Messpunkte (MP) in der Michaeliskapelle

Messpunkt 1 - Raumklima



- relative Luftfeuchte im Kapellenraum
- Raumlufttemperatur im Kapellenraum
- absolute Luftfeuchte im Kapellenraum

Messpunkt 2 – Wandklima



Roter Kreis

- relative Luftfeuchte im abgedichteten Bohrloch - oben
- Raumlufttemperatur im abgedichteten Bohrloch – oben
- Einbautiefe: ca. 2,00 cm

Grüner Kreis

- relative Luftfeuchte im abgedichteten Bohrloch - unten
- Raumlufttemperatur im abgedichteten Bohrloch – unten
- Einbautiefe: ca. 2,00 cm

Messpunkt 3 – Außenklima (Sensor verdeckt)



- relative Luftfeuchte der Außenluft
- Raumlufttemperatur der Außenluft
- absolute Luftfeuchte der Außenluft

## 5.2 Ergebnisse der Raumklimamessungen

Im Folgenden werden die Messergebnisse für den Zeitraum vom 17.03.2009 bis zum 14.11.2012 erläutert. Die Diagramme befinden sich im Anschluss des Berichtes.

In **Diagramm 1** wird das Raumklima in der Michaeliskapelle für den oben genannten Untersuchungszeitraum dargestellt. Durch die rote Linie wird das Hochwasserereignis markiert. Anschließend sind die Folgen des Hochwassers erkennbar. Die Michaeliskapelle wurde ca. 1,70 m hoch überflutet. Die Folge war eine sehr hohe relative Luftfeuchte (grüne Linie) und absolute Luftfeuchte (blaue Kurve) in der Raumluft über einen längeren Zeitraum. Deutlich sind die unterschiedlichen raumklimatischen Situationen vor und nach der Flut erkennbar. Nach der Flut konnte eine kontrollierte Raumluft- und Materialtrocknung nur durch den Einsatz eines Raumluftentfeuchters, eines Raumluftgebläses und einer leichten Raumlufttemperierung im Winter realisiert werden.

In **Diagramm 2** werden für den Kapellenraum und die beiden abgedichteten Bohrlöcher die relativen Luftfeuchten für den Untersuchungszeitraum mit den beiden Trocknungsversuchen am 05.05.2011 und am 19.07.2012 dargestellt. Erkennbar wird in diesem Diagramm, dass es im unteren Wandbereich (grüne Kurve) (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** – MP 2) ab Juli 2011 zu einer anhaltenden Trocknung hinter dem Gipsstuck gekommen ist. Im oberen Wandbereich (rote Kurve) ist dies bis zum 14.11.2012 nicht feststellbar. Ein Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte in der Raumluft (blaue Kurve) und den beiden Bohrlöchern kann nicht festgestellt werden.

In **Diagramm 3** erfolgt eine detaillierte Darstellung des 1. Versuchstages am 05.05.2011. Den Zeitraum, an denen die Klimasensoren aus Sicherheitsgründen aus der Wand entfernt werden mussten, markieren die roten Linien. Nach Wiederaufnahme der Messung ist eine schnelle Angleichung der relativen Luftfeuchte in den Bohrlöchern, auf Zustände vor der aktiven Trocknungsmaßnahme, zu verzeichnen.

Der zweite Versuchstag am 19.07.2012 wird in **Diagramm 4** dargestellt. An diesem Tag erfolgte die Wandtrocknung über den Außenbereich, so dass die Sensoren in der Wand belassen wurden. Es konnte jedoch in keinem der beiden Bohrlöcher eine Veränderung messtechnisch erfasst werden.

In **Diagramm 5** werden für den Kapellenraum und die beiden abgedichteten Bohrlöcher die Lufttemperaturen für den Untersuchungszeitraum mit den beiden Trocknungsversuchen am 05.05.2011 und am 19.07.2012 dargestellt. Erkennbar wird, dass die zwei Wandmesspunkte annähernd gleich auf Veränderungen der Raumlufttemperaturen reagieren. In den Wintermonaten sind jedoch deutliche Differenzen zur Raumlufttemperatur ablesbar, im Sommerhalbjahr findet eine Angleichung statt.

Die Ergebnisse für den 1. Versuchstag am 05.05.2011 werden in **Diagramm 6** dargestellt. Im markierten Zeitbereich wurden die Sensoren aus Sicherheitsgründen aus den Bohrlöchern entfernt. Nach dem erneuten Einbringen der Sensoren ist die Restwärme in den Untersuchungsflächen durch die Mikrowellenstrahlung deutlich erkennbar. Diese sinkt innerhalb weniger Stunden auf den Vorzustand ab.

Der zweite Versuchstag am 19.07.2012 wird in **Diagramm 7** dargestellt. An diesem Tag erfolgte die Wandtrocknung über den Außenbereich, so dass die Sensoren in der Wand belassen wurden. Wie bei der Messung der relativen Luftfeuchte (Diagramm 4), konnte jedoch in keinem der

beiden Bohrlöcher eine Veränderung der Lufttemperatur im Bohrloch messtechnisch erfasst werden.

Da die Wärmestrahlung der Mikrowellenstrahlung auch erst nach vielen Stunden auf der Innenseite der Wandoberfläche messtechnisch festgestellt werden kann, wird in **Diagramm 8** der Zeitraum vom 19.07.2012 bis einschließlich des 21.07.2012 dargestellt. Die Erwärmung im Bohrloch oben (rote Kurve) hängt mit der Erwärmung der Raumlufttemperatur (blaue Kurve) zusammen.

Im **Diagramm 9** erfolgt der Vollständigkeit halber eine Darstellung des Außenklimas am Messort Kloster St. Marienthal.

### 5.3 Fazit zum Klima, Empfehlungen

Die im Rahmen der Restaurierung der Konventgebäude installierten Klimasensoren in der Michaeliskapelle, konnten auch für das DBU – Projekt Erkenntnisse liefern. Auch wenn die Sensoren an den beiden Versuchstagen nicht optimal platziert werden konnten, sind doch auswertbare Ergebnisse erfasst worden. Es kann festgestellt werden, dass die Temperaturbeeinflussung durch die Mikrowellenstrahlung einen nur kurzzeitigen Einfluss auf die Wandtemperatur ausgeübt hat, und dies auch nur bei einer Behandlung auf der Innenseite. Die Lufttemperaturen und die relative Luftfeuchten in den abgedichteten Bohrlöchern näherten sich sehr schnell den Zuständen vor der Versuchsdurchführung an. Die Versuchsdurchführung auf der Außenseite konnte im Innenbereich der Wände nicht messtechnisch erfasst werden. Die Abtrocknung im unteren Wandbereich der Außenmauer ist wahrscheinlich auf die aktive Trocknung der unter der Michaeliskapelle befindlichen Gruft zurückzuführen.

### Zukünftiges raumklimatisches Konzept in der Michaeliskapelle

Durch die Flutschadensbeseitigung ist es möglich, kleinteilige technische Anlage zu installieren, die zu einer gezielten Beeinflussung der Raumluft im Kapellerraum beitragen können. So wird es zum Einbau einer sensorgesteuerten Raumluftanlage im Kuppelbereich der Kapelle kommen, um die erhöhten Werte der relativen Luftfeuchte abzumildern. Bevor eine Innenraumrestaurierung der Kapelle durchgeführt werden kann, sollte zuerst eine Absenkung der hohen Werte der relativen Luftfeuchte im Kapellenraum erfolgen, um das Raumklima insgesamt zu stabilisieren.

Um temporär genutzte Gebäude besser zu belüften gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Unkontrolliertes/ natürliches Lüften ohne Technik: Hier besteht die Gefahr des „falschen Lüftens“, da der Mensch nicht in der Lage ist, Klimaverhältnisse zwischen Außen- und Raumklima richtig einzuschätzen und der Zeitraum der Belüftung oft auf die Arbeitszeit eines Werktages reduziert wird.

2. Kontrolliertes Lüften mit Technik: Die technischen Lüftungsvarianten haben den großen Vorteil, berechnete Klimaverhältnisse zu vergleichen und eine Lüftung selbstständig zu beginnen oder zu beenden. Diese Form der Beeinflussung erfolgt 24 Stunden am Tag. Sie ist jedoch mit, wenn auch geringen, Investitions-, Energie-, und Unterhaltungskosten verbunden.

Um die Luftfeuchte im Kapellerraum dauerhaft und kontrolliert abzusenken, wurde der Einsatz einer **sensorgesteuerten Lüftungsanlage** empfohlen. Die Funktionsweise einer sensorgesteuerten Lüftungsanlage kann wie folgt beschrieben werden:

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Außen- und Innenluft werden von Messfühlern gemessen und an ein sich im Gebäude befindliches Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät errechnet automatisch die absolute Luftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Ist die absolute Feuchte innen höher als außen werden Ventilatoren oder Fensteröffner in einem individuell einstellbaren Algorithmus an- und ausgeschaltet. Während des Lüftungsvorganges kann sich die trockenere Außenluft mit der vorhandenen feuchteren Innenluft vermischen, wodurch Fußboden- und Putzflächen, sowie freiliegendes Mauerwerk Feuchte an die Raumluft abgeben können. Durch einen individuell einstellbaren Messzeitraum werden die beiden Luftbereiche permanent miteinander verglichen und die Lüftung gestartet oder gestoppt. Der mit einem elektrischen Verschluss in der Wand oder dem Fenster eingebaute Ventilator zieht die feuchte Luft aus dem Raum und bläst sie ins Freie. Die Ventilatoren werden so dimensioniert, dass in einem definierten Zeitraum die Raumluft einmal ausgetauscht wird. Über eine Zuluftöffnung oder ein mit einem elektrischen Fensteröffner gekipptes Fenster strömt wegen des vom Ventilator erzeugten Unterdrucks trockenere Außenluft in den Raum. Die Orte der Zuluft- und der Abluftöffnung sollten weiträumig auseinander liegen, um eine möglichst große Durchmischung der Raumluft zu ermöglichen. Dadurch soll auch verhindert werden, dass sich Raumluftbereiche bilden, die nicht belüftet werden. Mittlerweile können bei guten Steuergeräten zusätzliche Grenzwerte eingestellt werden. Somit ist eine Temperaturbegrenzung für Frostschutz oder ein Mindestwert für die relative Luftfeuchte im Raum möglich, damit z. B. eingelagerte Gegenstände nicht austrocknen. Ferner besteht die Möglichkeit der Datenaufzeichnung, welche zu empfehlen ist, um die Wirksamkeit der Durchlüftung über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und um Änderungen bzw. Anpassungen der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

Ein sehr wichtiger Punkt bei allen technischen Anlagen ist die Wartung und Pflege. Hier muss allen Beteiligten klar sein, dass mindestens einmal im Jahr die Technik und Sensorik zu überprüfen ist. Aber auch die erfassten Raumklimadaten müssen ausgewertet und interpretiert werden. Dies kann durch eine eingewiesene Person, entweder durch den Eigentümer, den Nutzer oder externe Fachkräfte erfolgen. Die Datenauswertung ist von besonderer Bedeutung, denn dadurch lassen sich die Auswirkungen der Raumlüftung klar belegen, bzw. können eingestellte Parameter dem tatsächlichen und sich ändernden Raumklimazustand angepasst werden.

Durch diesen gesteuerten und kontrollierten Luftaustausch kann sich die raumklimatische Situation in der Kapelle stabilisieren und die Luftbewegungen werden zu einem positiven Luftwechsel innerhalb der Kapelle führen. Zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeit bei Veranstaltungen kann durch solch die Belüftung sehr schnell nach außen abgeführt werden, bevor sich die Feuchtigkeit an kühleren Oberflächen der Raumhülle und der Ausstattung niederschlägt. Ein weiterer Vorteil solch einer Anlage liegt in ihrer kleinteiligen und reversiblen Bauform.

Des Weiteren werden im Wandsockelbereich elektrische Heizkabel verlegt, um diesen bauphysikalisch kritischen Bereich langfristig zu stabilisieren und eine Auffeuchtung durch Kondensatausfall zu unterbinden. Die Dimensionierung und zeitliche Ansteuerung wird im Winter 2012 / 2013 messtechnisch erprobt, erfasst und bewertet.

## 6 Laboruntersuchungen, Probekörpermessungen

Große Anteile dieses Kapitels sind in dem unveröffentlichten IDK-Bericht DD 98/2011 festgehalten. So konnten Zwischenergebnisse der Projektbeteiligten rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.



Abb. 75 Probekörper am Versuchsort an der HTW-Dresden

### 6.1 Probekörperbeschreibung

#### 6.1.1 Probekörpermauerwerk mit Temperaturmesssonden

Für die Laborversuche wurde ein Probekörper, bestehend aus einem Ziegelmauerwerk mit einer marmorierten Gipsstückfassung und integrierten Temperaturmessfühlern, gebaut. Der Probekörper wurde in 8 Lagen aus Vollziegeln gemauert. Als Setzmörtel wurde ein hydraulischer Kalkmörtel (Kalkzementmörtel) verwendet. Die Abb. 76 und Abb. 77 geben eine Beschreibung zum Probekörperaufbau und zur Anordnung der Temperaturmesssonden. Die Abb. 78 und Abb. 79 geben eine fotografische Dokumentation.

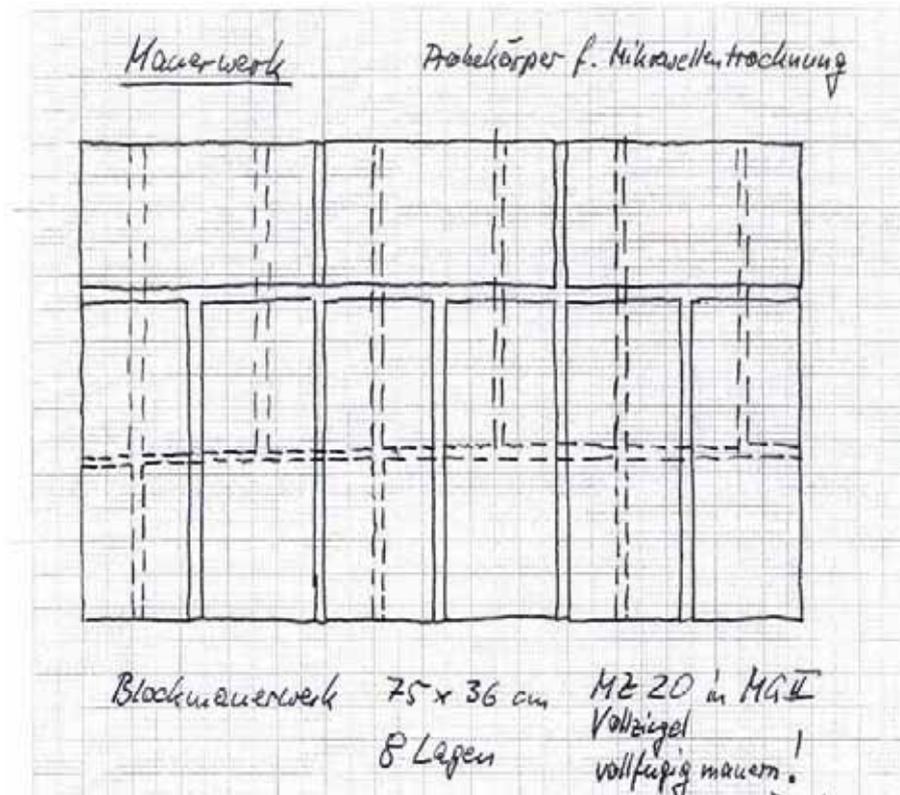


Abb. 76 Skizze zum Mauerwerksaufbau

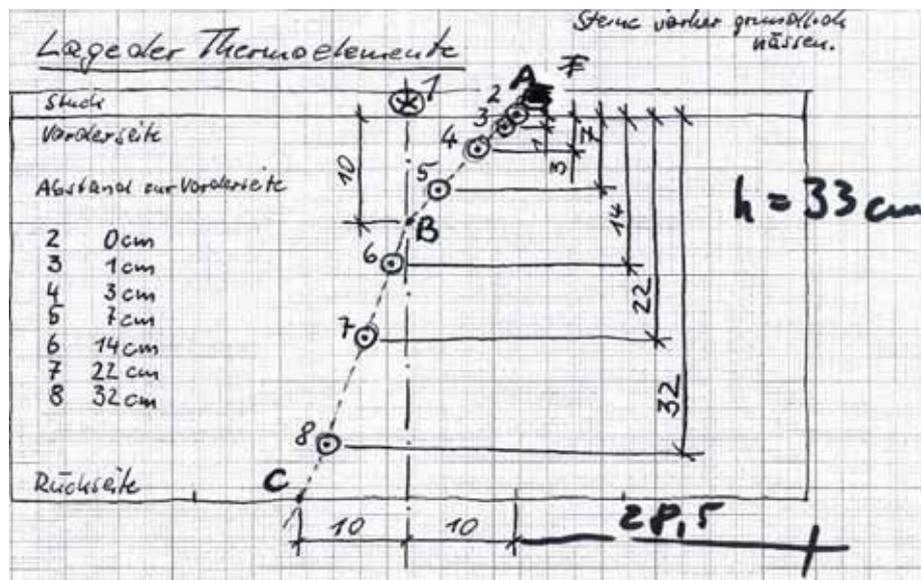


Abb. 77 Skizze zur Verteilung der Temperatursensoren im Probekörper, Lage: Temperatursensor 1 im Stuck, Temperatursensoren 2-8 in der mittleren Lagerfuge



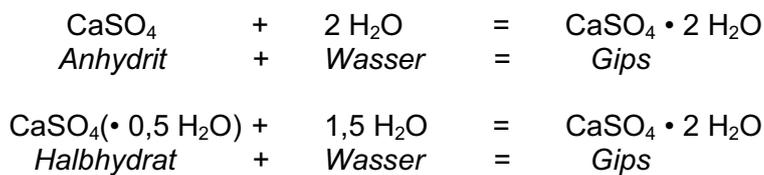
Abb. 78 Gemauerter Probekörper



Abb. 79 Rückseite des Probekörpers mit Kabeln der Temperaturmesssonden

### 6.1.2 Stuckmarmor

Im Vorfeld der Herstellung der Stuckgipsoberfläche wurde der Phasenbestand des handelsüblichen Stuckgipsmaterials untersucht. Es besteht aus einer Mischung aus Halbhydrat und Anhydrit. Durch hydratische Verfestigung bildet sich aus beiden Verbindungen Gipsstuck (Gips). Die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen werden im Folgenden angegeben:



Allerdings wurden in einer Probe des bereits Monate vor dem Hochwasserereignis fertig gestellten Gipsstucks, nach dem Hochwassereinfluss, noch immer neben Gips (Hauptmineralphasenbestand) auch geringe Anteile an Halbhydrat und Anhydrit gefunden (IDK-Bericht DD54/2012).

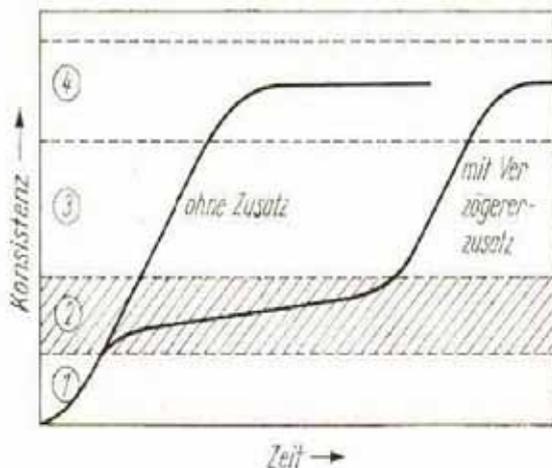


Abb. 80 Erstarrungsverlauf von Stuckgips in Abhängigkeit der Zeit; ohne und mit Verzögerer; Konsistenz: 1 = dünnflüssig, 2 = dickflüssig, 3 = nicht mehr streichfähig, 4 = erhärtet, aus: Henning et. al., 1989



Abb. 81 Marmorierter Gipsstuck

Die Reaktionen laufen parallel innerhalb von Minuten und Stunden ab. Der Erstarrungsverlauf, der in Abb. 80 schematisch dargestellt ist (aus: Henning et. al., 1989), ist für die Verarbeitung maßgebend. Die Eigenschaften von Stuckgipsen werden bereits von der Qualität und Phasenzusammensetzung des Ausgangsmaterials und vom Mahl- und Brennprozess beeinflusst. Eigenschaften wie Korngröße, Kornform und spezifische Oberfläche haben Einfluss auf die Hydratation und hydratische Verfestigung. Die Zugabe von Additiven, z.B. zur Verzögerung und Verlängerung der Verarbeitungszeit, haben Einfluss auf die Bildung von Kristallform und -größe der Gipskristalle, auf die Art der Verfilzung der Kristalle miteinander und somit auf die Ausbildung des Gipsgefüges. Daraus können Unterschiede in Porosität und Festigkeit resultieren.

Im folgenden Text beschreibt der ausführende Stuckateurmeister André Glauche die Herstellung der Stuckgipsoberfläche:

„Aufbau des Stuckmarmors an dem Ziegelmauerstück in der HTW Dresden.

Das vorhandene Mauerfragment wurde im nassen Zustand erarbeitet und mit einer übergestülpten Folie feucht gehalten. Dies sind keine Voraussetzungen für den Aufbau von Stuckmarmor. Ein umgedrehter Wertegang, so wie er auch in Marienthal in der Michaeliskapelle eingetreten ist, wäre besser gewesen. Also erst den Aufbau mit allen notwendigen Mörteltrocknungs- und Karbonatisierungszeiten durchführen und danach eine Flutung des Probekörpers simulieren. Unabhängig davon begann ich meine Arbeit mit dem Aufbringen des Ausgleichspuzzes, Berapp. Dieser, hat an dem vorhandenen Mischmauerwerk in der Michaeliskapelle die Unregelmäßigkeiten ausgeglichen und einen guten Untergrund für den in Folge aufgebrauchten lot- und fluchtgerechten Grundputz dargestellt. Der Berapp ist ca. 2cm stark und wurde wie folgt gemischt: 2 RT Weißkalkhydrat, 1 RT hydr. Kalk, 7-8 RT Sand 0-4mm Ich warf diesen mit der Kelle an und richtete ihn Putz grob ab. Da der Mauerwerkskörper sehr nass war, ist nach einer Woche nur bedingt am Rand eine Trocknung erfolgt. Die Karbonatisierung wurde vermutlich durch den hohen stetigen Feuchtehaushalt (mehr als 6 %) ebenfalls eingeschränkt.

*... (Das weitere Festwerden), das eigentliche "Erhärten" des Kalkmörtels beruht auf der allmählichen Umwandlung des vorhandenen Kalkhydrates in kohlen-sauren Kalk durch Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft. Dieser chemische Vorgang, der von einer Wasserabgabe ( $\text{CaOH}_2$  geht durch die Aufnahme von  $\text{CO}_2$  über in  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ) begleitet ist, spielt sich nur sehr langsam ab, und zwar in dem Grade langsamer, in dem sich die Schicht kohlen-sauren Kalkes verdickt und der Luft, d. h. der Kohlensäure der Zutritt zum Kalkhydrat im Mörtel erschwert wird. Bekannt ist, daß häufig in sehr dicken Mauern der Kalk noch nach Jahrhunderten als Kalkhydrat vorhanden ist. Trotz der bei der Erhärtung, d. h. der Zersetzung des Kalkhydrates vor sich gehenden Wasserabsonderung schreitet der Übergang des Hydrates in Karbonat nur dann nennenswert fort, wenn dem Mörtel von Zeit zu Zeit Feuchtigkeit zugeführt wird, wie denn bekannt sein dürfte, daß der Mörtel an derjenigen Seite von Mauern, die dem Regen am meisten ausgesetzt ist, weit fester wird als an solchen, die mit Feuchtigkeit wenig oder gar nicht in Berührung kommen. ... ein lebhafter, für Bauzwecke ... in Betracht kommender Erhärtungsverlauf (findet nur statt) bei einem Wassergehalt des Mörtels von mehr als 1 v. H. und weniger als 6 v. H. ... "Solange die feinen Hohlräume des Mörtels mit Wasser gefüllt sind, findet eine Überführung von Ätzkalk in kohlen-sauren Kalk [die Karbonatisierung] überhaupt nicht statt und ebenso hört dieser Vorgang vollkommen auf, sobald der Wassergehalt des Mörtels auf 0,6 % seines Gewichts gesunken ist." ... Die Benetzung des Mörtels (mit Wasser) bewirkt wahrscheinlich Ausscheidung von Kalk durch Umlösung, die größere Verdichtung und Verkittung der Mörtelmasse zur Folge hat. Durch das regelmäßige Befeuchten wird immer wieder Kalk gelöst, ausgeschieden, in kohlen-sauren Kalk übergeführt und so die Festigkeit des Mörtels gesteigert. ... Kalkmörtel (erhärtet) nur dann wirksam ... und (nimmt) die ihm nachberühmte Steinhärte nur an, wenn er, wie dies nur bei Bauten, die allen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, der Fall ist, Gelegenheit hat, zeitweise Wasser aufzunehmen und wieder auszutrocknen.*

Textauszug aus: ( [www.konrad-fischer-info.de](http://www.konrad-fischer-info.de) ) Heinrich Burchartz, Mitarbeiter und später Leiter am staatlichen Materialprüfungsamt Berlin (Lichterfelde/Dahlem). In der Zusammenfassung seiner langjährigen Kalkforschung in "Luftkalk und Luftkalkmörtel, Ergebnisse von Versuchen, ausgeführt im Königlichen Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde West, 194 Seiten mit 80 Textfiguren, Verlag von Julius Springer, Berlin 1908", bringt er durch solides und ergebnisoffenes Forschen viele durch ausreichende Testanzahl statistisch abgesicherte und entsprechend tabellengestützte Erkenntnisse in die Baubranche, die heute leider mehr oder weniger wieder in Vergessenheit gerieten. Als für den modernen Kalkforscher und vor allem den Kalkpraktiker wesentliche Punkte seien hier genannt

Der Grundputz wurde wie folgt gemischt und mit der Kelle auch ca. 1,5 - 2,0 cm angeworfen:

2 RT Gips, 1 RT Weißkalkhydrat, 7-8 RT Sand 4 mm, 2 mm

Dieser Mörtel bekommt seine Härte durch den hohen Gipsanteil. Der Weiskalk beeinflusst eine bessere Verarbeitung und reguliert nach dem Erhärten das Anziehen der Stuckmarmorschicht besser. Das heißt, er verhindert eine zu schnelle Wasserabgabe des Stuckmarmors. Allen ist ja vielleicht das unterschiedliche Saugverhalten bekannt wenn man einen reinen Gipsputz und einen reinen Kalkputz mit Wasser be-

sprüht. Genau dort kann ich durch eine Mischung beider Bindemittel zum einen die Härte und zum anderen das Saugverhalten einstellen. 10 Wochentage nach dem Aufbringen des Grundputzes mischte ich den Stuckmarmor. Hierzu verwendete ich Alabastergips aus dem Harz, den ich mit geleimtem, dadurch verzögertem Wasser mischte. Der ursprüngliche hergestellte Leimansatz ist wie folgt gemischt. 2 kg Knochenleim in Perlen wurden in 5 Liter Wasser über Nacht gequollen und am folgenden Tag im erhitzten Wasserbad verflüssigt. Um ein Gelerien und Faulen des Ansatzes zu verhindern geben wir gelöschten Kalk hinzu. Alles zusammen wird durch ein Tuch geseigt und abgefüllt. Dieser Ansatz kann lange verschlossen aufbewahrt werden und würde angeblich dadurch seine Verzögerungszeit verlängern. Unser verwendeter Ansatz ist ca. 1,5 Jahre alt. Ihn habe ich wie folgt mit Wasser verdünnt: 30 ml Leimansatz auf 1 Liter Wasser. Dadurch erhielt ich eine Verzögerungszeit von ca. 12 Stunden, also über Nacht. Den Alabastergips habe ich mit diesem Leimwasser gemischt, die Masse geteilt und mit Pigmenten versehen. Hierfür kamen Rebschwarz und Eisenoxydrot in Frage. Andere Pigmentbeimengungen sind unbedeutend wenig gewesen. Im Anschluss werden alle Partien durch Zugabe von trockenem Gips zu einer festen teigförmigen Masse geknetet und gezielt vermengt. Jetzt besitzt der gesamte Kuchen eine feste Stabilität, ich kann Scheiben abschneiden und diese auf den Grundputz auftragen. Dazu gleich mehr. Vorab ist es bestimmt wichtig mal auszurechnen wie viel Gips und wie viel Anmachwasser im Verhältnis zueinander stehen wenn ich einen festen Teig, ähnlich wie beim Kuchen backen, formen kann. Dieser hohe Bindemittelanteil bringt später auch Spannung auf die Grundputzschicht und eine schlechte Haftung führt zu Ablösungen. Um die Haftung der einzelnen Scheiben auf dem rauen Unterputz zu verbessern, bringt man noch kurz davor eine Schlämme auf. Diese besteht aus den Stuckmarmorresten vom Tisch mit etwas schnellerem Anmachwasser versetzt. Sie nässt den Untergrund zum einen vor, verteilt sich gut auf der griffigen Oberfläche des Unterputzes und an ihr haftet gut die teigige Stuckmarmorplatte die mit einer Messingkelle angetragen und angeklöpft wird.



Abb. 82 Herstellung der Gipsstuckoberfläche durch Herrn Glauche



Abb. 83 Ziegelmauerwerk mit Stuckauflage (rechts)

Durch das etwas kürzer eingestellte Anmachwasser der Schlämme soll der Stuckmarmor von unten herauf schon eher anziehen/abzubinden beginnen. Nachdem die Fläche vollständig mit den Scheiben vertäfelt ist, versuche ich noch am selben Tag diese Fläche abzurakeln/zu schneiden und grob in die gewünschte Form zu bringen. Danach hänge ich mit einer Folie diese ab um ein schnelles Abtrocknen vor dem Abbinden zu verhindern. Die abgebundene Stuckmarmorplatte ist glasig dunkel verfärbt und hat nichts mit der gezielt gemischten Farbigkeit zu tun. Wodurch diese glasige Verfärbung hervorgerufen wird und welcher chemische Prozess dabei abläuft, kann ich Ihnen nicht sagen. Jedoch ist die damit gewonnene Härte wichtig für die spätere Polierbarkeit des Gipses. Gipse ohne Leimzusatz und auch alle späteren Spachtelmassen wären nach Aussage meiner Lehrmeister nicht polierbar. Die somit erhärtete Fläche wurde mit einem Bimsstein (200 Körnung) geschliffen, mit einer Spachtelmasse gestuckt und wieder mit einem Bimsstein (300 Körnung) geschliffen. Wieder gestuckt und mit einem Bimsstein (400 Körnung) geschliffen. Mit diesen drei Schleifgängen sollte die gewünschte Form erreicht sein und der Stuckmarmor kann austrocknen und seine heller gemischte Farbigkeit wieder bekommen. Die Spachtelmassen bestehen aus Alabastergips, Pigment und einem Leimwasser was auf ca. 1 Std. Abbindezeit eingestellt ist. Nachdem der Stuckmarmor ausgetrocknet ist kann mit weiteren und feineren Spachtel und Schleifgängen die Oberfläche immer feiner geschlossen werden um dadurch einen Glanz zu erzielen. An dem Versuchskörper in der HTW gab es durch das feuchte Mauerwerk auch da einen kleinen Rückschlag. Die Binnenfläche des Stuckmarmors schaffte es nicht mehr die dahinter stehende Feuchtigkeit abzugeben und die dunklere Verfärbung ist nicht zurückgegangen. Nur in den Randbereich ist eine Abtrocknung erfolgt. Diese Trocknungszeiten einzuhalten wie am Anfang beschrieben, ist ein wichtiger Grundsatz bei der Herstellung von Stuckmarmor. Durch seine am Ende aufgebrauchte Dichte ist ein Abtrocknen der da-

hinter liegenden Putz- und Mauerschichten im Nachhinein fast unmöglich. Die transportablen Probeplatten wurden analog in der Werkstatt hergestellt. Auf einem Putzträger aus Holzwolleleichtbauplatten brachten wir den Grundputz auf. 2 RT Gips, 1 RT Weißkalkhydrat, 7-8 RT Sand 4 mm, 2 mm Nach dem Abtrocknen erfolgten die anderen Arbeitsschritte wie oben beschrieben.“



Abb. 84 Verarbeitungsfertige marmorierte „Gipsbrote“ mit unterschiedlicher Pigmentierung und Struktur

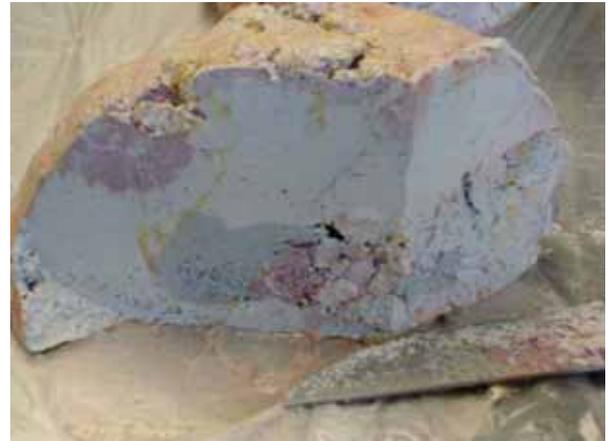


Abb. 85 Marmoriertes Gipsstück im Anschnitt

### 6.1.3 Probeplatte mit Gipsstuck

Neben dem Probekörpermauerwerk mit Gipsstuckoberfläche wurden von Herrn Glauche eine 50 x 50 cm große transportable Testplatte für Untersuchungen angefertigt (Abb. 86). Das Trägermaterial ist eine zementgebundene Holzfaserplatte. Die Dicke der Platte beträgt etwa 6 cm. Halbseitig zeigt der Gipsstuck hier eine Marmorierung, die andere Hälfte ist einfach weiß. Die Gestaltung lässt einen guten Vergleich zur Situation in der Michaeliskapelle in Marienthal zu.



Abb. 86 Gipsstucktestplatte (Aufnahme nach Versuchsdurchführung)

## 6.2 Versuchsdurchführung Probekörper

Für den Mikrowellentrocknungsversuch am Probekörper kam ein Mikrowellengerät der Firma bhd Dresden zum Einsatz. Mit Hilfe der implementierten Messsonden wurden vor, während und nach der MW-Behandlung die Temperaturen an der Oberfläche, im Gipsstuck und im Mauerwerk des Probekörpers aufgezeichnet. Die Tab. 1 beschreibt die Geräte- und Versuchsparameter. Die Mikrowellenbehandlung erfolgte an einer Testflächen (Abb. 87). Die Maße dieser Flächen entsprechen der Auflagefläche der Hornantenne 40 x 33 cm (Abb. 87, Abb. 88, Abb. 89).

Tab. 16 Mikrowellentrocknungsversuch am Probekörper, Geräte- und Versuchsparameter

Gräteparameter	Wert/Einheit
Leistung	900 W
Frequenz	2,45 GHz
Auflagefläche der Hornantenne	40 x 33 cm
Lufttemperatur	ca. 14°C
Wandtemperatur	ca. 15°C
Aufheizzeit	50 Minuten
Abkühlzeit	60 Minuten

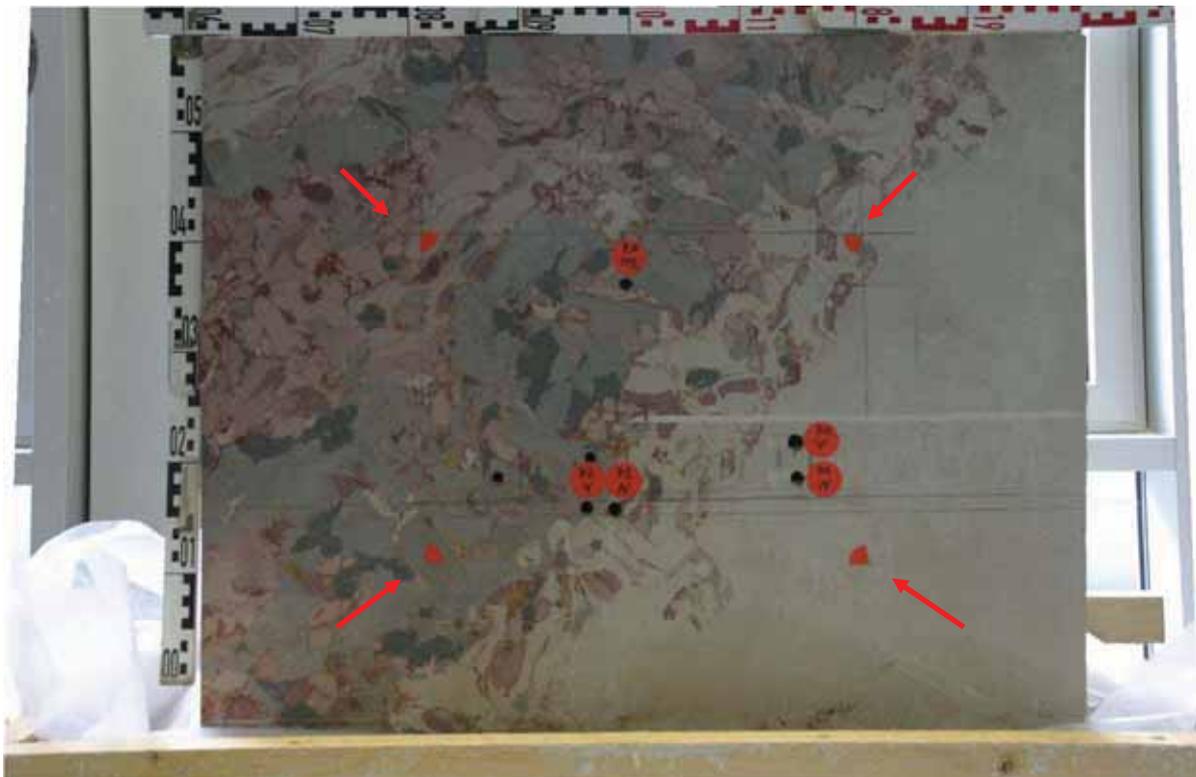


Abb. 87 Die Auflagefläche der Hornantenne auf der Gipsstuckoberfläche ist mit roten Dreiecken gekennzeichnet.

Am Probekörper wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Messung der Temperaturverteilung während der Aufheiz- und Abkühlphase
  - Oberflächentemperatur (IR-Kamera)
  - Temperaturentwicklung in der Tiefe des Mauerkörpers (Messsonden)
- Bestimmung der Feuchteverteilung an 3 Tiefenprofilen in Ziegel und Fuge mit je 16 Tiefenstufen
  - vor dem Mikrowellenversuch (P1V, P2V, Entnahmestelle Abb. 87)
  - nach dem Mikrowellenversuch (P1N, P2N, PN\_TP2, Entnahmestelle Abb. 87)



Abb. 88 Versuchsaufbau, Magnetron, Stativ und Antenne (Schema Abb. 89), aufgelegt auf die Gipsstuckoberfläche

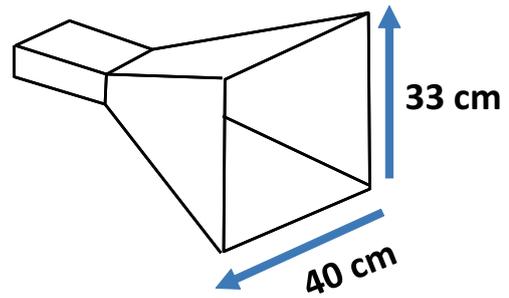


Abb. 89 Schema der Hornantenne

In einem zweiten Experiment wurde eine einzelne Gipsstuckplatte mit MW behandelt. Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 90 und Abb. 91 zusehen. Die experimentelle Durchführung des Versuchs entsprach der des Versuchs mit dem Probekörper.



Abb. 90 Stuckgipsplatte



Abb. 91 Anlegen der Antenne

## 6.3 Ergebnisse Probekörperuntersuchungen

### 6.3.1 Messung der Temperaturverteilung im Mauerwerk

Die Mikrowellenbehandlung erfolgte über die auf die Gipsstuckoberfläche aufgesetzte Hornantenne. Die im Gipsstuck und Mauerquerschnitt entstehenden Temperaturen wurden während der Aufheiz- und Abkühlphase von den in den Probekörper eingebauten Temperaturfühlern gemessen. Da die fest eingebauten Fühler leider nicht abgeschirmt waren, wurden die Messungen durch die MW-Strahlung stark gestört. Daher wurde in regelmäßigen Abständen die Mikrowellenstrahlung ausgeschaltet und nur Messwerte aus diesen Zeitintervallen in die Auswertung gebracht. Für eine begleitende Bestimmung der Oberflächentemperatur mit einer IR-Kamera wurde in den Intervallen ohne MW-Strahlung die Hornantenne abgenommen und Messungen durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden ausgewertet und tabellarisch übertragen. Die Temperaturmessergebnisse am Probekörper sind in Tab. 17 aufgeführt und in Abb. 33 dargestellt.

Der Versuch startete etwa gegen 11 Uhr, die Abklingphase der Temperaturentwicklung bei den eingebauten Fühlern wurde bis 15 Uhr bestimmt. Die Aufheizzeit betrug 50 min. Die MW-Leistung entsprach 1,1 kW.

Tab. 17 Ergebnisse der Temperaturmessungen

Zeit [min]	im Stuck [°C]	0 cm [°C]	1 cm [°C]	3 cm [°C]	7 cm [°C]	14 cm [°C]	22 cm [°C]	32 cm [°C]	Kanal 0 [°C]	IR [°C]
1	20,4	20,8	21,2	22,1	22,1	22,9	19,0	22,4	19,1	
2	20,5	20,8	21,2	22,1	22,1	22,9	19,0	22,4	19,1	19,3
3	20,5	20,8	21,2	22,1	22,1	22,9	19,0	22,4	19,1	
4	20,4	20,8	21,2	22,1	22,1	22,9	19,0	22,4	19,1	
10	23,2	20,1	20,4	20,6	20,6	21,1	19,0	21,5	20,2	59,2
17	30,1	25,7	24,4	23,5	23,5	23,0	18,9	22,5	19,2	66,8
23	34,0	28,3	26,5	24,5	24,5	23,2	18,7	22,6	19,2	71,2
29	36,3	31,6	29,1	25,6	25,6	23,4	18,8	22,3	19,3	77,6
35	41,8	33,9	31,1	27,0	27,0	23,7	18,6	22,6	19,3	89,6
41	45,5	37,1	33,8	28,4	28,4	24,0	18,6	22,5	19,2	88,0
54	54,2	43,9	39,9	32,3	32,3	25,0	18,6	22,2	18,9	85,0
55	53,5	44,0	40,1	32,5	32,5	25,1	18,6	22,2	18,9	82,0
56	52,9	44,0	40,3	32,7	32,7	25,2	18,5	22,2	18,9	79,8
57	52,3	44,0	40,5	32,9	32,9	25,3	18,5	22,2	19,0	77,5
58	51,6	44,0	40,6	33,1	33,1	25,4	18,5	22,2	19,0	76,3
59	51,2	43,9	40,7	33,3	33,3	25,5	18,5	22,2	19,0	73,0
60	50,7	43,8	40,8	33,4	33,4	25,5	18,5	22,2	19,0	72,0
61	50,3	43,6	40,9	33,6	33,6	25,6	18,5	22,2	19,0	70,5
62	50,0	43,5	40,9	33,7	33,7	25,7	18,5	22,2	19,0	
63	49,5	43,4	40,9	33,9	33,9	25,7	18,5	22,2	19,1	
64	49,0	43,2	40,9	34,0	34,0	25,8	18,5	22,2	19,1	
65	48,5	43,1	40,9	34,2	34,2	25,9	18,5	22,2	19,1	
66	48,1	42,9	40,9	34,3	34,3	26,0	18,5	22,2	19,1	
67	47,6	42,7	40,9	34,4	34,4	26,0	18,4	22,2	19,1	
68	47,3	42,6	40,8	34,6	34,6	26,1	18,4	22,2	19,1	59,0
69	47,1	42,4	40,8	34,7	34,7	26,2	18,5	22,2	19,1	
70	46,7	42,2	40,8	34,9	34,9	26,2	18,5	22,2	19,1	
71	46,4	42,0	40,7	35,0	35,0	26,3	18,5	22,2	19,0	
72	46,0	41,9	40,6	35,1	35,1	26,4	18,4	22,2	19,0	
73	45,6	41,7	40,6	35,2	35,2	26,4	18,4	22,2	19,0	54,0
74	45,4	41,5	40,5	35,3	35,3	26,5	18,4	22,2	19,0	
75	45,0	41,3	40,4	35,4	35,4	26,6	18,4	22,2	19,0	
76	44,7	41,2	40,3	35,5	35,5	26,6	18,4	22,2	19,1	
77	44,3	41,0	40,2	35,5	35,5	26,7	18,4	22,2	19,1	
78	44,0	40,8	40,1	35,6	35,6	26,7	18,4	22,2	19,1	50,0
79	43,8	40,6	40,0	35,7	35,7	26,8	18,4	22,2	19,1	
80	43,6	40,4	39,9	35,7	35,7	26,8	18,4	22,2	19,0	
81	43,3	40,3	39,8	35,8	35,8	26,9	18,3	22,2	19,0	
82	43,0	40,1	39,7	35,9	35,9	27,0	18,4	22,3	19,0	
83	42,7	39,9	39,6	35,9	35,9	27,0	18,3	22,3	19,0	46,0
84	42,5	39,7	39,5	36,0	36,0	27,1	18,3	22,3	19,0	
85	42,2	39,6	39,4	36,0	36,0	27,1	18,3	22,3	18,9	
86	41,9	39,4	39,3	36,1	36,1	27,2	18,3	22,3	18,9	
87	41,7	39,3	39,2	36,1	36,1	27,3	18,4	22,3	18,9	
88	41,5	39,1	39,1	36,1	36,1	27,3	18,3	22,3	18,9	44,0
89	41,3	38,9	39,0	36,2	36,2	27,4	18,3	22,3	18,9	
90	41,1	38,7	38,8	36,2	36,2	27,4	18,3	22,3	18,9	
91	40,9	38,6	38,7	36,2	36,2	27,5	18,3	22,3	18,9	
92	40,7	38,4	38,6	36,2	36,2	27,5	18,3	22,2	19,0	
93	40,6	38,2	38,5	36,2	36,2	27,6	18,2	22,2	19,0	41,4
94	40,3	38,1	38,3	36,2	36,2	27,6	18,2	22,2	19,1	
95	40,1	37,9	38,2	36,2	36,2	27,6	18,2	22,2	19,1	
96	40,1	37,8	38,1	36,2	36,2	27,7	18,2	22,2	19,1	
97	39,9	37,6	38,0	36,2	36,2	27,7	18,2	22,2	19,2	
98	39,7	37,5	37,9	36,2	36,2	27,8	18,2	22,3	19,2	39,7
99	39,5	37,3	37,7	36,2	36,2	27,8	18,2	22,2	19,2	
100	39,1	37,2	37,6	36,1	36,1	27,8	18,2	22,2	19,2	
101	38,8	37,0	37,5	36,2	36,2	27,9	18,2	22,3	19,3	
102	38,7	36,9	37,4	36,1	36,1	27,9	18,2	22,3	19,2	
103	38,6	36,7	37,3	36,1	36,1	28,0	18,2	22,3	19,2	38,7
104	38,5	36,6	37,2	36,1	36,1	28,0	18,2	22,3	19,2	
105	38,3	36,5	37,0	36,1	36,1	28,0	18,2	22,3	19,3	
106	38,2	36,3	36,9	36,1	36,1	28,1	18,2	22,3	19,3	
107	38,0	36,2	36,8	36,0	36,0	28,1	18,2	22,3	19,3	
108	37,9	36,1	36,7	36,0	36,0	28,2	18,2	22,3	19,3	37,0
109	37,7	35,9	36,6	35,9	35,9	28,2	18,2	22,3	19,3	
110	37,6	35,8	36,5	35,9	35,9	28,2	18,2	22,3	19,4	
111	37,3	35,7	36,3	35,9	35,9	28,2	18,2	22,4	19,4	
112	37,1	35,6	36,2	35,8	35,8	28,2	18,2	22,4	19,4	
113	37,0	35,4	36,1	35,8	35,8	28,3	18,2	22,4	19,4	
114	36,8	35,3	36,0	35,8	35,8	28,3	18,2	22,4	19,4	35,5
115	36,6	35,2	35,9	35,7	35,7	28,3	18,2	22,4	19,4	
116	36,5	35,0	35,8	35,6	35,6	28,3	18,1	22,4	19,4	
117	36,3	34,9	35,7	35,6	35,6	28,3	18,1	22,4	19,5	
118	36,0	34,8	35,6	35,5	35,5	28,3	18,1	22,4	19,5	34,4
119	35,9	34,7	35,5	35,5	35,5	28,4	18,1	22,4	19,5	
120	35,8	34,5	35,3	35,4	35,4	28,4	18,1	22,4	19,5	
121	35,6	34,4	35,2	35,4	35,4	28,4	18,1	22,4	19,5	
122	35,5	34,3	35,1	35,3	35,3	28,4	18,1	22,4	19,5	
123	35,4	34,2	35,0	35,3	35,3	28,4	18,1	22,4	19,6	33,5
124	35,3	34,1	34,9	35,2	35,2	28,4	18,1	22,4	19,6	
125	35,2	34,0	34,8	35,2	35,2	28,4	18,1	22,4	19,6	
126	35,1	33,9	34,7	35,1	35,1	28,5	18,1	22,4	19,6	
127	35,0	33,8	34,6	35,1	35,1	28,5	18,1	22,5	19,6	
128	34,8	33,7	34,5	35,0	35,0	28,5	18,1	22,5	19,6	32,9
129	34,6	33,6	34,4	34,9	34,9	28,5	18,1	22,5	19,6	
130	34,6	33,5	34,3	34,9	34,9	28,5	18,1	22,5	19,6	
131	34,5	33,3	34,2	34,8	34,8	28,5	18,1	22,5	19,6	
132	34,3	33,2	34,1	34,7	34,7	28,5	18,1	22,5	19,7	
133	34,2	33,3	34,0	34,8	34,8	28,5	18,1	22,4	19,7	31,5
134	34,2	33,3	33,9	34,8	34,8	28,6	18,2	22,3	19,7	
135	34,2	33,2	33,8	34,8	34,8	28,6	18,3	22,3	19,7	
136	34,0	33,0	33,7	34,8	34,8	28,5	18,1	22,4	19,7	
137	33,8	32,8	33,6	34,4	34,4	28,5	18,1	22,5	19,7	
138	33,8	32,7	33,5	34,4	34,4	28,6	18,2	22,4	19,7	
139	33,6	32,6	33,4	34,3	34,3	28,6	18,2	22,4	19,7	30,9
140	33,4	32,5	33,3	34,2	34,2	28,5	18,1	22,5	19,7	
141	33,2	32,4	33,2	34,1	34,1	28,5	18,1	22,6	19,7	
142	33,1	32,3	33,1	34,1	34,1	28,5	18,1	22,6	19,6	
143	33,0	32,2	33,0	34,0	34,0	28,5	18,1	22,6	19,6	
144	32,9	32,1	33,0	33,9	33,9	28,5	18,1	22,6	19,6	
145	32,8	32,0	32,9	33,9	33,9	28,5	18,1	22,6	19,6	30,2
146	32,7	31,9	32,8	33,8	33,8	28,5	18,0	22,6	19,5	
147	32,6	31,8	32,7	33,7	33,7	28,5	18,0	22,6	19,5	
148	32,5	31,7	32,6	33,7	33,7	28,5	18,0	22,6	19,5	
149	32,4	31,7	32,5	33,7	33,7	28,5	18,0	22,6	19,5	
150	32,4	31,8	32,5	33,8	33,8	28,5	18,2	22,3	19,5	
151	32,4	31,7	32,4	33,7	33,7	28,5	18,3	22,2	19,5	
152	32,3	31,6	32,3	33,6	33,6	28,5	18,3	22,2	19,5	
153	32,2	31,6	32,2	33,6	33,6	28,5	18,3	22,1	19,6	29,2
154	32,1	31,5	32,1	33,6	33,6	28,5	18,3	22,1	19,6	
155	31,9	31,4	32,1	33,5	33,5	28,5	18,3	22,2	19,6	
156	31,7	31,3	32,0	33,4	33,4	28,5	18,3	22,2	19,6	28,5
157	31,6	31,2	31,9	33,4	33,4	28,5	18,3	22,1	19,6	
158	31,5	31,1	31,8	33,3	33,3	28,5	18,3	22,2	19,6	
159	31,4	31,0	31,7	33,2	33,2	28,4	18,3	22,2	19,6	
160	31,3	31,0	31,6	33,1	33,1	28,4	18,3	22,2	19,5	
161	31,3	30,9	31,6	33,1	33,1	28,4	18,3	22,2	19,5	28,4
162	31,1	30,8	31,5	33,0	33,0	28,4	18,3	22,2	19,5	
163	31,0	30,7	31,4	32,9	32,9	28,3	18,3	22,2	19,5	
164	30,9	30,6	31,3	32,9	32,9	28,3	18,3	22,2	19,5	
165										

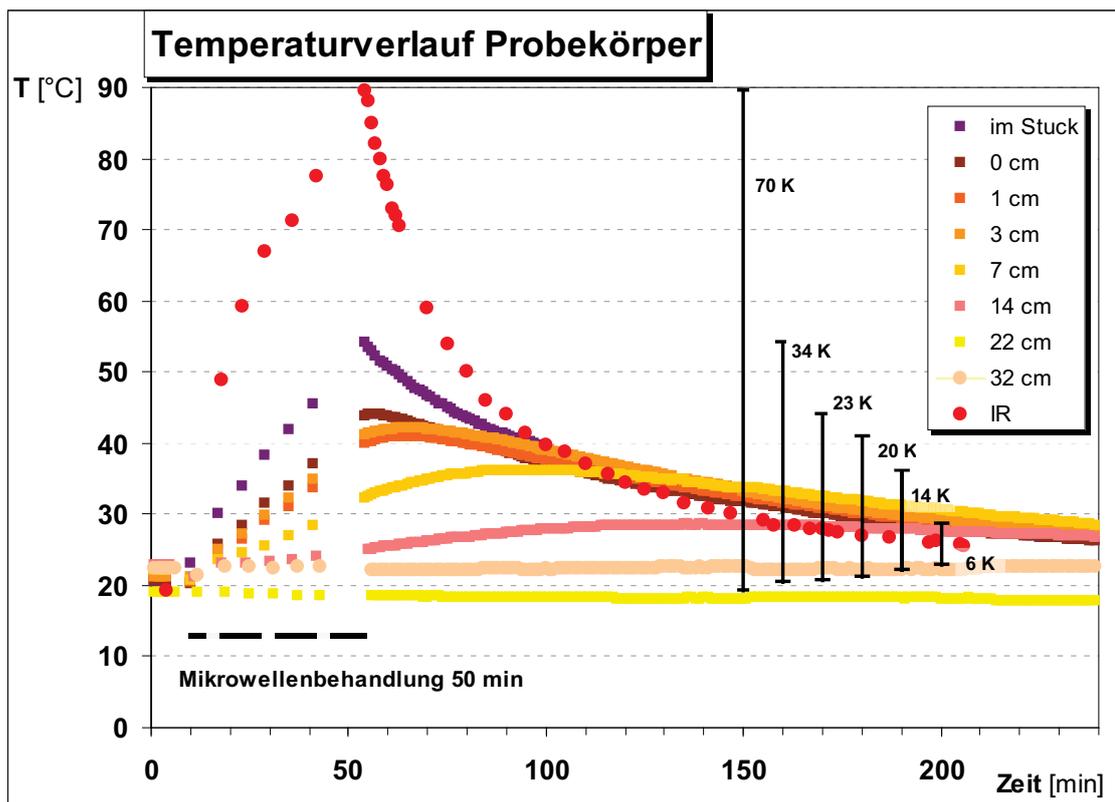


Abb. 92 Ergebnisse der Temperatursonden- und IR-Messungen, Temperaturentwicklung nach 50 Minuten MW-Behandlung und nachfolgende Abkühlphase

Es zeigt sich ein sehr interessantes Temperaturprofil im örtlichen und zeitlichen Verlauf. Während der 50 minütigen MW-Behandlung des Probekörpers steigt die Temperatur immer weiter an. An der Oberfläche ist der Temperaturanstieg am stärksten. Die laterale Temperaturverteilung kann im folgenden Kapitel 6.3.2 Infrarotthermographiemessungen gesehen werden. Am heißesten Punkt werden Temperaturen bis zu 90°C erreicht. Das entspricht einer Temperaturerhöhung von 70 K im Vergleich zum Ausgangszustand, im Diagramm durch einen vertikalen schwarzen Balken dargestellt.

Wenige Millimeter unter der Oberfläche sind die Temperaturen relativ dazu geringer aber signifikant. In der Stucklage selbst werden die Temperaturen bis zu maximal 34 K angehoben. An der Ziegeloberfläche sind es 23 K, die etwa ein Minute nach Abschalten der Strahlung erreicht werden. Bei 1 cm und 3 cm Tiefe werden etwa 20°C, mit einer Verzögerung von 7 Minuten und 8 Minuten gemessen. Deutlich ist der veränderte Kurvenverlauf im Diagramm erkennbar. Der Wärmeausgleich in das Material hinein ist dabei nachvollziehbar. In 7 cm werden eine Temperaturerhöhung um 14°C gemessen, die 35 Minuten nach Abschalten erreicht wird. Tiefer bei 14 cm Tiefe wird das Maximum 84 Minuten nach dem Abschalten, also mehr als zwei Stunden nach Versuchsbeginn mit einem Wert von 6 K erreicht. Tiefer sind keine Temperaturänderungen nachweisbar.

### 6.3.2 Infrarotthermographiemessungen

In den Intervallen ohne MW-Strahlung wurde die Hornantenne abgenommen und Bestimmungen der Oberflächentemperatur mit einer IR-Kamera durchgeführt. Abb. 93 zeigt Ausschnitte aus den Aufnahmen. Die Abbildungen sind verzerrt, da die ursprünglichen Bilder entzerrt und auf den Probekörper referenziert wurden. Ein parallel laufendes Kooperationsprojekt mit der Firma fokus-GmbH Leipzig zur „Automatisierten IR-Thermografie und Deformationsanalyse“ machte es möglich, mit der Kartierungssoftware metigo Map komplexe Bildstapel von Thermographieaufnahmen zu entzerren.

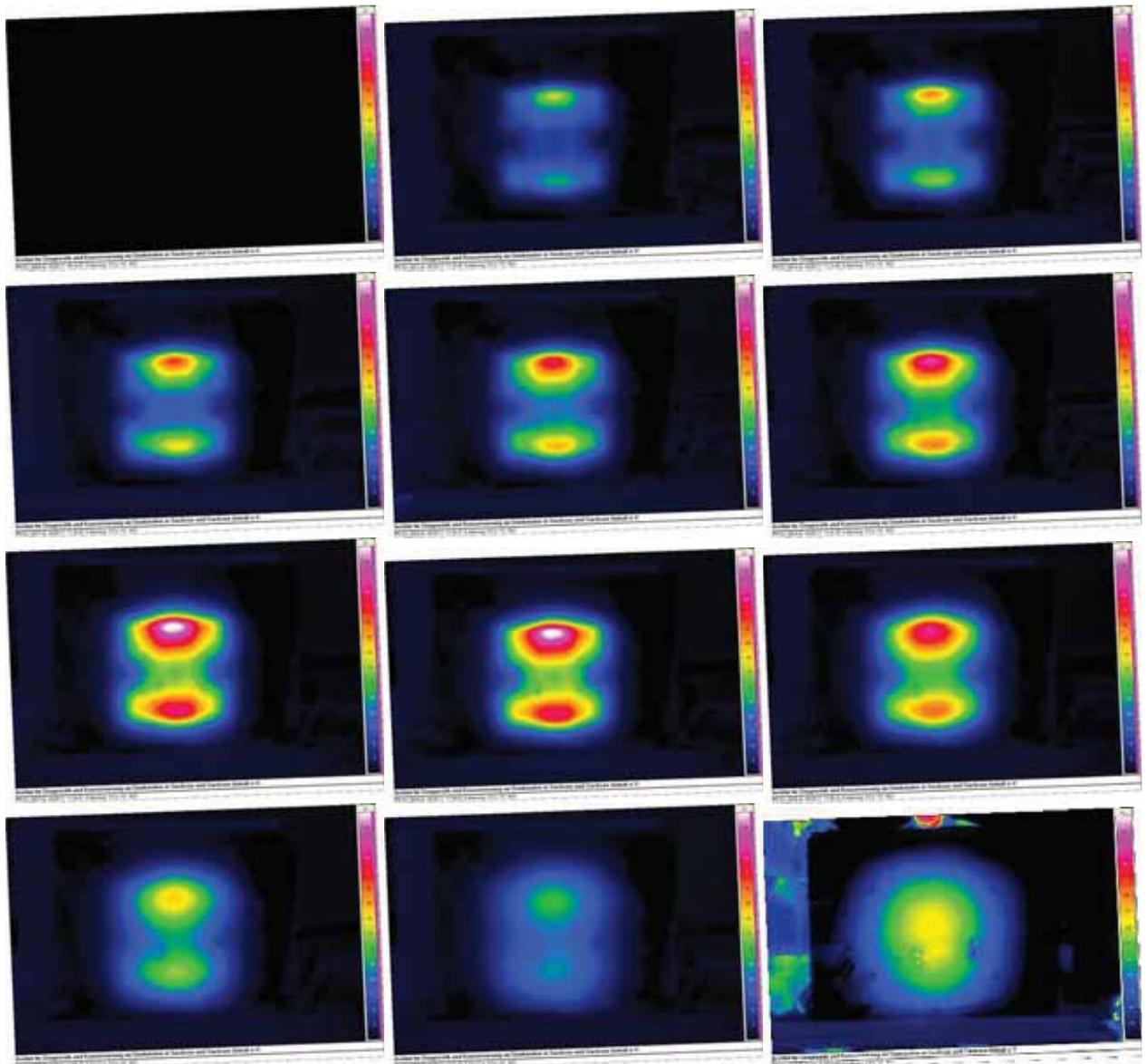


Abb. 93 Aufnahmesequenz der IR-Untersuchung, alle Messungen stellen die Differenz zu einem Ausgangszustand dar, letztes Bild = Referenzbild für die Entzerrung

Die mit der IR-Kamera aufgezeichnete Oberflächentemperatur ist ungleichmäßig verteilt an der Probekörperoberfläche und zeigt vorwiegend zwei Zentren. Das entstehende Temperaturverteilungsbild ähnelt einer ‚8‘ (Abb. 95).



Abb. 94 Gipsstückprobekörper

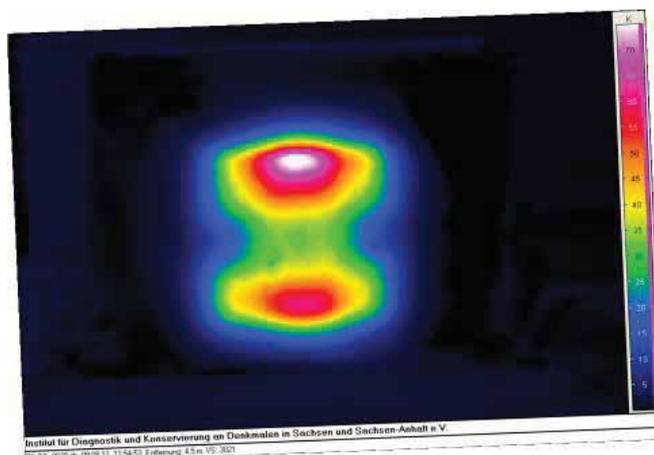


Abb. 95 IR-Oberflächentemperaturverteilung entzerrte Darstellung

Der Temperaturunterschied zwischen diesen unterschiedlich aufgeheizten Bereichen ist hoch, was wiederum auf Grund unterschiedlicher Wärmedehnung zu Spannungen im Material führen kann. Es werden lokal Temperaturen von ca. 90°C gemessen, die deutlich oberhalb der schon bei 60°C einsetzenden Gips Entwässerung liegen. Diese erste Entwässerung von Gips ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) ist mit der Phasenumwandlung zu  $\beta$ -Halbhydrat ( $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) verbunden.

### 6.3.3 Feuchteuntersuchungen vor und nach der MW-Behandlung

Für vergleichende Feuchteuntersuchungen vor und nach der Mikrowellenbehandlung wurden im Probekörper insgesamt 5 Tiefenprofile mit bis zu 15 Tiefenstufen angelegt, Bohrmehlproben entnommen und die Darrfeuchte bestimmt. Dabei wurden Ziegel- und Fugenbereich beprobt, sowie der Punkt mit der höchsten gemessenen Oberflächentemperatur (Hotspot mit ca. 95 °C) nachbeprob. Die Abb. 96 dokumentiert die Probenahmepunkte, Abb. 97 die Probenahme.

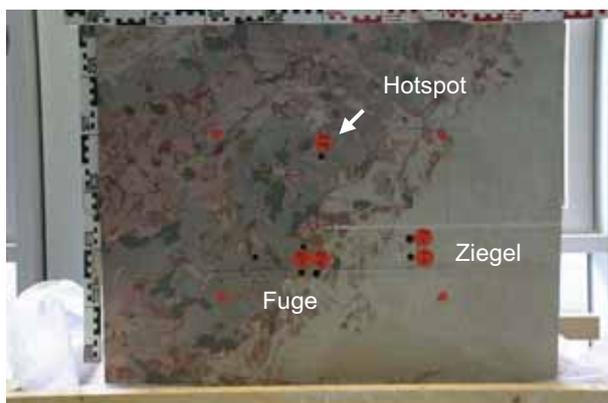


Abb. 96 Gipsstückprobekörper, Probenahmepunkte zur Feuchteverteilung vor und nach dem MW-Versuch

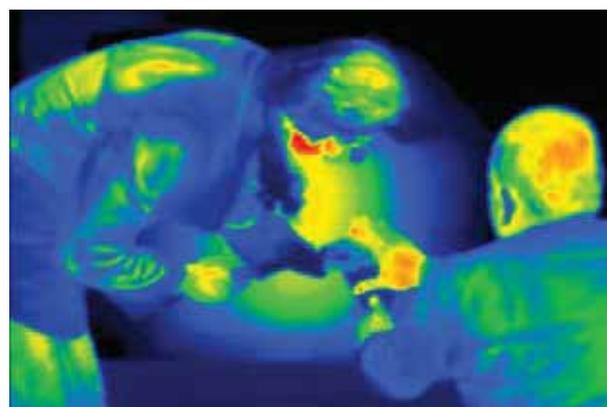


Abb. 97 Entnahme von Bohrmehlproben vor und nach der MW-Behandlung

Die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen vor und nach der MW-Behandlung sind in nachfolgenden Tabellen Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20 angegeben und in den Abbildungen Abb. 98, Abb. 99 und Abb. 100 graphisch dargestellt.

Tab. 18 Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen vor und nach der MW-Behandlung im Ziegel

Probe	Entnahmetiefe	Feuchte Voruntersuchung [Ma.-%]	Feuchte Nachuntersuchung [Ma.-%]	Feuchte (Differenz) [M. %]
P_TP1_1_1G	P_VTP1_1/1Gips	6,88	7,4	-0,52
P_TP1_1/1	1-2cm	8,66	8,42	0,24
P_TP1_1/2	2-4cm	15,14	12,71	2,43
P_TP1_1/3	4-6cm	19,52	18,13	1,39
P_TP1_1/4	6-8cm	20,97	18,57	2,4
P_TP1_1/5	8-10cm	19,12	19,15	-0,03
P_TP1_1/6	10-12cm	19,9	18,9	1
P_TP1_1/7	12-14cm	16,06	16,39	-0,33
P_TP1_1/8	14-16cm	14,23	17,86	-3,63
P_TP1_1/9	16-18cm	17,94	17,86	0,08
P_TP1_1/10	18-20cm	19,66	25,27	-5,61
P_TP1_1/11	20-22cm	17,71	16,77	0,94
P_TP1_1/12	22-24cm	17,78	17,15	0,63
P_TP1_1/13	24-26cm	17,24	17,78	-0,54
P_TP1_1/14	26-28cm	16,37	11,57	4,8
P_TP1_1/15	28-30cm	17,08	10,52	6,56

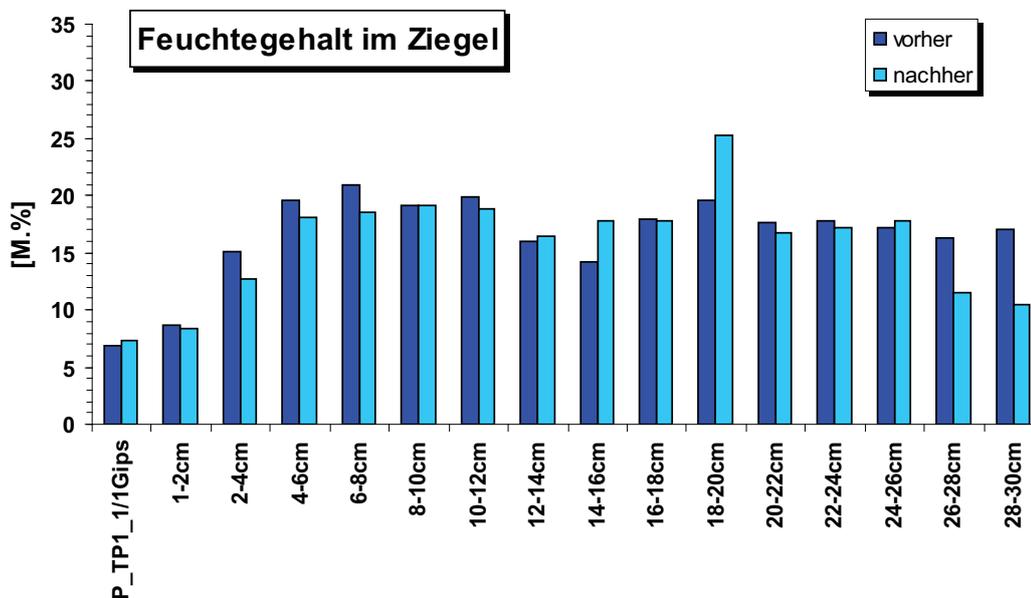


Abb. 98 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen im Ziegel

Tab. 19 Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen vor und nach der MW-Behandlung in der Fuge

Probe	Entnahmetiefe	Feuchte Voruntersuchung	Feuchte Nachuntersuchung	Feuchte (Differenz)
		[Ma.-%]	[Ma.-%]	[M. %]
P_TP1_2/1	P_VTP1_2/1, 0-1cm	10,1	7,52	2,58
P_TP1_2/2	1-2cm	16,73	13,32	3,41
P_TP1_2/3	2-4cm	15,5	17,27	-1,77
P_TP1_2/4	4-6cm	14,78	14,58	0,2
P_TP1_2/5	6-8cm	15,71	14,06	1,65
P_TP1_2/6	8-10cm	16,65	13,22	3,43
P_TP1_2/7	10-12cm	17,4	14,37	3,03
P_TP1_2/8	12-14cm	17,59	15,1	2,49
P_TP1_2/9	14-16cm	16,29	15,68	0,61
P_TP1_2/10	16-18cm	16,58	14,92	1,66
P_TP1_2/11	18-20cm	16,13	17,35	-1,22
P_TP1_2/12	20-22cm	14,51	16,63	-2,12
P_TP1_2/13	22-24cm	14,81	14,64	0,17
P_TP1_2/14	24-26cm	14,35	16,71	-2,36
P_TP1_2/15	26-28cm		14,87	

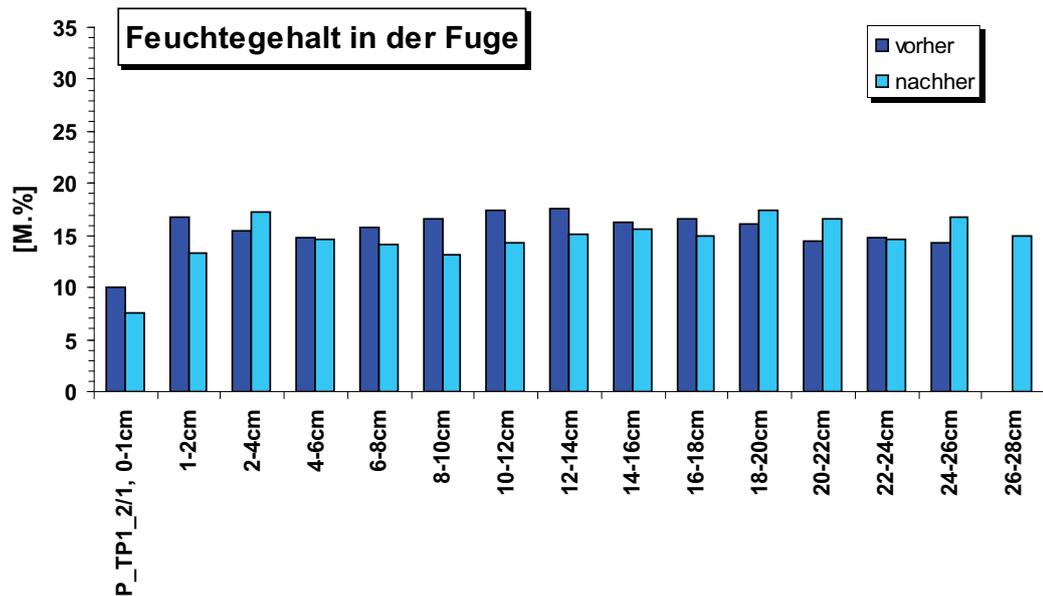


Abb. 99 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen in der Fuge

Tab. 20 Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen nach der MW-Behandlung am heißesten Punkt

Probe	Entnahmetiefe	Feuchte Voruntersuchung	Feuchte Nachuntersuchung
		[Ma.-%]	[Ma.-%]
P_NTP2_1/1	P_VundN_TP2_2/1, 0-1cm	nb	8,62
P_NTP2_1/2	1-2cm	nb	12,78
P_NTP2_1/3	2-4cm	nb	13,54
P_NTP2_1/4	4-6cm	nb	13,99
P_NTP2_1/5	6-8cm	nb	13,25
P_NTP2_1/6	8-10cm	nb	13,92
P_NTP2_1/7	10-12cm	nb	13,07
P_NTP2_1/8	12-14cm	nb	15,72
P_NTP2_1/9	14-16cm	nb	15,31
P_NTP2_1/10	16-18cm	nb	13,34
P_NTP2_1/11	18-20cm	nb	15,16
P_NTP2_1/12	20-22cm	nb	14,47
P_NTP2_1/13	22-24cm	nb	15,82

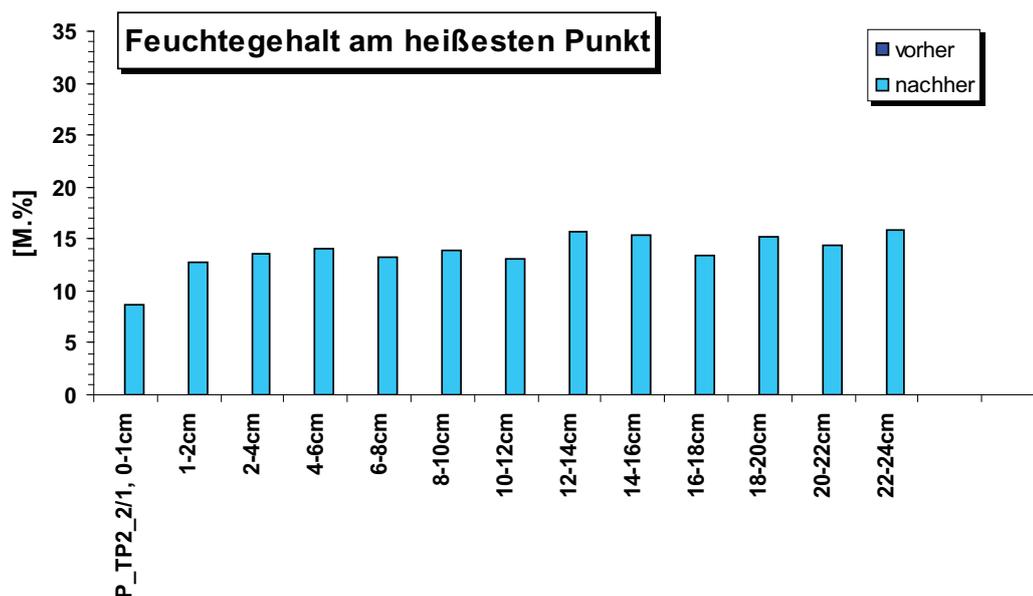


Abb. 100 Feuchteverteilung, Vor- und Nachuntersuchungen im Bereich des Hotspots

Bei den ersten zwei Tiefenprofilen werden die Profilverläufe der Voruntersuchungen bei der Nachbeprobung im Verlauf abgebildet. Die Tiefenprofile zeigen im Trend eine Umverteilung der Feuchte an. Es ist keine deutliche Reduzierung der Feuchte nachweisbar. Auch das Tiefenprofil am Hotspot zeigt einen Verlauf, der mit den Profilverläufen der anderen Voruntersuchungen gut übereinstimmt.

#### 6.4 Ergebnisse der Untersuchungen am Gipsstuck

Durch die Bewässerung des Probekörpers wurde ein Teil der abschließenden Versiegelung und die Politurschicht aus der Gipsstuckoberfläche herausgelöst. Dies wird durch eine haptisch rauhe Oberfläche nachweisbar. Zusätzlich führt die Mikrowellenbehandlung zu einer deutlichen Öffnung der Poren und damit zu einer Steigerung der Wasseraufnahme. Lösliche Salze kristallisieren durch die starke punktuelle Hitzeeinwirkung schlagartig aus. Die Gipsstuckoberfläche zeigt nach der Mikrowellenbehandlung erhabene weiße Punkte.

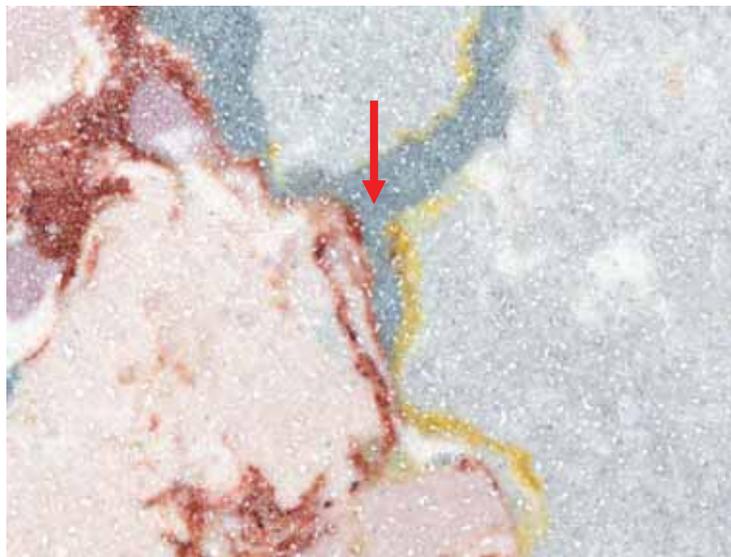


Abb. 101 Gipsstuckprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Oberfläche mit erhabenen weißen Punkten im abschließenden Arbeitsgang versiegelte Poren im Gipsstuck, Material tritt nach MW-Behandlung aus

Nach der Mikrowellenbehandlung wurde der Probekörper beprobt und die Proben makroskopisch und mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Die Beprobung erfolgte in einem Bereich des Probekörpers, in dem während der Mikrowellenbehandlung die höchste Oberflächentemperatur (Hotspot) mit der IR-Kamera gemessen wurde. Vergleichend wurde der unbehandelte Bereich beprobt und die Untersuchungsergebnisse beider Proben miteinander verglichen. Die Probenahme wird in den Abb. 102 und Abb. 103 dokumentiert. Nach Abschluss der MW-Behandlung wurde im Bereich des Hotspots ein Riss sichtbar, der deutlich in der Scanaufnahme sichtbar wird. Nähere Untersuchungen der Probe mittels Lupe zeigten weitere, kleinere Risse. Des Weiteren wurde das Gefüge des Gipsstucks einer ESEM-Untersuchung unterzogen.



Abb. 102 Gipsstuckprobekörper nach Mikrowellenbehandlung: Probenahmepunkte zur Feuchteverteilung vor und nach dem MW-Versuch



Abb. 103 Gipsstuckprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Beprobung der Oberfläche zur weiteren Untersuchung

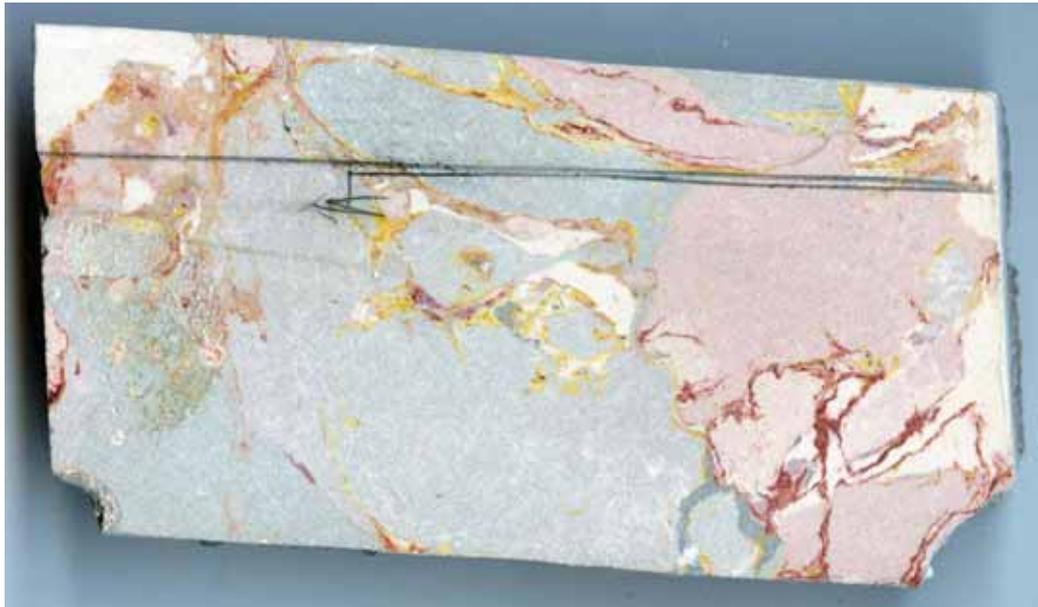


Abb. 104 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, beprobter Bereich mit deutlich sichtbarem Riss auf der Oberfläche

#### 6.4.1 ESEM-Untersuchungen

Nach der MW-Behandlung wurden feine Mikrorisse auf der Gipsstückoberfläche beobachtet. Die Gipsstückoberfläche wurde im Bereich der Risse unterbeprob und für ESEM-Untersuchungen präpariert (Abb. 105). Unter dem Rasterelektronenmikroskop wird ein sehr gut verzahntes, feinkristallines, dichtes Gefüge sichtbar (Abb. 106 bis Abb. 110). Die kurzprismatischen Kristalle sind charakteristisch (Abb. 110). Das Mikrogefüge durchlaufen in verschiedenen Richtungen weitere sehr feine Risse (weiße Pfeile in Abb. 106). Diese Risse wurden überall im Mikrogefüge gefunden. Dagegen fanden sich im unbehandelten Gipsstück keine Mikrorisse.



Abb. 105 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Unterbeprobung der Gipsstückprobe im Rissbereich für die ESEM-Analyse, Im Bild: Gipsstück (unten) mit Putzuntergrund (oben)

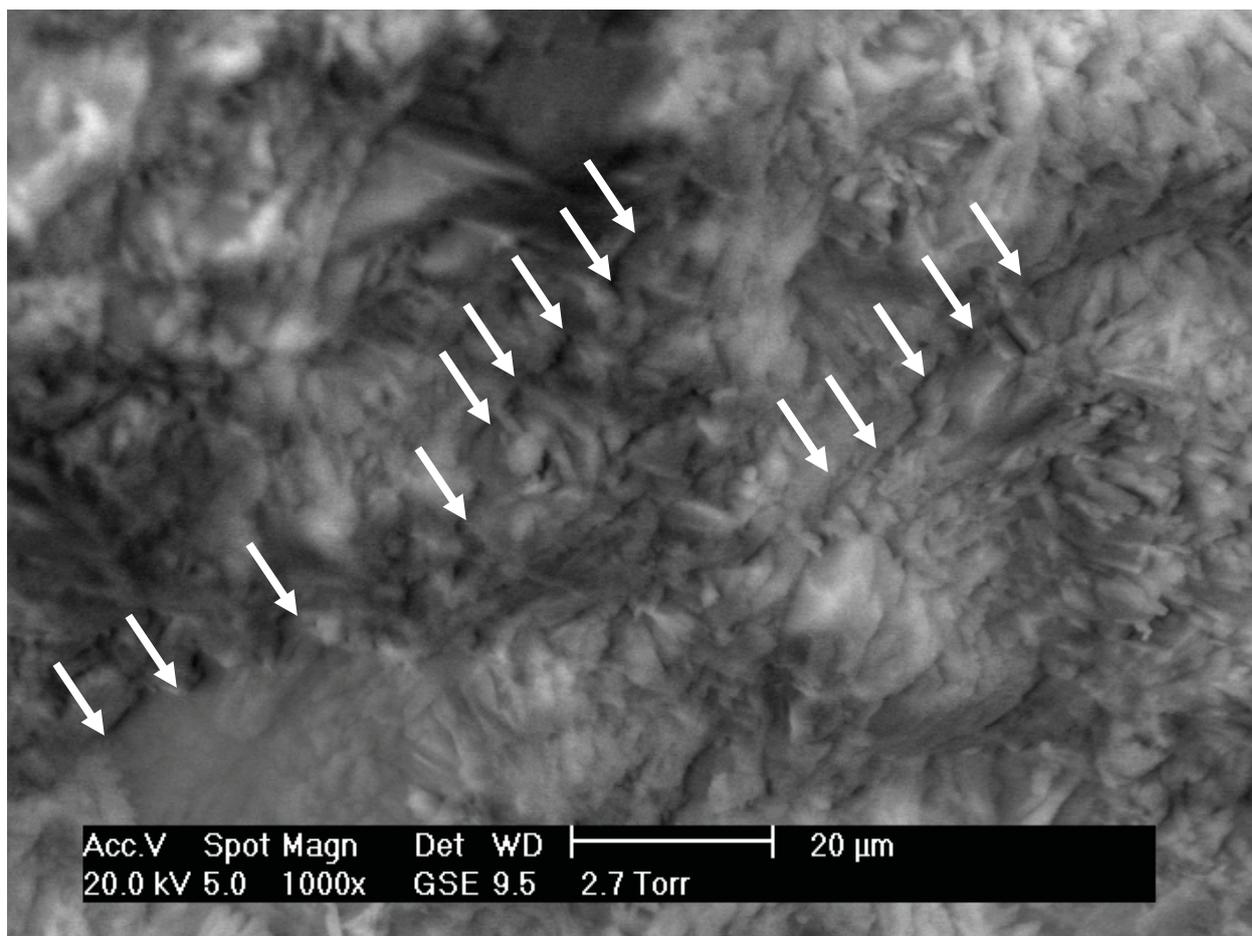


Abb. 106 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Bruchstelle, ESEM-Aufnahme: Die Pfeile verdeutlichen den Rissverlauf im Gipsstück.

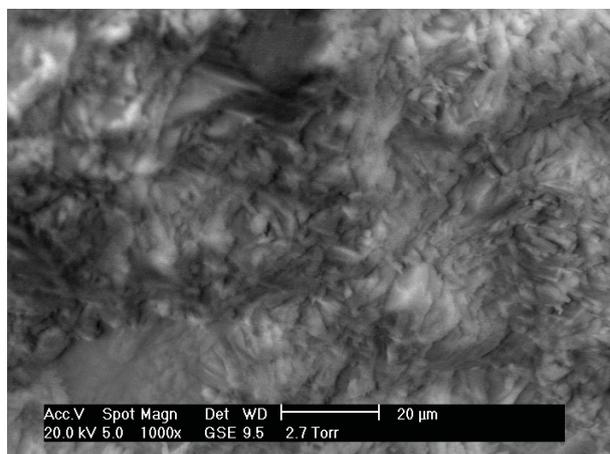


Abb. 107 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Bruchstelle, ESEM-Aufnahme: gut verfilztes Gipsgefüge mit Rissen

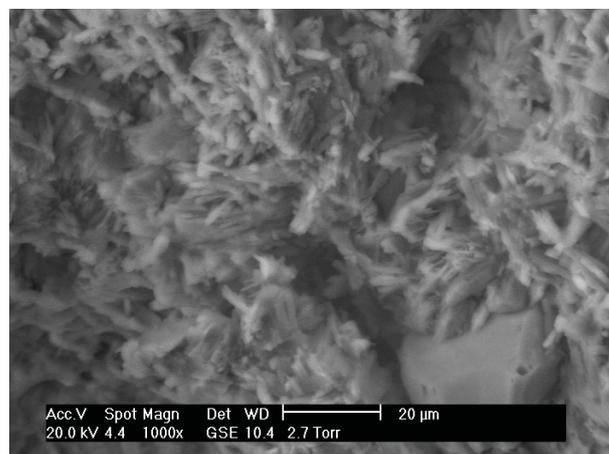


Abb. 108 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellenbehandlung, Bruchstelle, ESEM-Aufnahme: gut verfilztes Gipsgefüge mit Rissen

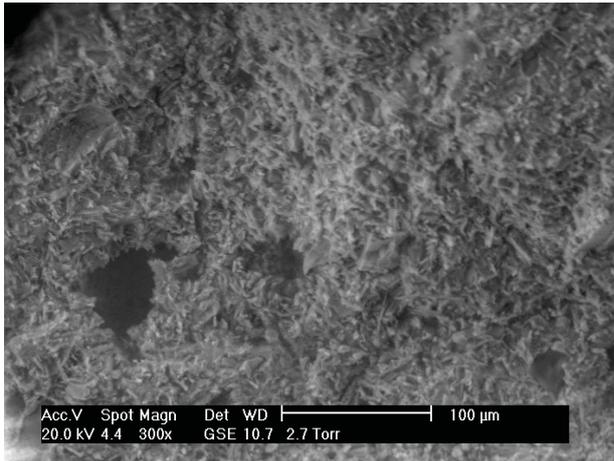


Abb. 109 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellen-  
behandlung, Bruchstelle, ESEM-Aufnahme: gut  
verfilztes Gipsgefüge mit Rissen

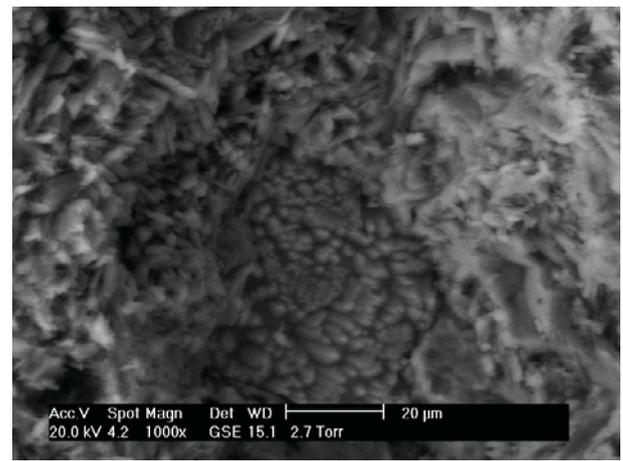


Abb. 110 Gipsstückprobekörper nach der Mikrowellen-  
behandlung, Bruchstelle, ESEM-Aufnahme:  
Gipsgefüge gut verfilzt, Vergrößerung aus  
Abb. 109

#### 6.4.2 Feststellungen an der Probeplatte

Auch an der Probeplatte wurde die ungleichmäßige Verteilung der Oberflächentemperatur festgestellt. In der Infrarotthermographieaufnahme in Abb. 111 ist deutlich auf der rechten Seite ein Temperaturmaximum zu erkennen. Schon während der Aufheizung ließ sich hier erkennen, dass die Temperatur höher war (Abb. 112). Im linken Teil ist ein Zentrum nicht noch stark ausgeprägt. Dennoch lässt die Form einer liegenden "8" in etwa nachvollziehen. Es ist zu beachten, dass im Vergleich zum vorhergehenden Versuch am Probekörper die Antenne um 90° gedreht aufgesetzt wurde.

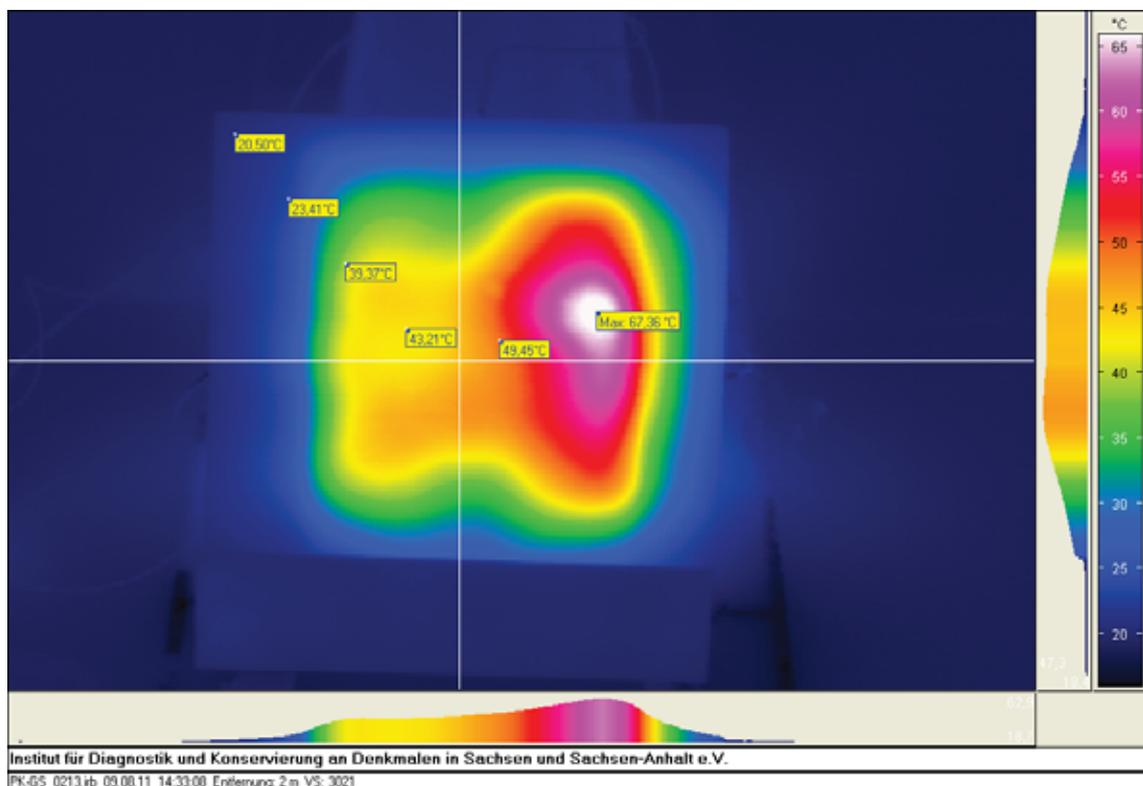


Abb. 111 Verteilung der Oberflächentemperaturen, IR-Bild der gemessenen Temperaturen, rechts und unten Profil-  
schnitte.

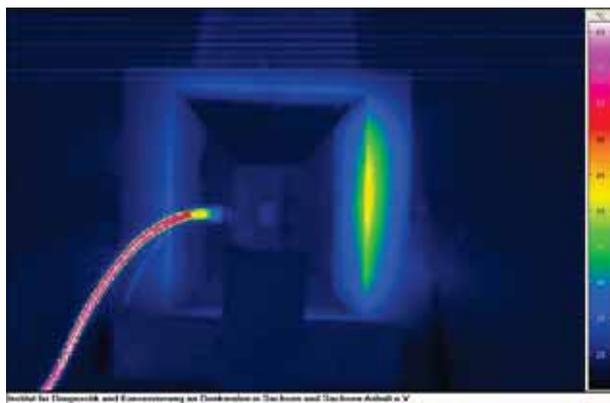


Abb. 112 IR-Aufnahme aus dem Versuch, Ausbreitung der Temperaturen rechts von der Antenne



Abb. 113 Riss



Abb. 114 Riss



Abb. 115 Risse

Kurz nach Beendigung der Aufheizung wurde die Antenne abgenommen, die IR-Untersuchung durchgeführt und mit bloßem Auge die Oberfläche betrachtet. Dabei konnte im Zeitraum von Minuten eine Rissbildung in der Platte beobachtet werden. Im weißen Bereich verläuft der Riss etwa durch die Mitte. Im marmorierten Bereich lief die Rissbildung entlang der farb- und strukturegebenden Anteile (Abb. 113, Abb. 114, Abb. 115).

## 6.5 Diskussion der Probekörperergebnisse

Nach intensiven Untersuchungen einer experimentellen MW-Behandlung an einem stuckierten Mauerwerksprobekörper lassen sich die folgenden Aussagen zur Anwendung der Mikrowellentrocknung an Gipsstuck formulieren:

Die MW-Strahlung setzt an der Oberfläche des Festkörpers an, heizt diese am stärksten auf. Es kommt auf der von der Hornantenne eingeschlossenen Oberfläche zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung mit lokal sehr hohen Oberflächentemperaturen. Der homogene Aufbau des Probekörpers widerlegt dabei die in einer vorhergehenden Untersuchung gemachten Annahme, dass die heterogene Temperaturverteilung durch das heterogene Mauerwerk verursacht wird (Zötzl & Franzen 2011 Bericht 45/2011). Es handelt sich eindeutig um einen Effekt der Antenne bei der Bündelung der Strahlung. Bei der gegebenen Geometrie kommt es zu einer Verstärkung und Fokussierung der Mikrowellenstrahlung auf zwei Bereiche. Daraus ergibt sich ein Temperaturverteilungsbild einer „8“.

Es kommt zu einer Ausbreitung der Temperaturen in den Probekörper. Wie viel Anteil der Temperaturerhöhungen durch Wärmetransport der hohen und über die 50 Min. gesteigerten Oberflächentemperaturen kommt und wie viel direkt durch das Eindringen von Mikrowellen in den Festkörper verursacht wird, sollte gegebenenfalls nachgerechnet werden.

Nach der 50 minütigen Behandlung können in einem stuckierten, sehr feuchten Ziegelmauerwerk in etwa 14 cm Tiefe Temperaturveränderungen nachgewiesen werden. Tiefen von mehr als 20 cm werden bei dem Versuch nicht erreicht.

Die beprobten Feuchtetiefenprofile aus dem Probekörper zeigen eine Umverteilung der Feuchte. Eine signifikante Reduzierung der Feuchte ist auf der Grundlage der Daten nicht interpretierbar. Der Abtransport der Feuchte aus dem Körper auch unter erhöhten Temperaturbedingungen bleibt dabei die Schwierigkeit. Der Feuchtetransport wird möglicherweise behindert durch den relativ dichten Gipsstuck. Eine „Feuchtestau“ direkt unterhalb der Gipsstuckebene, wie mündlich zeitweise andiskutiert, konnte nicht nachgewiesen werden.

Auf Grund der punktuell hohen Oberflächentemperaturen entstehen Spannungen, die zu einer Schädigung des Gipsstucks durch Risse führen. Das konnte mikroskopisch und an einer Probeplatte nachgewiesen werden.

## 6.6 Trocknungsversuch mit Radiowellen

Wissenschaftler des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig) erforschen gemeinsam, wie Radiowellen künftig zur Sanierung von Gebäuden eingesetzt werden können. Hierfür entwickelten Wissenschaftler des UFZ unter Leitung von Dr. Ulf Roland eine Radiofrequenz-Technologie, die ursprünglich im Bereich der Bodensanierung zum Einsatz kam und künftig möglicherweise für Trockenlegung, Schadstoffbeseitigung und Holzschutz in Gebäuden genutzt werden kann.

Das Projekt "Innovation durch Einsatz der Radiowellen-Technologie im Bauwesen" wird im Rahmen der Fördermaßnahme VIP (Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung) des Bundesforschungsministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

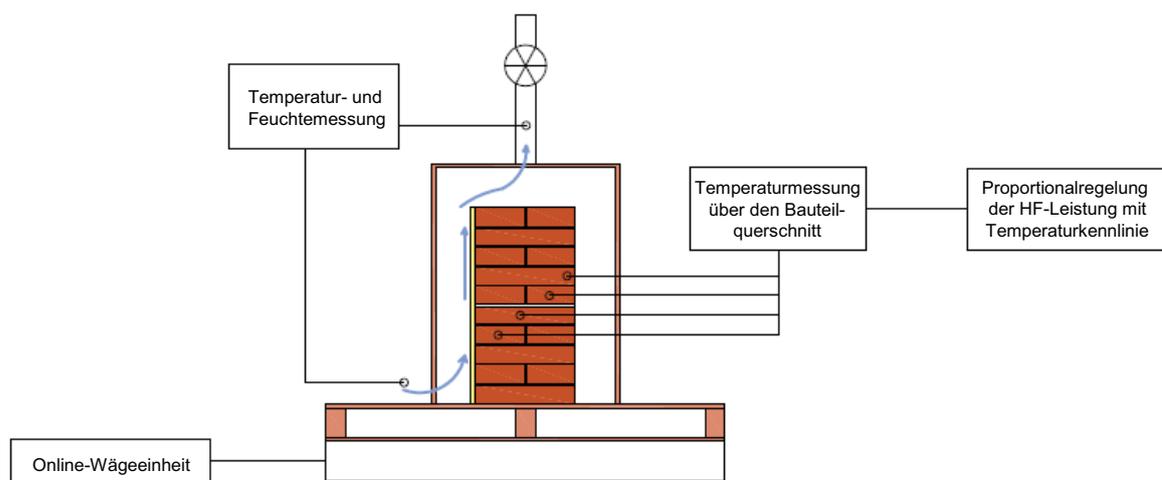
In einer Kooperation wird wurde der Mauerwerksprobekörper zu vergleichenden Untersuchungen an der HTWK mittels Radiowellen behandelt und die Abtrocknung beobachtet. Möglicherweise ergeben sich auch hier zukünftig innovative Ansätze der schonenden Bauwerkstrocknung am Denkmal. Auch bei den hochfrequenten Radiowellen sind erhöhte Sicherheitsvorkehrungen bei dem Einsatz zu beachten. Daher fand das Experiment an der HTWK in einer abgeschirmten Box statt. Darin konnte auch ein Geber-/Empfängersituation sowie eine Luftzirkulation gewährleistet werden. Für einen Einsatz vor Ort müssen daher noch verschiedene Entwicklungen umgesetzt werden. Die im Vergleich zu den Mikrowellen längerwelligen Radiowellen dringen tiefer in Mauerwerk ein, koppeln nicht am Wassermolekül an, sondern erwärmen den Festkörper insgesamt.

Auf den folgenden zwei Seiten werden die Ergebnisse von der dortigen Arbeitsgruppe dargestellt:

## **Erwärmung eines Mehrkomponenten-Probekörpers**

Die Einsatzmöglichkeiten des Radiowellen-Verfahrens werden gerade auch im Bereich der Denkmalpflege gesehen, wo häufig sensible Materialien kontrolliert und ohne mechanische Eingriffe erwärmt werden müssen. Im Rahmen eines Kontakts zum Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK, Herr Dr. Franzen) wurde ein Probekörper mit einer Stuckgipsschicht zur Verfügung gestellt, an dem bereits eine Mikrowellenbehandlung mit unbefriedigendem Erfolg durchgeführt worden war.

Es sollte untersucht werden, inwieweit durch Radiowellen eine kontrollierte Erwärmung bis ca. 45°C möglich ist, um den Wasseraustrag aus dem Mauerwerk zu beschleunigen. Hintergrund der Untersuchungen ist ein zu sanierender Flutschaden im Kloster Marienthal (Neißeregion, Ostritz). Den dortigen baulichen Gegebenheiten nachempfunden, bestand der Probekörper aus Ziegelmauerwerk, Putz und Stuckgips (gipsgebundener Kunstmarmor, mit Knochenleim angemachter, feingemahlener Alabaster-Modellgips), wobei letztere etwa 3 cm dicke Schicht die Zieltemperatur auf maximal 60°C (kurzzeitig) bzw. ca. 45°C limitierte.



**Abb.** Anordnung zur Radiowellen-gestützten Trocknung eines Verbundkörpers ( $L \times B \times H = 750 \times 600 \times 900 \text{ mm}^3$ ) mit Stuckgipsschicht, welche sich auf der linken Seite des Probekörpers (gelb markiert) befindet

Während der Untersuchungen zur thermisch unterstützten Trocknung befand sich der Probekörper in einer Einhausung mit kontrollierter Be- und Entlüftung (Abb.). An verschiedenen Stellen im Probekörper wurden insgesamt 36 faseroptische Temperatursensoren platziert, um die Temperatursteuerung über die Leitsystem-Software realisieren zu können. Steuergröße war dabei die Temperatur in der Stuckschicht. Der Wasseraustrag wurde sowohl gravimetrisch als auch über die Feuchtemessung im Gasstrom bilanziert. Die Versuche wurden an der HTWK

Leipzig durchgeführt, wobei die Mitarbeiter des UFZ experimentelle Unterstützung leisteten und sich an der Auswertung beteiligten.

Im stationären Betrieb wurden in den Stuck- und Putzschichten konstante Temperaturen von 39°C bzw. 42°C realisiert, während im übrigen Teil des Probekörpers ein Wert von ca. 60°C erreicht wurde. Ursache für diese Differenz ist der Wärmeverlust in der überströmten Oberflächenschicht. Somit konnte das sensible Stuckmaterial vor thermischer Zerstörung geschützt werden. Allerdings ist die materialspezifische Höchsttemperatur auch relativ gering, so dass der diffusive Wasseraustrag durch die Stuckschicht hindurch recht langsam erfolgt. Dies wurde durch Feuchtemessungen während des Versuches und im Anschluss an das Experiment bestätigt. Insgesamt kann jedoch eingeschätzt werden, dass die Radiowellen-Methode durchaus geeignet ist, kunsthistorisch wertvolle und komplexe Strukturen schonend zu trocknen.



## 7 Mikrowellenversuch an der Außenwand der Kapelle

Große Anteile dieses Kapitels sind in dem unveröffentlichten IDK-Bericht DD 47/2012 festgehalten. So konnten Zwischenergebnisse der Projektbeteiligten rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.

### 7.1 Einleitung Außenwandversuch

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal“ AZ 29378 wurden als abschließender Versuch eine Behandlung der feuchten Mauerbereiche der Kapelle von der Außenseite der Michaeliskapelle her durchgeführt. Es sollte der Vorschlag überprüft werden, die hohe Feuchte hinter dem Gipsstuck von der Außenseite der mächtigen historischen Mauer her, ohne Gefährdung für den Gipsstuck, zu reduzieren. An einer ausgewählten Stelle wurde eine Behandlung des Mauerwerks mit Mikrowellenstrahlung durch eine Fachfirma (bhd-GmbH Dresden) durchgeführt. Für die Untersuchung der Durchwärmung des mittels MW-Strahlung behandelten Wandbereiches wurden Temperaturen in unterschiedlichen Tiefen gemessen sowie die Oberflächentemperatur jeweils zum Abschluss der Behandlung, während des Umsetzens der Antenne erfasst. Für die Bewertung der Feuchteverteilung vor und nach dem MW-Versuch wurden Bohrmehlproben aus dem Mauerwerk entnommen und Feuchtebestimmungen durchgeführt. Während des gesamten Versuches wurden alle Oberflächentemperaturänderungen der Gipsstuckoberfläche auf der Innenseite des Mauerwerks der Kapelle erfasst. Der Bericht dokumentiert die Ergebnisse.



Abb. 116 Versuch der Mikrowellenbehandlung von der Außenseite der Kapelle

### 7.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte am 19. Juli 2012 über den ganzen Tag. Vorherige Termine mussten wegen schlechten Wetters abgesagt bzw. abgebrochen werden. Für die Behandlung eines Mauerwerks mit Mikrowellenstrahlung ist der Einsatz von Hochfrequenzgeneratoren notwendig. Wegen der dabei umgesetzten hohen elektrischen Leistungen ist aus Sicherheitsgründen besondere Vorsicht geboten. Ein Außeneinsatz bei Regen ist damit ausgeschlossen.

Für die Behandlung des Kapellenmauerwerks mit Mikrowellenstrahlung setzte die Fa. bhd Dresden zwei Generatoren MWA-LC1.1R der Schutzklasse 1 (Hersteller MTB Mittenwalde) ein. Die Geräteparameter waren wie folgt: Leistung: 1,1 kW (Stufe 9), Frequenz: 2,45 GHz. Die ersten zwei Behandlungen wurden bei Stufe 7 durchgeführt. Die Hornantennen hatten eine Öffnungsfläche von 25 x 30 cm, die Lufttemperatur lag bei ca. 23,6°C.



Abb. 117 Versuch an der Michaeliskapelle



Abb. 118 Versuchsaufbau



Abb. 119 Anordnung der Antennen



Abb. 120 Anordnung der Temperatursensoren

Es wurde eine Behandlungsstrecke von 1,6 m von oben nach unten abgearbeitet. Entlang der Behandlungsstrecke zwischen Fenstergewände und Pilaster (Abb. 121) war im Vorfeld der Außenputz entfernt worden. Es wurden je zwei Hornantennen gleichzeitig, hochkant untereinander angeordnet, aufgesetzt (Abb. 122). Über den Arbeitsverlauf wurde die Anordnung jeweils um eine halbe Antennenstellung nach unten versetzt. Die Aufheizzeit an jeder Stellung betrug je 30 Minuten. Wegen der etwas komplizierten und beengten Situation an der Mauer kam es bei manchen Antennenstellungen zum Teil nicht zum Aufliegen und zu vergrößerten Abständen zwischen Mauerwerk und Antenne. Der temperaturbemessene Teil wurde auf 1,3 m Höhe (Abb. 120, Abb. 124) so gewählt, dass insgesamt die ersten vier Antennenstellungen darüber hinwegzogen. Die folgenden Antennenstellungen lagen unterhalb. Im Umfeld der Temperaturmessungen wurden auch die Bohrmehlproben für die Feuchtebestimmungen vor und nach der Behandlung entnommen. Für die Oberflächentemperaturmessungen beim Umsetzen der Antennen stand eine handliche IR-Kamera, Trotec multiuse professional, Modell IC060 der Fa. bhk zur Verfügung. Die Fotos in den Abb. 117 bis Abb. 124 dokumentieren den Versuch und die Probenahmestellen.



Abb. 121 Außensituation



Abb. 122 Antennenstellung an der Außenwand



Abb. 123 Probenahmestellen



Abb. 124 Probenahmestellen, V = Voruntersuchung,  
N = Nachuntersuchung

Eine weitere Beschreibung des Versuchs ist in der Dokumentation der bhd-GmbH im Anhang zu finden.

### 7.3 Ergebnisse der Temperaturmessungen

Temperaturmessungen erfolgten auf unterschiedlichen Wegen. Zum einen wurden auf etwa 1,3 m Höhe drei gegen HF-Strahlung abgeschirmte Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen in das Mauerwerk eingebracht, dort den ganzen Tag belassen und in regelmäßigen Abständen abgelesen (Abb. 120, Tab. 21). Die Tiefenstufen der Sensoren lagen bei 5 cm, 15 cm und 40 cm. Auch wurde, wenn die Antennen umgesetzt wurden, von der Oberfläche mit einer IR-Kamera die Temperaturen erfasst und diese notiert. Kontinuierlich wurde auf der Innenseite des Mauerwerks, auf der Gipsstuckoberfläche, mit einer weiteren hochauflösenden IR-Kamera die Oberflächentemperatur erfasst. Zudem wurden die Klimasensoren, die an und in der gipsstuckgefassten Innenoberfläche angebracht waren, speziell für den Untersuchungszeitraum ausgewertet.

Tab. 21 Temperaturmessungen der Sonden, \*Differenzwert zum Anfangswert

Uhrzeit	10:45	10:47	10:50	11:00	11:05	11:10	11:15	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50	11:55	12:00	12:05	12:10	12:15
Zeit	0:00	0:02	0:05	0:15	0:20	0:25	0:30	0:40	0:45	0:50	0:55	1:00	1:05	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30
TS=5 cm	25	35,1	34,2	47,2	54,1	61,1	65,9	61,7	60,7	61,1	60,3	61,0	61,3	62,1	60,7	63,2	66,5	72,6
$\Delta T_5^*$	0	10,1	9,2	22,2	29,1	36,1	40,9	36,7	35,7	36,1	35,3	36,0	36,3	37,1	35,7	38,2	41,5	47,6
TS=10 cm	20,6	25,7	32,5	42,9	53,9	56,8	64,2	65,5	64,6	60,8	64,2	62,6	63,4	64,9	65,2	65,4	68,1	72,6
$\Delta T_{15}^*$	0	5,1	11,9	22,3	33,3	36,2	43,6	44,9	44	40,2	43,6	42,0	42,8	44,3	44,6	44,8	47,5	52,0
TS=40 cm	22,3	22,6	24,1	24,9	26,1	26,6	27,2	26,4	28,9	28,9	30,5	31,3	33,0	34,3	34,4	35,8	36,7	38,2
$\Delta T_{40}^*$	0	0,3	1,8	2,6	3,8	4,3	4,9	4,1	6,6	6,6	8,2	9,0	10,7	12,0	12,1	13,5	14,4	15,9

Tab. 21 Fortsetzung

Uhrzeit	12:20	12:25	12:30	12:40	12:45	12:50	12:55	13:00	13:05	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50	14:00	14:10	14:20	14:30
Zeit	1:35	1:40	1:45	1:55	2:00	2:05	2:10	2:15	2:20	2:25	2:35	2:45	2:55	3:05	3:15	3:25	3:35	3:45
TS=5 cm	75,1	77,2	79,6	74,6	79,2	83,2	86,8	89,8	92,4	94,2	85,2	77,9	72,1	67,0	62,0	59,6	55,7	53,1
$\Delta T_5^*$	50,1	52,2	54,6	49,6	54,2	58,2	61,8	64,8	67,4	69,2	60,2	52,9	47,1	42,0	37,0	34,6	30,7	28,1
TS=10 cm	74,4	76,3	78,6	76,3	77,5	81,9	85,8	90,3	95,6	96,3	90,1	84,1	79,2	74,6	69,6	67,4	63,6	61,0
$\Delta T_{15}^*$	53,8	55,7	58,0	55,7	56,9	61,3	65,2	69,7	75,0	75,7	69,5	63,5	58,6	54,0	49,0	46,8	43,0	40,4
TS=40 cm	38,7	39,8	40,2	39,6	41,5	42,7	43,4	44,3	44,9	45,5	44,1	43,8	43,4	42,6	41,7	41,3	40,1	40,9
$\Delta T_{40}^*$	16,4	17,5	17,9	17,3	19,2	20,4	21,1	22,0	22,6	23,2	21,8	21,5	21,1	20,3	19,4	19,0	17,8	18,6

Tab. 21 Fortsetzung

Uhrzeit	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20	16:30	16:40	16:50	17:00	17:10	17:20	17:30	17:50
Zeit	4:15	4:25	4:35	4:45	4:55	5:05	5:15	5:25	5:35	5:45	5:55	6:05	6:15	6:25	6:35	6:45	7:05
TS=5 cm	48,5	46,4	44,8	44,6	43,9	43,2	42,5	42,1	41,6	40,7	40,1	39,8	39,1	38,9	38,4	38,5	37,4
$\Delta T_5^*$	23,5	21,4	19,8	19,6	18,9	18,2	17,5	17,1	16,6	15,7	15,1	14,8	14,1	13,9	13,4	13,5	12,4
TS=10 cm	55,4	51,7	51,4	49,5	47,9	47,1	46,1	45,1	44,2	43,6	44,0	43,0	42,3	41,7	41,3	40,8	40,1
$\Delta T_{15}^*$	34,8	31,1	30,8	28,9	27,3	26,5	25,5	24,5	23,6	23,0	23,4	22,4	21,7	21,1	20,7	20,2	19,5
TS=40 cm	41,1	40,6	40,3	37,2	37,1	36,9	38,1	37,9	37,7	37,4	37,2	37,0	36,7	36,5	36,1	36,0	36,0
$\Delta T_{40}^*$	18,8	18,3	18,0	14,9	14,8	14,6	15,8	15,6	15,4	15,1	14,9	14,7	14,4	14,2	13,8	13,7	13,7

In Tab. 21 sind die notierten Temperaturwerte der drei im Mauerwerk befindlichen Temperatursensoren angegeben. Die Abb. 125 bis Abb. 128 stellen die Werte graphisch dar. Zudem werden in den Diagrammen die Versetzzeiten der Antennen angegeben. In den Temperaturstufen von 5 cm (Abb. 125) und 15 cm (Abb. 126) korrelieren diese gut mit den Steigungen der Temperaturänderungen und können so den Temperaturverlauf erklären.

Vor einer detaillierten Diskussion muss sich bewusst gemacht werden, dass die gemessenen Temperaturwerte einem Fehler unterliegen können, der wie bei den meisten Sensoren zumin-

dest bei  $\pm 2^\circ\text{C}$  liegen könnte. Daher sollte sich die Interpretation, insbesondere im Vergleich der Daten untereinander, auf Unterschiede in diesem Bereich stützen.

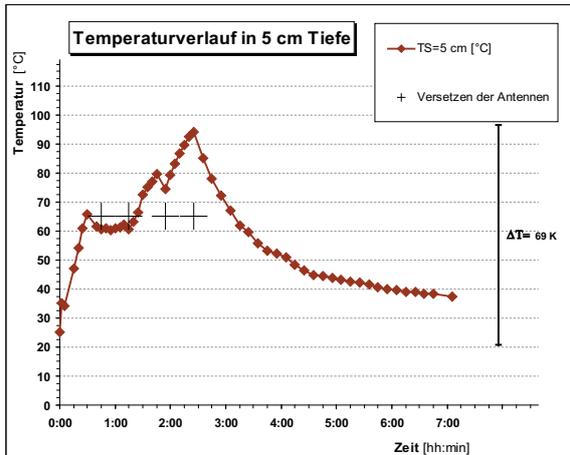


Abb. 125 Temperatur in 5 cm Tiefe während des Versuchs

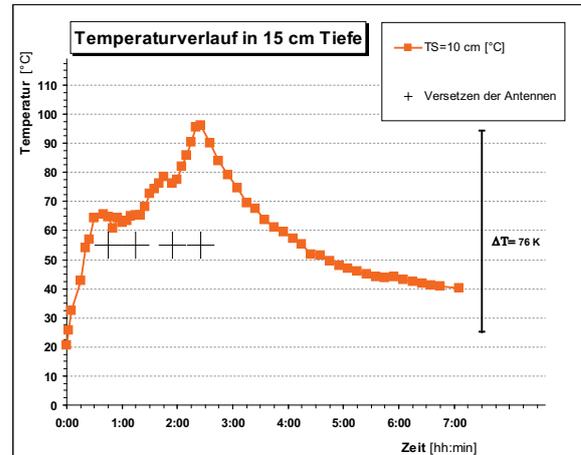


Abb. 126 Temperatur in 15 cm Tiefe während des Versuchs

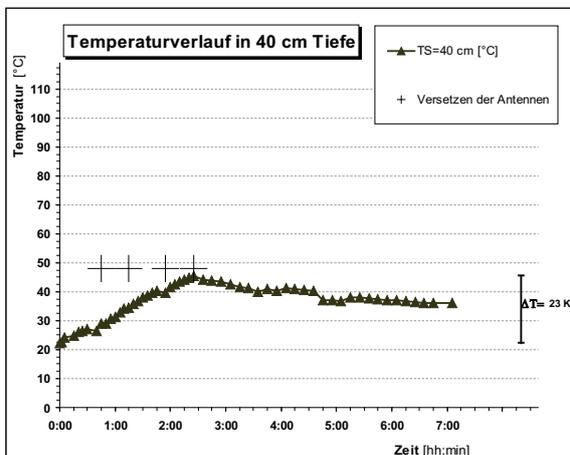


Abb. 127 Temperatur in 40 cm Tiefe während des Versuchs

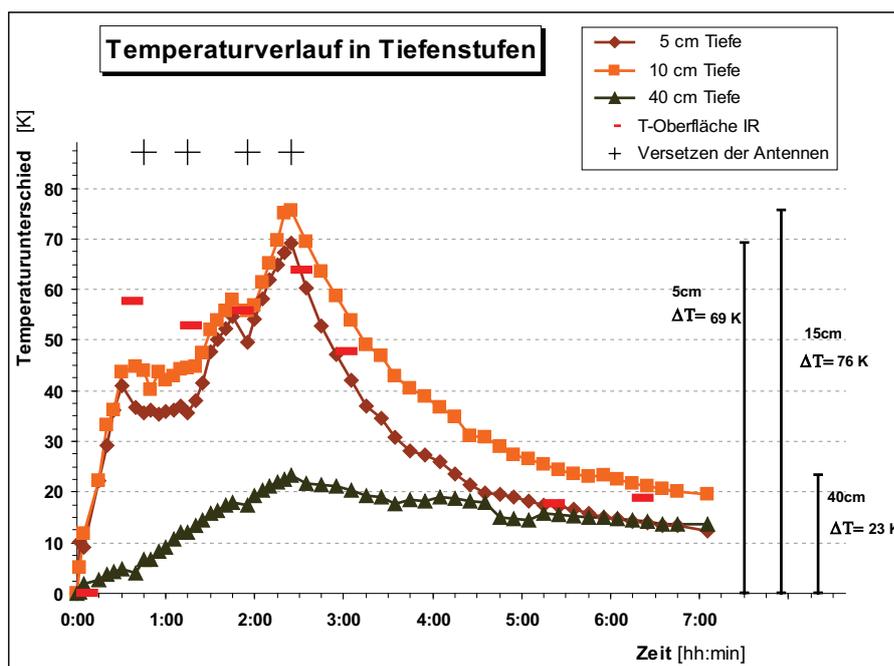


Abb. 128 Temperatur in allen drei Tiefen während des Versuchs

Dennoch sind für alle Messserien klare Trends erkennbar. In 5 cm Tiefe steigen die Temperaturen in der ersten halben Stunde von einem Anfangswert von 25°C, der etwas zu hoch erscheint (Lufttemperatur lag bei ca. 23,6°C), auf fast 66°C an. Mit und nach dem Versetzen der Antenne ist zunächst ein Abfall der Temperatur zu sehen, während der 2. Behandlungsphase mit der Mikrowelle bleibt die Temperatur bei etwa 60°C. In der 3. und 4. Mikrowellenbehandlungsphase, bei denen die Hornantennen jeweils über die Temperaturmesspunkte hinweggezogen, kommt es wieder zu einer signifikanten Temperatursteigerung bis zu 94°C. Das entspricht einer Temperaturänderung von fast 70 K, die nach 2 Stunden erreicht wird. Danach fallen die Temperaturen wieder ab. Die Behandlung des Mauerwerks mit Mikrowellenstrahlung wurde im unteren Bereich, unterhalb der Messsensoren, weitergeführt. Die Oberflächentemperaturmessung auf der Innenseite mit einer hochauflösenden IR-Kamera (Varioscan 3021st) zeigte keinerlei Änderung über den gesamten Versuchszeitraum. In der Abb. 129 ist über den Versuchszeitraum die Sequenz der IR-Bilder auf der Innenseite der MW-behandelten Wand dargestellt.

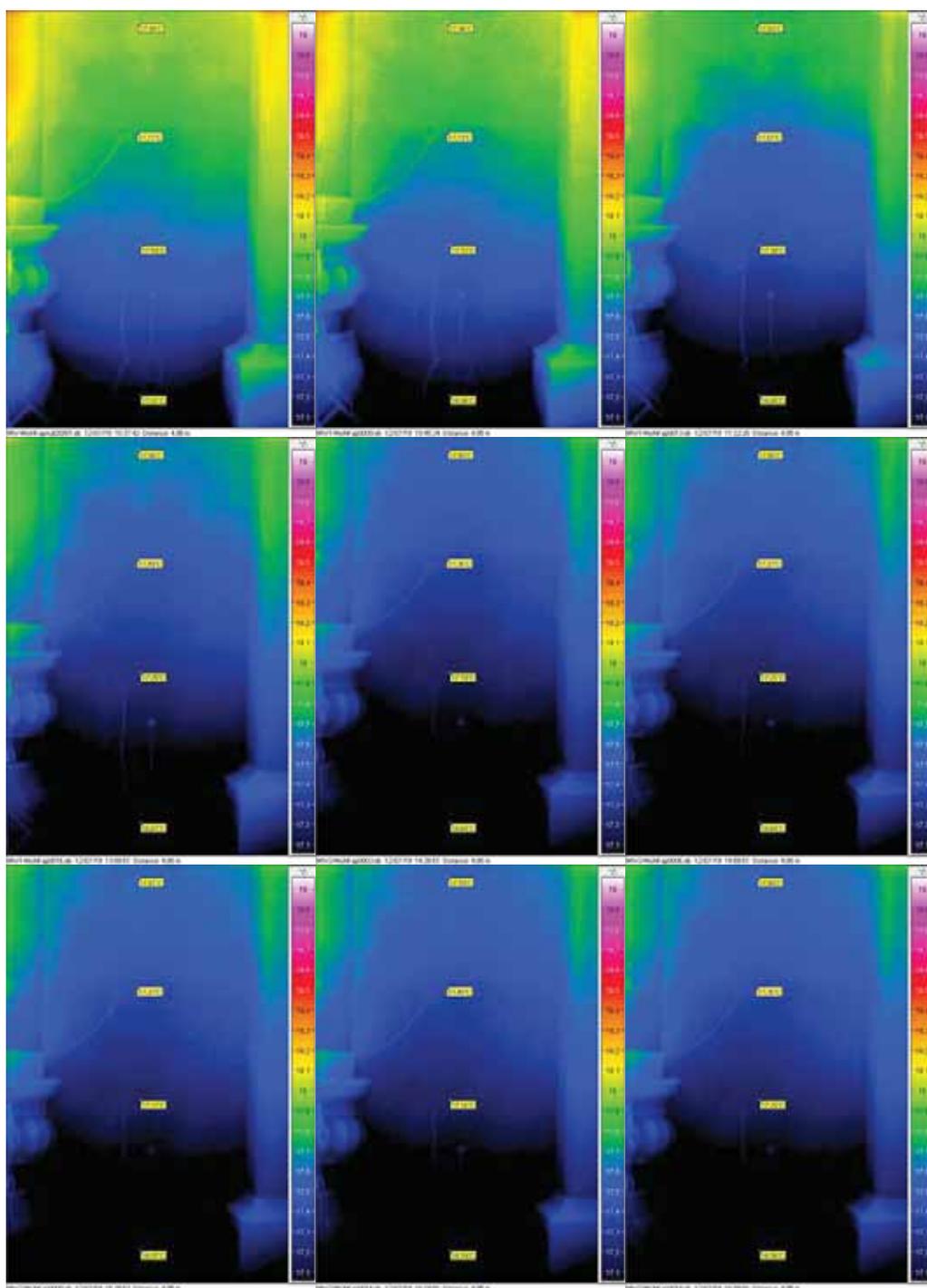


Abb. 129 Sequenz der IR-Bilder auf der Innenseite der MW-behandelten Wand

Die Messungen des Klimas in Bohrlöchern und einem Oberflächenfühler erbrachte keinerlei Änderungen der Temperatur in diesem Teil der Mauer.

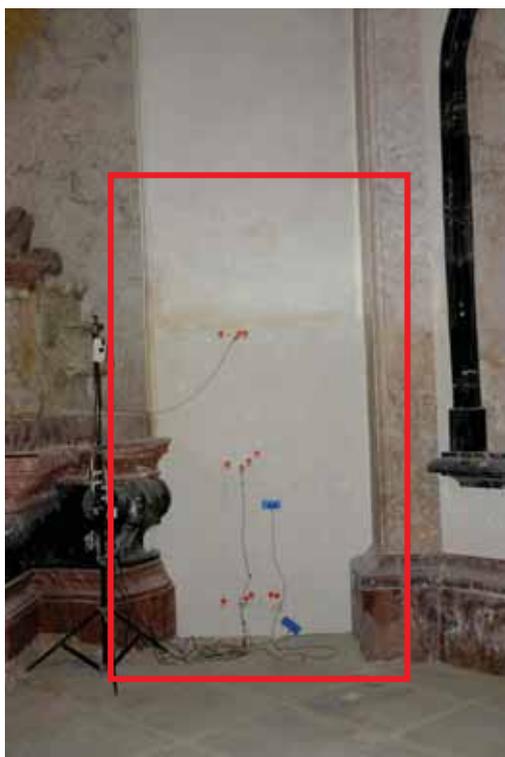


Abb. 130 Innenseite des außen MW-behandelten Wandabschnitts in der Michaeliskapelle. Der mittels IR-Kamera erfasste Bereich ist durch ein rotes Rechteck gekennzeichnet.

Das Eindringen und Wirken von Mikrowellen in Baustoffe ist begrenzt, somit auch ihre aufheizende und abtrocknende Wirkung (s. a. Roland 2006). Die elektromagnetischen Mikrowellen werden bei Durchgang durch den Feststoff gedämpft. Die Dämpfung wird bei bestimmten Molekülen in Wärme umgesetzt. Dies ist unter anderem bei Wassermolekülen gegeben, die zur Schwingung angeregt werden.

## 7.4 Feuchteuntersuchungen

Für die Bestimmung der Feuchte wurden Probenahmen vor Ort durch das IDK durchgeführt. Mit einem Spiralbohrer ( $\varnothing = 12 \text{ mm}$ ) wurde aus definierten Tiefenstufen Bohrmehl entnommen und in luftdichten Schnappdeckelbehältern aufgefangen. Die Feuchtebestimmung der Bohrmehle erfolgt mittels Darmmethode.

Es wurden Vor- und Nachuntersuchungen durchgeführt. Die Nachuntersuchungen erfolgten am frühen Abend, etwa 5 Stunden nach Beendigung der Mikrowellenbestrahlung. Das Mauerwerk wurden jeweils im Bereich eines Ziegels ( $h = 1,38 \text{ m}$ ) und einer Fuge ( $h = 1,27 \text{ m}$ ) beprobt und Bohrmehl in 10 Tiefenstufen, von 5 cm bis 50 cm Tiefe, entnommen. In Abb. 123 und Abb. 124 sind die Probenahmestellen dokumentiert. Eine Probenbeschreibung erfolgt in Tab. 22.

Tab. 22 Probenübersicht

Probennummer	Entnahmeort	Material	Bemerkung
MWAP_V_TP1/1	Michaeliskapelle, außen, Ziegel, Voruntersuchung 0 - 5 cm		
MWAP_V_TP1/2	5 - 10 cm		
MWAP_V_TP1/3	10 - 15 cm		
MWAP_V_TP1/4	15 - 20 cm		
MWAP_V_TP1/5	20 - 25 cm		
MWAP_V_TP1/6	25 - 30 cm		
MWAP_V_TP1/7	30 - 35 cm		
MWAP_V_TP1/8	35 - 40 cm		
MWAP_V_TP1/9	40 - 45 cm		
MWAP_V_TP1/10	45 - 50 cm		
MWAP_V_TP2/1	Michaeliskapelle, außen, Fuge, Voruntersuchung 0 - 5 cm		
MWAP_V_TP2/2	5 - 10 cm		
MWAP_V_TP2/3	10 - 15 cm		
MWAP_V_TP2/4	15 - 20 cm		
MWAP_V_TP2/5	20 - 25 cm		
MWAP_V_TP2/6	25 - 30 cm		
MWAP_V_TP2/7	30 - 35 cm		
MWAP_V_TP2/8	35 - 40 cm		
MWAP_V_TP2/9	40 - 45 cm		
MWAP_V_TP2/10	45 - 50 cm		
MWAP_N_TP1/1	Michaeliskapelle, außen, Ziegel, Nachuntersuchung 0 - 5 cm		
MWAP_N_TP1/2	5 - 10 cm		
MWAP_N_TP1/3	10 - 15 cm		
MWAP_N_TP1/4	15 - 20 cm		
MWAP_N_TP1/5	20 - 25 cm		
MWAP_N_TP1/6	25 - 30 cm		
MWAP_N_TP1/7	30 - 35 cm		
MWAP_N_TP1/8	35 - 40 cm		
MWAP_N_TP1/9	40 - 45 cm		
MWAP_N_TP1/10	45 - 50 cm		

Tab. 22 Fortsetzung

Probennummer	Entnahmeort	Material	Bemerkung
MWAP_N_TP2/1	Michaeliskapelle, außen, Fuge, Nachuntersuchung 0 - 5 cm		
MWAP_N_TP2/2	5 - 10 cm		
MWAP_N_TP2/3	10 - 15 cm		
MWAP_N_TP2/4	15 - 20 cm		
MWAP_N_TP2/5	20 - 25 cm		
MWAP_N_TP2/6	25 - 30 cm		
MWAP_N_TP2/7	30 - 35 cm		
MWAP_N_TP2/8	35 - 40 cm		
MWAP_N_TP2/9	40 - 45 cm		
MWAP_N_TP2/10	45 - 50 cm		

Die Ergebnisse der Feuchtebestimmungen an den Bohrmehlproben vor und nach der Mikrowellenbehandlung sind in den Tab. 23 und Tab. 24 dargestellt und in den Abbildungen Abb. 131, und Abb. 132, Abb. 134 und Abb. 135 jeweils einzeln sowie in den Abb. 133 und Abb. 136 und in direkter Gegenüberstellung dargestellt.

Tab. 23 Feuchtegehalte an TP1

Probennummer	Feuchtegehalt M. %
MWAP_V_TP1/1	1,25
MWAP_V_TP1/2	1,63
MWAP_V_TP1/3	1,82
MWAP_V_TP1/4	3,19
MWAP_V_TP1/5	3,97
MWAP_V_TP1/6	2,18
MWAP_V_TP1/7	3,09
MWAP_V_TP1/8	1,05
MWAP_V_TP1/9	1,68
MWAP_V_TP1/10	2,15

Probennummer	Feuchtegehalt M. %
MWAP_N_TP1/1	0,09
MWAP_N_TP1/2	0,05
MWAP_N_TP1/3	0,24
MWAP_N_TP1/4	0,47
MWAP_N_TP1/5	1,02
MWAP_N_TP1/6	1,77
MWAP_N_TP1/7	3,01
MWAP_N_TP1/8	1,65
MWAP_N_TP1/9	2,40
MWAP_N_TP1/10	2,65

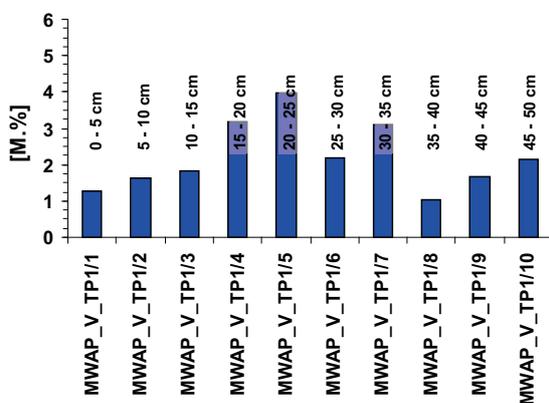


Abb. 131 Feuchteverteilung TP1, Vormessung

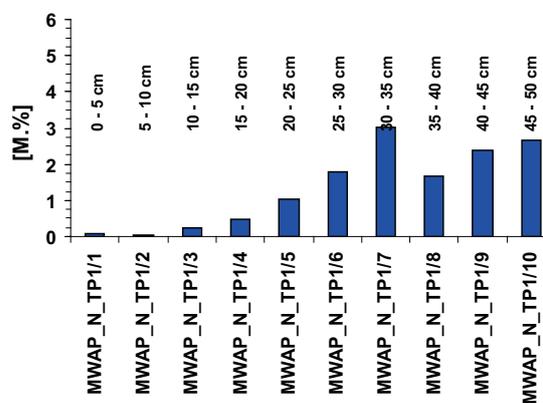


Abb. 132 Feuchteverteilung TP1, Nachmessung

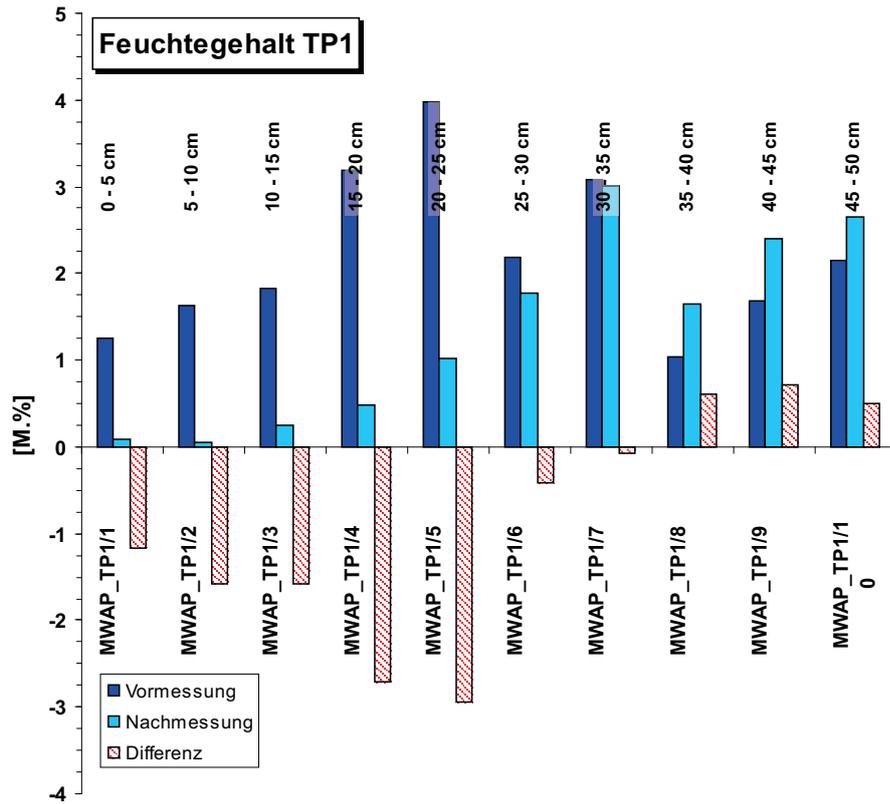


Abb. 133 Feuchteverteilung TP1 im Vergleich mit Darstellung des Differenzwertes

Tab. 24 Feuchtegehalte an TP2

Probennummer	Feuchtegehalt M. %
MWAP_V_TP2/1	3,25
MWAP_V_TP2/2	5,43
MWAP_V_TP2/3	5,11
MWAP_V_TP2/4	2,49
MWAP_V_TP2/5	1,37
MWAP_V_TP2/6	1,11
MWAP_V_TP2/7	0,62
MWAP_V_TP2/8	0,76
MWAP_V_TP2/9	2,78
MWAP_V_TP2/10	3,98

Probennummer	Feuchtegehalt M. %
MWAP_N_TP2/1	0,48
MWAP_N_TP2/2	0,88
MWAP_N_TP2/3	1,40
MWAP_N_TP2/4	0,81
MWAP_N_TP2/5	0,40
MWAP_N_TP2/6	0,99
MWAP_N_TP2/7	0,66
MWAP_N_TP2/8	0,90
MWAP_N_TP2/9	2,99
MWAP_N_TP2/10	4,04

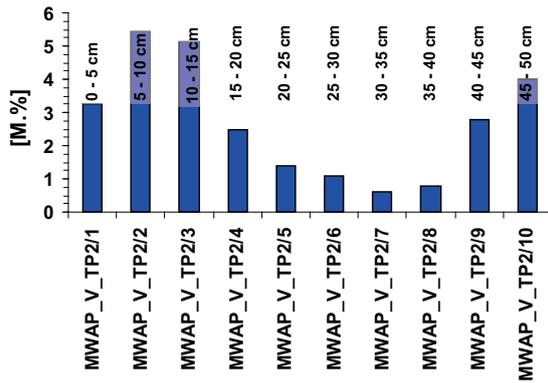


Abb. 134 Feuchteverteilung TP2, Vormessung

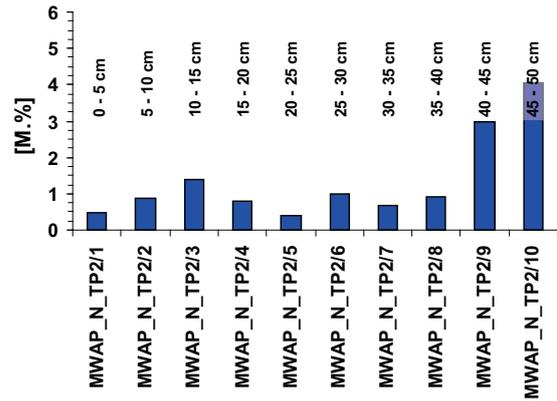


Abb. 135 Feuchteverteilung TP2, Nachmessung

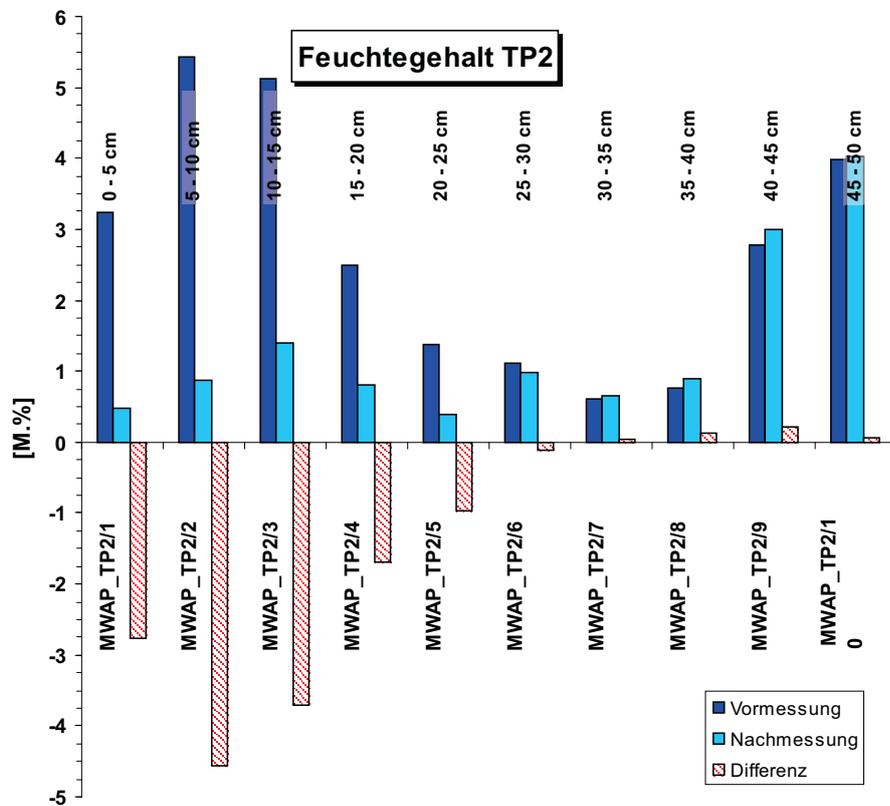


Abb. 136 Feuchteverteilung TP2 im Vergleich mit Darstellung des Differenzwertes

## 7.5 Zusammenfassung und Diskussion Außenwandversuch

Am Mauerwerk der Kapelle St. Michaelis im Kloster St. Marienthal wurden von außen eine Mikrowellen-(MW)-Behandlung durchgeführt und bemessen. Es wurden Temperaturänderungen bis zu einer Tiefe von 40 cm gemessen. Oberflächennah wurden Temperaturänderungen bis zu Im Ziegel werden bei den Voruntersuchungen Feuchten von ca. 1 bis 2 Ma.-% gemessen, die im Einflussbereich dazwischen liegender Setzmörtelfugen auf ca. 3 bis 4 Ma.-% ansteigen. Zwischen 35 und 50 cm Tiefe sinken die Feuchten auf ca. 1 bis 2 Ma.-% ab. Nach der Mikrowellenbehandlung wird eine Feuchtereduzierung bis zu einer Tiefe von ca. 25 bis 35 cm festgestellt. In den Tiefenstufen zwischen 15 und 25 cm wird eine Feuchtereduzierung von ca. 3 Ma.-% beobachtet. In der größerer Tiefe, zwischen 35 und 50 cm, wird ein Feuchteanstieg um ca. 1 Ma.-% beobachtet, die auf eine partielle Feuchteumverteilung in die Tiefe hinweist.

Ähnliche Ergebnisse können auch bei den Vor- und Nachuntersuchungen im Fugenbereich festgestellt werden. Bei den Voruntersuchungen werden bei 0 bis 20 cm Tiefe im Vergleich zum Ziegel etwas höhere Feuchten von ca. 3 bis 5 Ma.-% gemessen, die danach zwischen 20 und 40 cm Tiefe auf ca. Ma.-% sinken. Mit der Tiefe steigt die Feuchte wieder auf ca. 3 bis 4 Ma.-% an. Nach der Mikrowellenbehandlung wird eine deutliche Feuchtereduzierung bis zu einer Tiefe von ca. 25 bis 35 cm festgestellt. In den Tiefenstufen zwischen 15 und 25 cm wird eine deutliche Feuchtereduzierung von ca. 3, 4 und 5 Ma.-% beobachtet. Gleichzeitig wird in der Tiefe zwischen 35 cm und 50 cm ein leichter Feuchteanstieg um ca. 0,5 Ma.-% beobachtet, die auf eine teilweise Feuchteumverteilung in die Tiefe hinweist.

In beiden Feuchtetiefenprofilen zeigen sich deutlich Veränderungen des Feuchtegehalts bis zu einer Tiefe von 25 cm. Zum Zeitpunkt der Probenahme wird eine Feuchtereduktion in diesem Tiefenbereich festgestellt. Das ca. 160 cm starke Mauerwerk wird allerdings mit dieser Behandlung in der Relation ausschließlich an der Oberfläche getrocknet. Damit ist es mit der im Versuch erprobten Verfahrensweise kaum möglich, von außen das ca. 160 cm starke Mauerwerk unterhalb der Gipsstuckoberfläche ausreichend abzutrocknen.

Von theoretischer Seite aus betrachtet sollte allgemein bei stark durchfeuchteten Bauteilen ein tiefes Eindringen der Wärme bzw. Mikrowellenstrahlung ermöglicht werden ohne durch nur oberflächennahes Abtrocknen die kapillare Trocknung zu unterbrechen. Dieser Effekt wird als Trocknungsblockade bezeichnet.

Um deutliche Trocknungserfolge z.B. mit dem Einsatz von Mikrowellen zu erzielen, müssen entsprechend höhere Temperaturen aufgebracht werden, die eine oberflächennahe Erwärmung des Mauerwerks über 100°C zur Folge haben. Bei einem Einsatz der technischen Trocknung muss im Vorhinein die Wirkung der Trocknungstemperatur auf den Baustoff analysiert werden, um eine mögliche Gefügeschädigung zu vermeiden. Hierbei sollten die in diesem Temperaturbereich einsetzenden Entwässerungsreaktionen von Mörtelbestandteilen, im Wesentlichen Hydratationsprodukten z.B. Gips (Entwässerung ab 60°C), Ettringit (Entwässerung und Phasenumwandlung 80 bis 110°C (Wonnemann 1982), Monosulfat (Entwässerung ab 170°C (Wonnemann, 1982)), CSH-Phasen (partielle Entwässerung bis 200°C (Wonnemann 1982)) besonders beachtet werden, da diese Reaktionen unter Volumenabnahme erfolgen und damit zu Gefügeschäden führen können. Des Weiteren können im Mauerwerk vorhandene Schadsalzionen schlagartig zur Kristallisation aktiviert werden und zu Schäden führen. Liegen aluminatreiche Bindemittel, z.B. bei Einsatz von Tonerdezementen, vor (nicht typisch für Mauermörtel und Putze), so beschleunigen Temperaturen größer 40°C die Umwandlung von den lamellaren Calciumaluminathydraten zu Hydrogranat stark. Die danach fehlende Verzahnung des jetzt kugelartigen Materials führt zum Zerrieseln des Mörtels.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Das Mauerwerk der Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal wurde durch ein Flutereignis im August 2010 stark durchfeuchtet. Im Rahmen des DBU-Förderprojektes "Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle" sollte untersucht werden, wie sich durch eine Behandlung des Mauerwerks mit Mikrowellentechnik die Bautrocknung beschleunigt werden kann ohne Gefährdung für den historischen Bestand der Gipsstuckfassung. Die experimentelle Untersuchung erfolgte mehrstufig vor Ort und an Probekörpermaterial im Labor. Der Einsatz des Nachstellungsmaterials ermöglichte ungehinderte Probenahme unter weitestgehender Schonung der Originalsubstanz. Die Mikrowellenbehandlungen wurden durch eine erfahrene Fachfirma durchgeführt.

Beim experimentellen Einsatz von Mikrowellentrocknungsgeräten an Probekörpern und in bzw. an der Michaeliskapelle konnten mehrere Ergebnisse festgestellt werden:

Durch eine Antenne einseitig in ein Mauerwerk eingebrachte Mikrowellen führen zu einer Erwärmung der Oberfläche und des oberflächennahen Bereichs. Die Wärmeleistung nimmt in die Tiefe im Dezimeterbereich ab.

Die Verteilung der induzierten Temperatur an der Oberfläche ist ungleichmäßig über den Antennenquerschnitt. Es wird dringend empfohlen, für Mikrowellenantennen in der Bautrocknung die Effekte der Antennen zu berechnen und zu simulieren.

Durch die Mikrowellenbehandlung können an der Oberfläche teilweise Temperaturen erreicht werden, die weit über den Stabilitätstemperaturen der Phasen liegen, die an historischen Oberflächen vorliegen können (hier beispielsweise Gips). Das Aufbringen von weniger Leistung korreliert mit einem Einbringen von weniger möglicher Trocknungsleistung in das Mauerwerk.

Die Auflage der Antennen an profilierte, gestaltete Oberflächen ist nicht immer ohne weiteres möglich.

Auch bei Erwärmung eines Mauerwerksabschnittes bleibt der Abtransport der Feuchte aus dem Mauerwerk hinaus ein Engpass zur effektiven Trocknung.

Unter Berücksichtigung der großen Mauerwerksstärke und dem Ergebnis an den nachgestellten Stuckflächen Schäden induziert zu haben, kann eine Trocknung der historischen Mauern der Michaeliskapelle mittels Mikrowelle als effiziente und ungefährliche Methode mit dem Ziel viel Originalsubstanz nachhaltig zu schützen, nicht empfohlen werden. Es wurden zusammen mit den Projektbeteiligten andere Vorgehensweisen erarbeitet, nach unterstützter natürlicher Abtrocknung möglichst viel historische Originaloberfläche aus Stuck halten und aufarbeiten zu können.

Der Einsatz von Mikrowellentrocknung an historischem Baubestand ist problematisch. Zum einen liegt meist ein heterogenes Mauerwerk vor, das die Voraussage zum Eindringen der Mikrowellen in das Mauerwerk sowie Abschätzung der Schadensfreiheit der Wechselwirkung der Strahlung mit dem Baumaterial erschwert. Zum anderen ist mit relativ großen Mauerwerksstärken und empfindlichen historischen Oberflächen umzugehen.

Daher kann der Einsatz der Mikrowellentrocknung am Denkmal nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Vor dem Einsatz sind die Randbedingungen intensiv zu prüfen, um Schäden zu vermeiden. Auch sollte geprüft werden, ob durch konservative Verfahren wie gezielter und optimierter Trocknung durch natürliche oder unterstützte Lüftung nicht ebenso, und unter geringerem Einsatz von Energie, eine Abtrocknung feuchter Bauteile gewährleistet werden kann.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen, die für den Einsatz von Mikrowellen gelten, sollten in einem kommenden Schritt Radiowellen für ihren Einsatz zur schonenden Trocknungsbehandlung am Denkmal untersucht werden. Mobile Einsatzgeräte für diese Technik sind aktuell im Entwicklungsstadium.

## 9 Quellen- und Literaturangaben

- BLDAM. (2012) Vom Imitat zum Kunstgut. 800 Jahre Kunststein. Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.), Arbeitsheft Nr. 27, Beiträge des 6. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg am 8. November 2012 in Potsdam. 96 S. Worms 2012
- FRANZEN, C., LÖTHER, TH., MEINHARDT-DEGEN, J., WEISE, S. (2007) Detektierung und Konservierung infolge von Umwelteinflüssen hohlstehender Wandmalereien am Beispiel der national wertvollen mittelalterlichen Kirchen in Kühren und Bad Schmiedeberg, Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ: 21045006, 137 S., [http://193.175.110.9/hornemann/german/epubl\\_projekte60.php](http://193.175.110.9/hornemann/german/epubl_projekte60.php), DOI 10.5165/hawk-hhg/62
- FRANZEN, C., ZÖTZL, M. (2009) Marienthal, Michaeliskapelle, Feuchte- und Salzuntersuchungen - unveröffentlichter Bericht des IDK DD 62/2009, 11 S.
- FRANZEN, C., ZÖTZL, M. (2011) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstucktrocknung - Mikrowellenversuch an der Außenwand der Kapelle, 3. Zwischenbericht im DBU-Projekt, unveröffentl. Bericht des IDK DD47/2012, 30 S.
- FRANZEN, C., ZÖTZL, M. (2011), Gipsstucktrocknung mit Mikrowellen, Laboruntersuchungen, Mikrowellenexperimente an Probekörpern, Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal, AZ 29378, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2. Zwischenbericht - unveröffentlichter Bericht des IDK DD 98/2011, 27 S.
- HENNING, O., KÜHL, A., OELSCHLÄGEL, A. & PHILIPP, O. (1989) Technologie der Bindebaustoffe, 1, 2. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen Berlin
- HENNING, O.; EGGERT, O. (1999) Zur feuchtigkeitsbedingten Veränderung von Gipsbaustoffen, ZKG INTERNATIONAL 52, 3. – S. 154 – 159
- IFS (2012) Gips als Baugrund, Mörtel und Dekorationsmaterial, IFS-Bericht, Institut für Steinkonservierung e.V.; 42, Selbstverlag 2012, 104 S.
- LÖTHER, TH. (2012) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstucktrocknung - Auswertungen der Klimadaten 4. Zwischenbericht im DBU-Projekt, unveröffentl. Bericht des IDK DD59/2012, 18 S.
- ROLAND, U. (2006) Anwendung der dielektrischen Erwärmung mit Radiowellen in der Umwelttechnik, Habilitationsschrift an der TU Bergakademie Freiberg, 204 S.
- STEIGER, M., DANNECKER, W. (1998): Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardit/Mirabilit. In R. Snethlage, Ed. Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung 1994-1996, 6, Ernst & Sohn, Stuttgart, 123-133.
- STEIGER, M., NEUMANN, H.-H., GROTEN, T., WITTENBURG, C., DANNECKER, W. (1998) Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91
- VOGEL, D.; FOLLNER, H.; JACOBI, H.; KULKE, H.; BROKMEIER, H.-G.: Charakterisierung und Nachstellung historischer Gipse und Vergleich mit heute bekannten Präparaten, ZKG INTERNATIONAL 52 (1999) 11. – S. 640 – 648
- WENDLER, E. (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten - Anwendung und Interpretation der Messwerte. - Bautenschutz + Bausanierung 12, S. 110 - 115.
- WONNEMANN, R. (1982) Untersuchungen über die Rolle der Sulfate und der Alkalien bei der Portlandzementhydratation. Dissertation, TU Clausthal
- WTA-Merkblatt "Feuchtemessung" (1999): WTA-Merkblatt 4-11-02/D: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
- WTA-Merkblatt "Mauerwerksdiagnostik" (1999): WTA-Merkblatt 4-5-99/D: Beurteilung von Mauerwerk, Mauerwerksdiagnostik. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
- WTA-MERKBLATT „Kompressenentsalzung“ (2001): WTA-Merkblatt E 3-13-01/D: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
- [www.salze-im-porenraum.de](http://www.salze-im-porenraum.de)

- XU, QI (2005) Chemische Wirkung von Erstarrungsbeschleunigern auf die frühe Hydratation des Portlandzementes. Göttingen, Cuvillier Verlag
- ZÖTZL, M. (2010) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Untersuchungen von Effloreszenzen auf Stuckoberflächen, unveröffentlichter Bericht des IDK Bericht DD 107/2010, 6 S.
- ZÖTZL, M. (2012) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Feuchte- und Salzuntersuchungen, unveröffentlichter Bericht des IDK DD 08/2010, 13 S.
- ZÖTZL, M. (2012) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Untersuchungen zur Braunverfärbung auf Gipsstuckoberflächen, unveröffentlichter Bericht des IDK Bericht DD 19/2012, 10 S.
- ZÖTZL, M., FRANZEN, C. (2011) Kloster St. Marienthal, Michaeliskapelle, Gipsstucktrocknung, Versuch der Mikrowellentrocknung an einer Musterfläche, Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal, AZ 29378, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 1. Zwischenbericht - unveröffentlichter Bericht des IDK DD 54/2011, 48 S.

Kreuz- und Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal  
Mikrowellendurchwärmung von Stuckmarmorflächen, 05. Mai 2011  
Sockelzone einer Nische - vorläufiges Dokumentationsmaterial

Vorbemerkung

Auf Grund der guten Erfahrungen, die bei der Bauwerks- / Mauerwerkstrocknung mittels Mikrowellendurchwärmung gemacht worden sind war es naheliegend, für den hochwasserbedingten Schadensfall im Kloster Marienthal / Ostritz das Verfahren hinsichtlich der Eignung für die Trocknung durchfeuchteter Wandbereiche mit Stuckmarmorfassungen zu erproben.

Im Gegensatz zur allgemein üblichen Anwendung der Mikrowellentrocknung für weitgehend homogenes und von Putzschichten freigelegtes Wandmauerwerk liegt bei Stuckmarmorflächen ein in unterschiedlichen Schichten aufgebautes Wandputzsystem vor, das im Regelfalle einen historischen Mauerwerkskern bekleidet. In sofern sind die Erfahrungen, die für die Mikrowellentrocknung bei „Regelausführungen“ gesammelt worden sind und die als gesichert geltenden Erkenntnisse über den Wirkmechanismus mindestens zu überprüfen. Der Transportweg des Wassers zur Bauteiloberfläche ist bei einem Mehrschichtensystem durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der jeweiligen Schichten (unterschiedliche mineralische Zusammensetzung, unterschiedliche Dichte / Porosität usw.) ggf. behindert. So kann vermutet werden kann, dass z.B. durch den Durchfeuchtungsvorgang gelöste (bauschädliche) Salze aus dem Mauerwerk, die sonst ungehindert an die Oberfläche gelangen können, sich (ggf. anteilig) in porösen Schichten ansammeln und dort – bes. durch hygroskopische Eigenschaften – langfristig zu Materialzerstörungen (Kristallisationsdruck) führen. Auch muß geprüft werden, ob die punktuell hohen Erwärmungen zu Schäden / Veränderungen an den farbigen Deckschichten führen (thermische Stabilität der Pigmente) u. a. m.

Zum anderen ist aber auch denkbar, dass durch die im Verhältnis hohe Erwärmung und die damit verbundene schnelle Abtrocknung ein zusätzlicher Entsalzungseffekt entsteht, d. h. dass größere Mengen schnell an die Oberfläche gelangen und dort dann problemlos mechanisch abzunehmen sind.

Damit wird ersichtlich, dass eine breit angelegte behutsame Erprobung der Mikrowellentrocknung für den vorliegenden Anwendungsfall notwendig wird. Das Ziel der Maßnahmen muß darin bestehen, die Mikrowellentechnik dahingehend zu testen, ob sie Möglichkeiten bietet, mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand die Erhaltung originaler Putzstuck-/ Stuckmarmorflächen schadensfrei zu sichern. Getrocknete Bereiche sollten nach einer Mikrowellenbehandlung keine Gefügezerstörungen aufweisen und nur einen geringen restauratorischen Aufwand zur Wiederherstellung der Originaloberflächen erfordern. Sollte die Mikrowellentrocknung diesem restauratorisch-denkmalpflegerischen Anspruch genügen, wäre der damit sicher verbundene hohe verfahrenstechnische Aufwand gerechtfertigt.

Nachfolgend beigefügtes Bildmaterial dokumentiert erste Versuche zur Beurteilung der Mikrowellentrocknung an ausgesuchten Wandflächen der Kreuz- und Michaeliskapelle aus der Sicht des Technikers im Mai 2011. Vorangegangen war ein genereller Test (Oktober 2010), dessen Ergebnisse die Erwartungen an eine Eignung des Verfahrens bestärkt hatten.

Quellen zur Mikrowellentechnik:

Dipl.-Ing. Steffen Steinbach / MTB Mikrowellen Technik Bauwerkserhaltung Holzschutz Mittenwalde  
verschiedene Veröffentlichungen u. Fachartikel

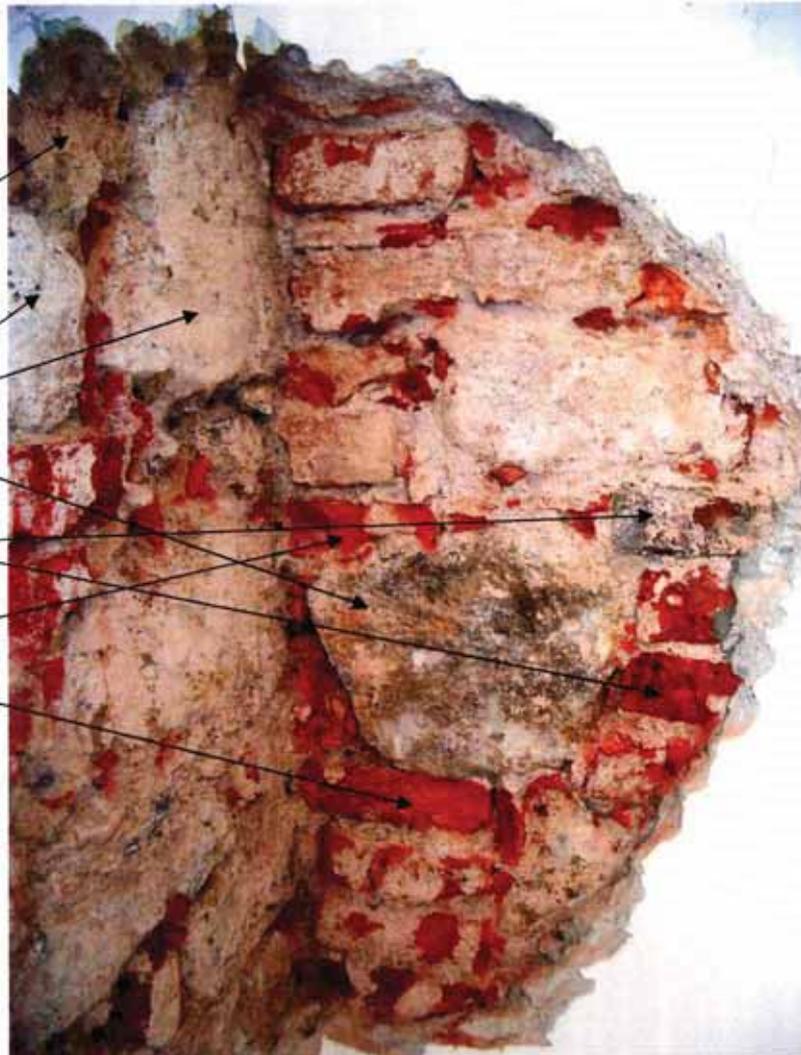
Struktur des Wand-  
mauerwerkes im Be-  
reich der St. Micha-  
eliskapelle / inhom-  
genes Mischmauer-  
werk aus Steinmateri-  
al mit unterschiedli-  
chen physikalischen  
Eigenschaften

Mörtelnester

dichter Naturstein

hart gebrannter Ziegel

poröser Ziegel



Nachfolgend tabellierte Werte sind Orientierungsgrößen, die die physikalische Inhomogenität des Mauerwerkskörpers belegen. Die Werte sind mit dem Fortschritt der Themenbearbeitung zu verbessern.

Material	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/m*K]	Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$ (nur Vergleichszahlen)
Mörtel	~ 1,8	~ 0,87	
dichter Naturstein	~ 2,8	~ 3,5	(mineral. Glimmer 7,0)
hart gebrannter Ziegel	1,8...2,0	~ 0,88	(dichte Keramik 4,0...6,5)
poröser Ziegel	1,2...1,4	~ 0,55	
Gips	~ 1,4	~ 0,7	

Quellen:

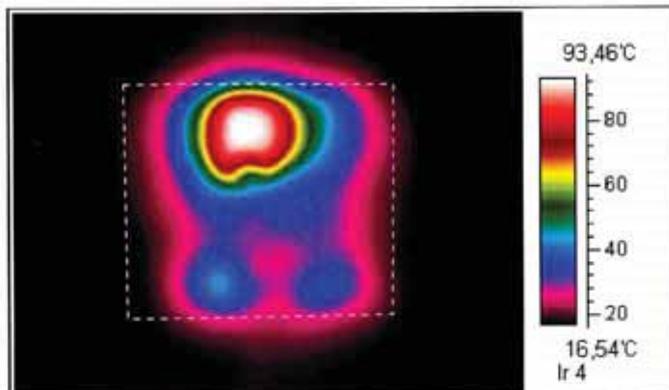
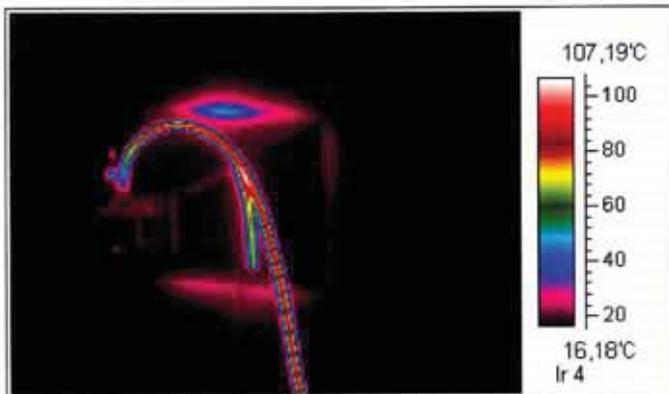
- Buss, Harald; Aktuelles Tabellenhandbuch Feuchte, Wärme, Schall WEKA- Fachverlage GmbH Co. KG Kissing 1987
- Breuer, Hans und Rosemarie; Atlas zur Physik Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG München 1987 / 1988



Bruchstücke der Stuckmarmor- Architekturfassung, die unterschiedlichen Schicht- bzw. Plattendicken werden deutlich. Die Ausführung erfolgte teilweise als dünner Vorsatz (braunrote Schicht) auf einem Mörtelstuckgrund als Träger (weißes Material), teilweise auch in Form von vorgefertigten Schalen bzw. Platten (graue Platte)



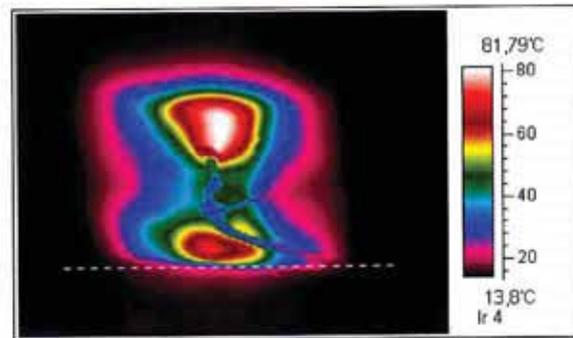
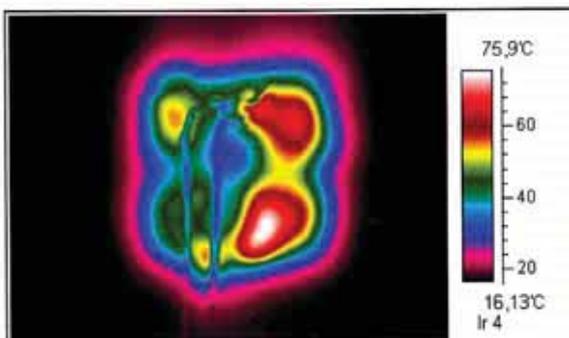
Die farbigen Stuckmarmorvorsätze sind z. T. nur um 3 mm dick, offensichtlich sind die farbigen Massen dichter als das Trägermaterial. Auf dem Mauerwerk (Grundgeometrie der Architekturgliederung) sind damit mindestens 2 Schichten mit jeweils variierenden Dicken und unterschiedlichen Materialeigenschaften (z.B. Kapillarstruktur) aufgebracht. Für die Mikrowellen-Trocknung müssen ggf. auch unterschiedliche Polarisationsseigenschaften berücksichtigt werden. Aus der Inhomogenität des Gesamtgefüges, sicher aber auch aus den damit in Verbindung stehenden Restfeuchtegehalten, erklären sich die in den thermographischen Darstellungen zum Ausdruck kommenden Durchwärmungsunterschiede. Es ist zu vermuten, dass die Salzablagerungen auf den Stuckmarmoroberflächen vorrangig aus dem Mauerwerkskörper stammen und teilweise auch in der porösen Trägerputzschicht eingelagert sind. Für eine Entsalzungsstrategie ist daher die Schichtungsstruktur zu berücksichtigen.



Durchwärmungsversuch an der Probewandfläche, Antennenstellung 1. Extrem ungleichförmige Durchwärmung nach 20 Minuten Einwirkungszeit. Die Ursachen werden in der Materialstruktur der Wand und in ggf. davon abhängigen zonenweisen Restdurchfeuchtungen gesehen. Die Messsonden waren in unterschiedlichen Tiefen angesetzt worden (5, 10 und 15 cm). Die Messdaten wurden in definierten Intervallen aufgezeichnet.

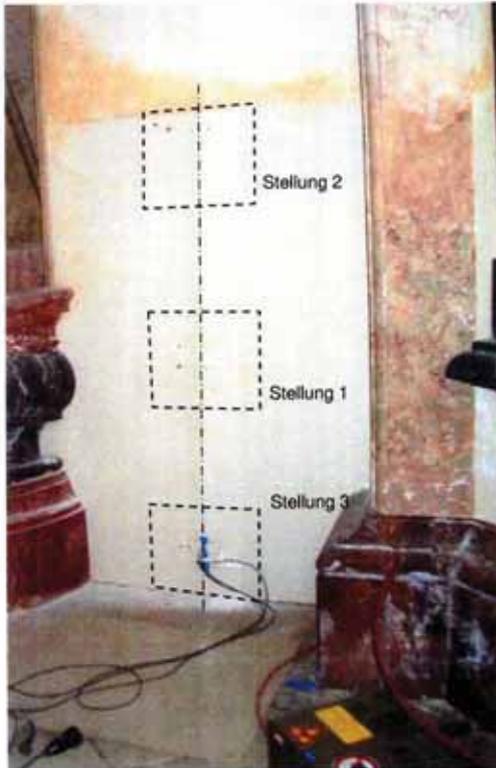
Kreuz- und Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal  
Mikrowellendurchwärmung von Stuckmarmorflächen, 05. Mai 2011  
Sockelzone einer Nische - vorläufiges Dokumentationsmaterial

Antennenstellungen 2 und 3, Bedingungen wie unter Text zur Antennenstellung 1 beschrieben.

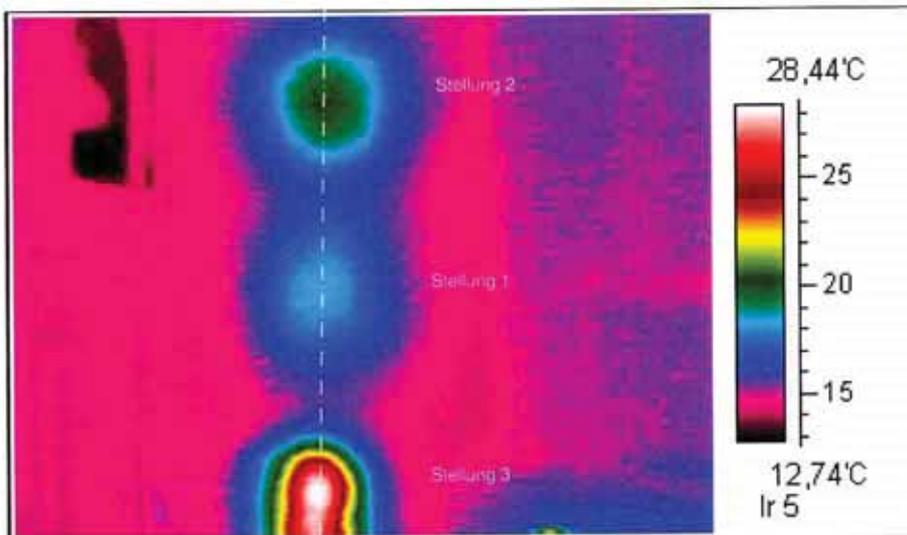


Thermogramme nach 20 Minuten Durchwärmungszeit, links Antennenstellung 2 und rechts Antennenstellung 3. Auch hier fällt die ungleichförmige Durchwärmung im Einflußfeld der Hornantenne auf. Ein Ausgleich kann durch verlängerte Durchwärmungszeiten, ggf. mit reduzierter Energieeinkopplung, erreicht werden (siehe Versuch am farbigen Sockel)

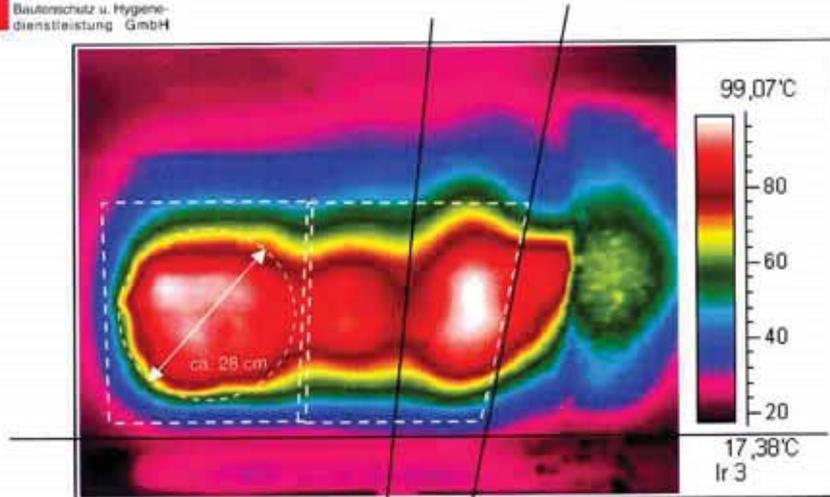
Kreuz- und Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal  
Mikrowellendurchwärmung von Stuckmarmorflächen, 05. Mai 2011  
Sockelzone einer Nische - vorläufiges Dokumentationsmaterial



Probefläche mit Eintragung der Antennenstellungen zum Vergleich mit den vorhergehenden Abbildungen. In den Durchwärmungsbereichen wurden jeweils verschiedene Materialproben genommen.



Thermogramm nach Beendigung der Durchwärmungsversuche, Abkühlungsverlauf mit Temperatenausgleich auf entsprechend niedrigem Temperaturniveau. Aufnahme ca. 3 Std. nach Abschluß der Durchwärmung / Stellung 1 (Die Aufnahmezeiten können aus den Dateiinformationen zu den Thermogrammen als relative Angaben ausgelesen werden)



Thermogramm  
nach 2 x 20 min  
Durchwärmung /  
Stufe 9 (volle Lei-  
stung,  
(ca.2 x 900 W)



Optik der Durch-  
wärmungszone  
nach der Be-  
handlung (s. o.)

(Abbildung und Thermogramm sind nur annähernd deckungs-  
gleich; schwarze Linien zur räumlichen Orientierung, weiß in  
etwa Hornantennenformat)



Hornantennen-  
stellung während  
der Durchwär-  
mung

Kreuz- und Michaeliskapelle im Kloster St. Marienthal  
Mikrowellendurchwärmung von Stuckmarmorflächen, 05. Mai 2011  
Sockelzone einer Nische

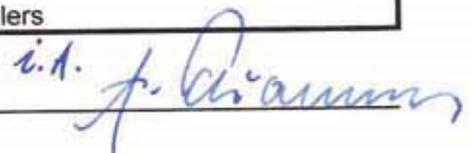
# Betriebsanweisung "Mikrowelleneinsatz"

<b>Baustelle: Kloster St. Marienthal / Ostritz, Kreuz- u. Michaeliskapelle</b>	
<b>Betrieb:</b> <b>bhd</b> Bautenschutz und Hygienesdienstleistung GmbH Scharfenberger Str. 27 / 01139 Dresden Tel.: (0351) 4 76 79 47	<b>Tätigkeit:</b> Thermische Behandlung durchfeuchteter Bauteile / Gegenstände ( <b>Bautrocknung</b> ) mittels elektromagnetischer Wellen, Versuch "Stuckmarmor"
<b>Technische Parameter</b>	
<b>Bezeichnung / Art der Geräte:</b> Steuergerät, Generatoren, Antennen, Temp.-Meßsonden, Strahl.-Meßger. "RadMan" und Hilfsmittel Anl.-Typ: <b>MWA - LC1.1.R (MTB)</b>	<b>Elt.(Ansch.):</b> 230 V / 16 A <b>Leistung:</b> pro Generat. (Magnetron) 0,9 kW <b>Frequenz:</b> 2,45 GHz <b>Wellenl. λ:</b> 12,2 cm (Luft)
<b>Mögliche Gefahren für Mensch und Umwelt</b>	
	Physiologische Wirkung: Durch Energieeinkopplung Überhitzung, Eiweißgerinnung, Verbrennungen. Bereiche mit hohem Strahlungsniveau sind sicher abzugesperrt, durch Reflexion / Transmission austretende Strahlung durch laufende Kontrollmessung lokalisieren und messen, ggf. Erweiterung des Sicherheitsbereiches herstellen. Gefahr durch Beeinflussung elektronischer Implantate und medizin. Hilfsmittel <b>Grenzwert 5 mW / cm<sup>2</sup> beachten !</b>
<b>Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln</b>	
	Steuergeräte mit "Not-Aus"- Schalter in sicherer Entfernung aufstellen, Sicherheitsbereich um die Antennen festlegen und mittels "RadMan" laufend kontrollieren, Haustiere entfernen, Fremdpersonen vom Zutritt ausschließen. Elektronische Geräte abschalten. Nicht freischaltbare Technik mit geeigneten Metallfolien abschirmen. In Strahlungsmessungen auch Nebenräume mit einbeziehen. Vor Umsetzen der Antennen Einheiten ausschalten. <b>Vorsicht bei erwärmten Oberflächen! Temperaturmeßsonden und Coax- Kupplungen erwärmen sich ggf. stark!</b> Spannungsführende Kabel gegen mechan.und therm. Beschädigung schützen. Während des Betriebes ständige Anwesenheit unterwiesenen Personals sicherstellen
<b>Verhalten im Gefahrfall</b>	
	Bei Unregelmäßigkeiten sofort "Not-Aus"- Schalter betätigen. Im Entzündungsfall Brandbekämpfung mit geeignetem Löscher veranlassen, ggf. Feuerwehr <b>112</b> rufen. Bei jeder Störung <b>Selbstschutz</b> beachten. Überhitzte Bereiche auf sichere Abkühlung kontrollieren.
<b>Erste Hilfe</b>	
	Bei jeder Erste Hilfe Maßnahme <b>Selbstschutz</b> beachten. Bei Verdacht auf kritischer Energieeinkopplung in Gliedmaßen und Körper umgehend einen <b>Arzt</b> aufsuchen, ggf. Rettungsdienst <b>112</b> verständigen ! Verunfallte Personen aus dem Arbeitsbereich bringen.
<b>Vorschriften</b>	
DIN VDE 0848 Teil 2 vom Oktober 1991 Sicherheit in elektromagnetischen Feldern Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz. Betriebsanweisung des Herstellers	

Ort, Datum:

Ostritz, 5. Mai 2011

Betriebsleiter:



## Mikrowellentechnik



Anlage:  
MWA - LC 1,1 R  
MTB Mittenwalde

Mikrowellen bewirken in feuchten Stoffen auf Grund des Dipolcharakters der Wassermoleküle eine Erwärmung infolge Molekülreibung. Trockenes Holz wird durch die chemische Struktur der Zellulose (OH-Gruppen als Dipole) ebenfalls erwärmt. Die praktischen Anwendungen zählen daher zu den thermischen Verfahren.

Die Möglichkeiten, die die Mikrowellentechnik bietet, sind vielseitig:

- Feuchteanalytik / thermografische Bauwerksanalytik
- Bauwerks- und Bauteiltrocknung
- Bekämpfend wirksamer Holzschutz
- Hausschwammbekämpfung im Holz (Alternativverfahren außerhalb der DIN 68 800 T4)
- Dekontaminierung u.a.m.

Die Einheiten bestehen aus einem Steuergerät, den in Stufen regelbaren Generatoren sowie den sogenannten „Horn-Antennen“, Flachantennen befinden sich z. Z. noch in der Entwicklung. Die Antennen können auf Grund der technischen Ausstattung der Anlage auch gegeneinander gestellt werden, was z. B. bei der Durchwärmung von Balken erhebliche Vorteile erbringt. Die Temperaturkontrolle erfolgt über Sonden, die mit dem Steuergerät gekoppelt sind. Oberflächentemperaturen werden in der Regel kontaktlos mit Infrarotthermometern gemessen. Unter Baustellenbedingungen ist eine vereinfachte Aufstellung möglich, es kann auch vom Gerüst aus gearbeitet werden. Sicherheitsbereiche werden abgesperrt, außerhalb der Absperrungen erfolgen während des Betriebes der Anlage Kontrollmessungen, um Gefährdungen durch elektromagnetische Wellen sicher auszuschließen.

- Beispiel - Anwendung „bekämpfend wirksamer Holzschutz“:

Der Erfolg einer Mikrowellenbehandlung von Holzteilen mit vitalem Befall holzschädigender Organismen ist abhängig von:

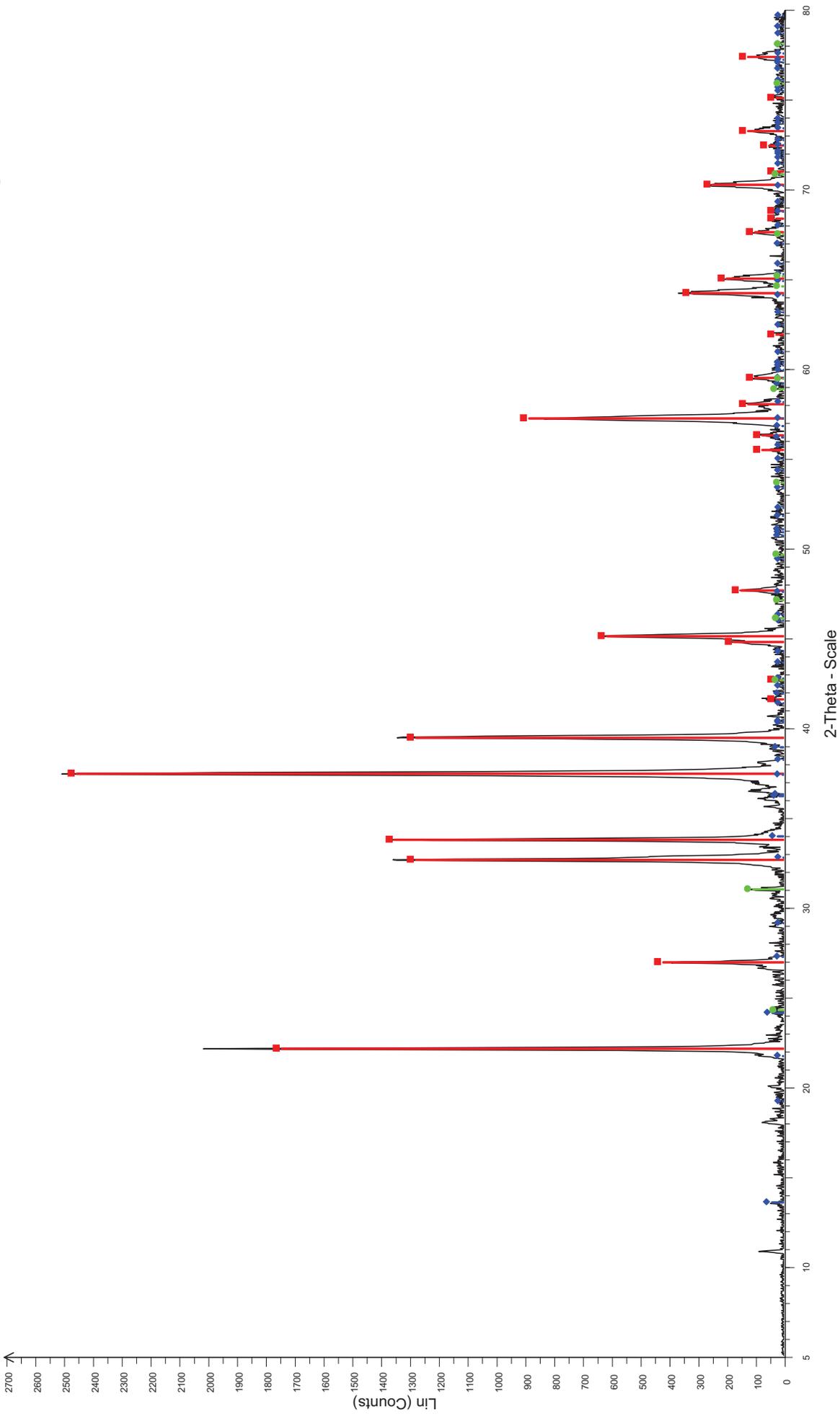
- der generellen Erreichung eines Durchwärmungsniveaus auf Letalitätstemperatur
- einer etwa gleichmäßig über den Gesamtquerschnitt verteilten Aufheizung
- einer vollständigen Behandlung des zum Verbleib vorgesehenen befallenen Materials

Um diese Punkte zu gewährleisten, sind die Befallsgrenzen sorgfältig zu bestimmen. Weiterhin ist die Durchwärmung durch ein entsprechendes Mess- und Überwachungsregime zu kontrollieren. Bei der Anordnung der Mess-Sonden sind repräsentative Mess-Stellen zu wählen, Fehlstellen durch Reflexion oder Transmission sind zu lokalisieren und mit geeigneten Mitteln auszuschalten oder gesondert zu behandeln. Jahreszeitliche und raumklimatische Bedingungen sind von untergeordneter Bedeutung, da die Abtötung durch Erwärmung und nicht durch Aufnahme letaler Mengen von Wirkstoffen erfolgt. Der Einsatz von Wärmedämm-Material kann hinsichtlich der Durchwärmungszeiten und des Temperatenausgleiches erhebliche Vorteile erbringen. Das Mikrowellenverfahren hat gleich allen thermischen Verfahren keine vorbeugende Wirksamkeit, demzufolge ist zu entscheiden, ob nach einer Behandlung ein vorbeugend wirksamer chemischer Holzschutz erforderlich wird. Wie bei allen Verfahren und Maßnahmen des Holzschutzes steht auch bei der Anwendung von Mikrowellen die Ausschaltung der Schadens- bzw. Befallsursachen im Vordergrund.

- Bezüglich der bekämpfenden Wirksamkeit der Mikrowellenanwendung gegen holzerstörende Organismen infolge Durchwärmung liegt u.a. der Prüfbericht Nr. 3.2/04/8676/01 des Materialprüfungsamtes Brandenburg vom 02. 12. 2004 vor.

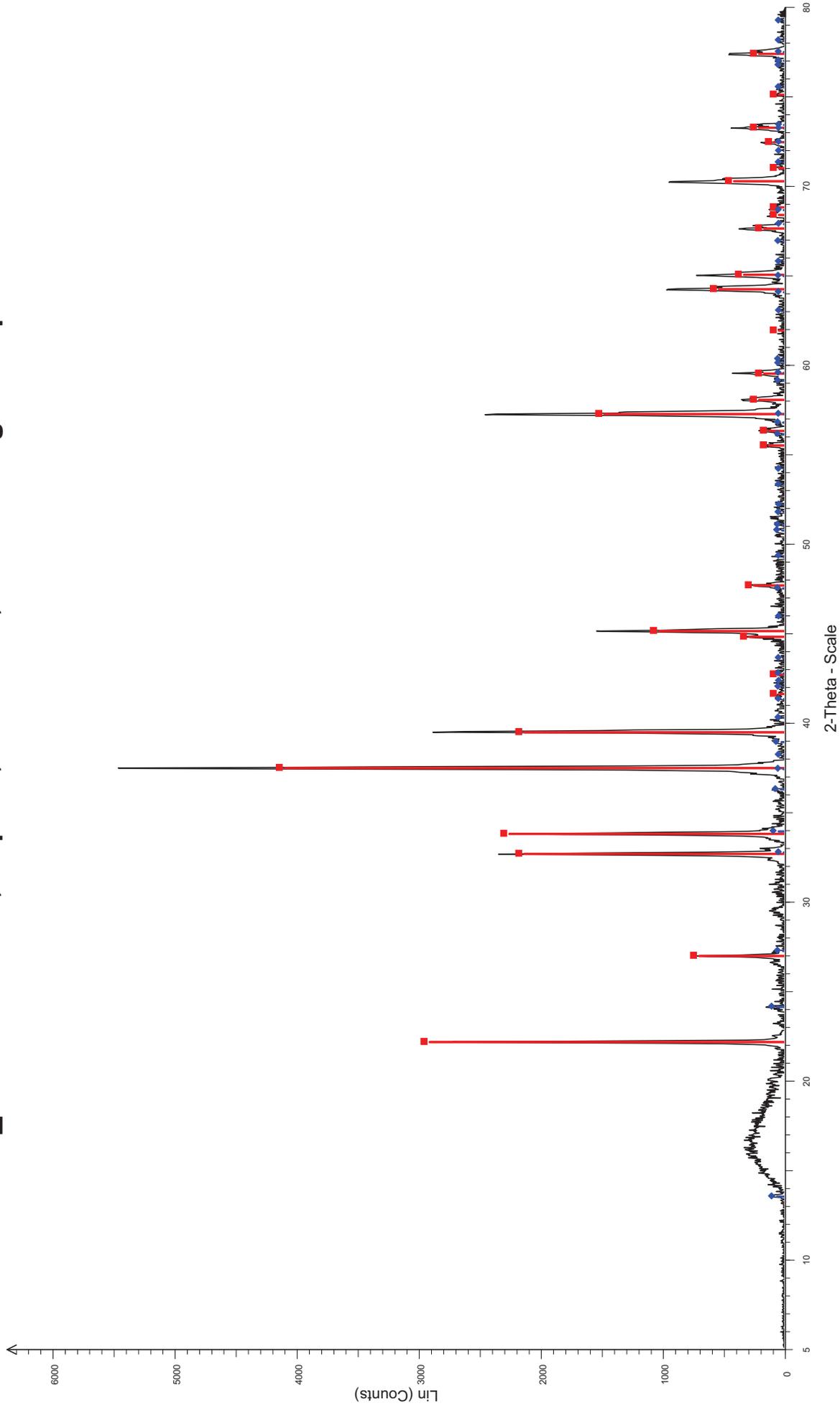
Angebote zum Einsatz von Mikrowellentechnik werden jeweils anwendungsspezifisch erarbeitet. Deshalb ist eine genaue Kenntnis des Anwendungsortes, der Randbedingungen und der Schadenssituation erforderlich. Liegen keine Untersuchungsberichte / Gutachten zu den betreffenden Schäden vor, können derartige Leistungen von der bhd - GmbH übernommen bzw. koordiniert werden. Die Durchführung der Maßnahmen wird einschließlich der Temperaturmessdaten dokumentiert.

# MKT\_ES1 Marienthal, Kapelle, N-Seite, Probefläche Mikrowellentrocknung

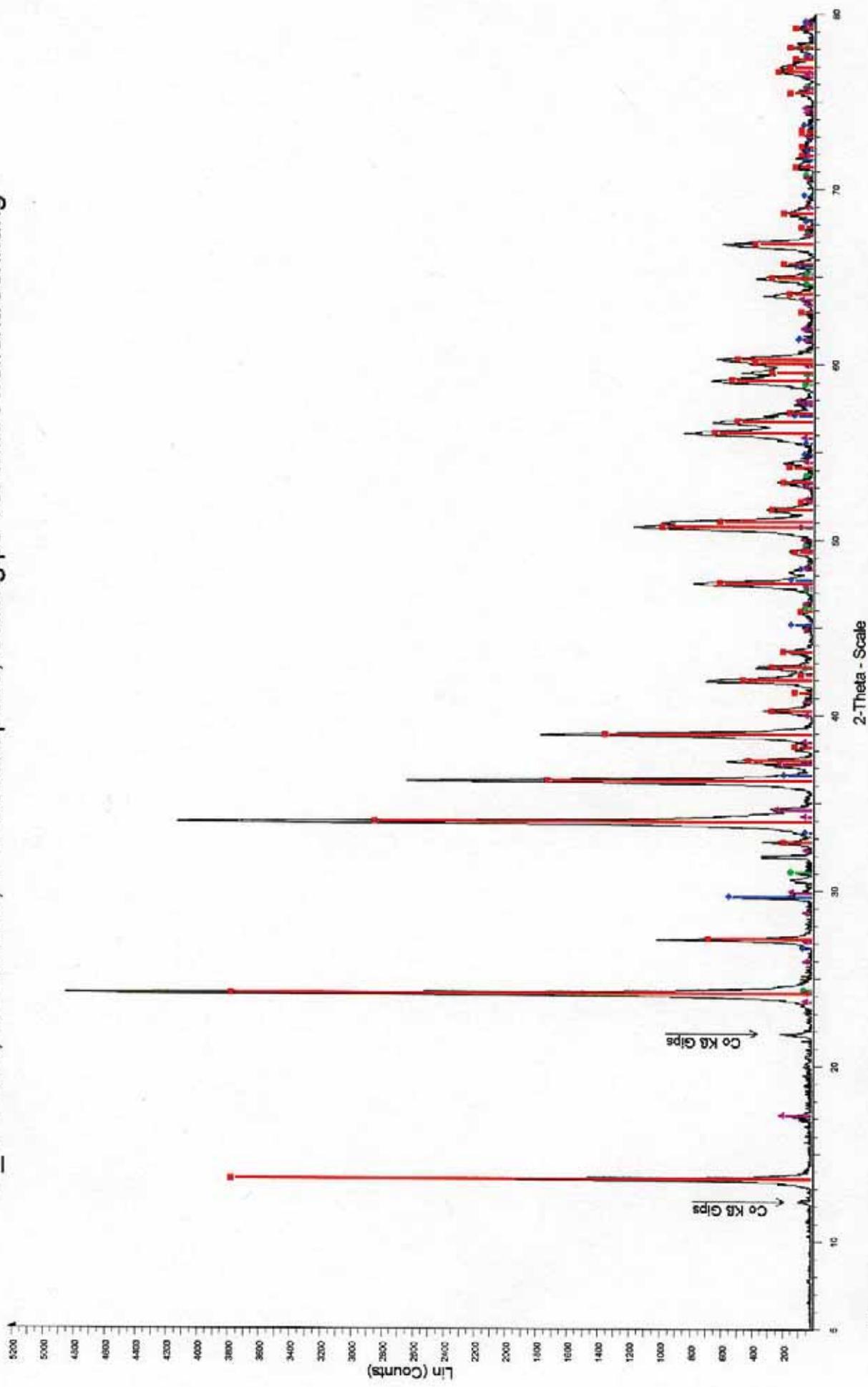


File: 8740 MKT\_ES1.RAW - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.030 ° - Step time: 4. s - WL1: 1.78897 - WL2: 1.79285 - Displ.: 0. mm - Company: TU Dresden Geologie - Creation: 25.10.2010 16:04:11  
000-037-1465 (\*) - Thenardite, syn - Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - Y: 97.92 % - d x by: 1. - WL: 1.78897 - Orthorhombic -  
01-074-1905 (C) - Gypsum - Ca(SO<sub>4</sub>)(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> - Y: 1.57 % - d x by: 1. - WL: 1.78897 - Monoclinic - I/IC PDF 1.9 -  
000-046-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO<sub>2</sub> - Y: 4.18 % - d x by: 1. - WL: 1.78897 - Hexagonal - I/IC PDF 3.4 -

# MKT\_ES2 Marienthal, Kapelle, Altartisch, Ausblüherung auf Gipsstuck

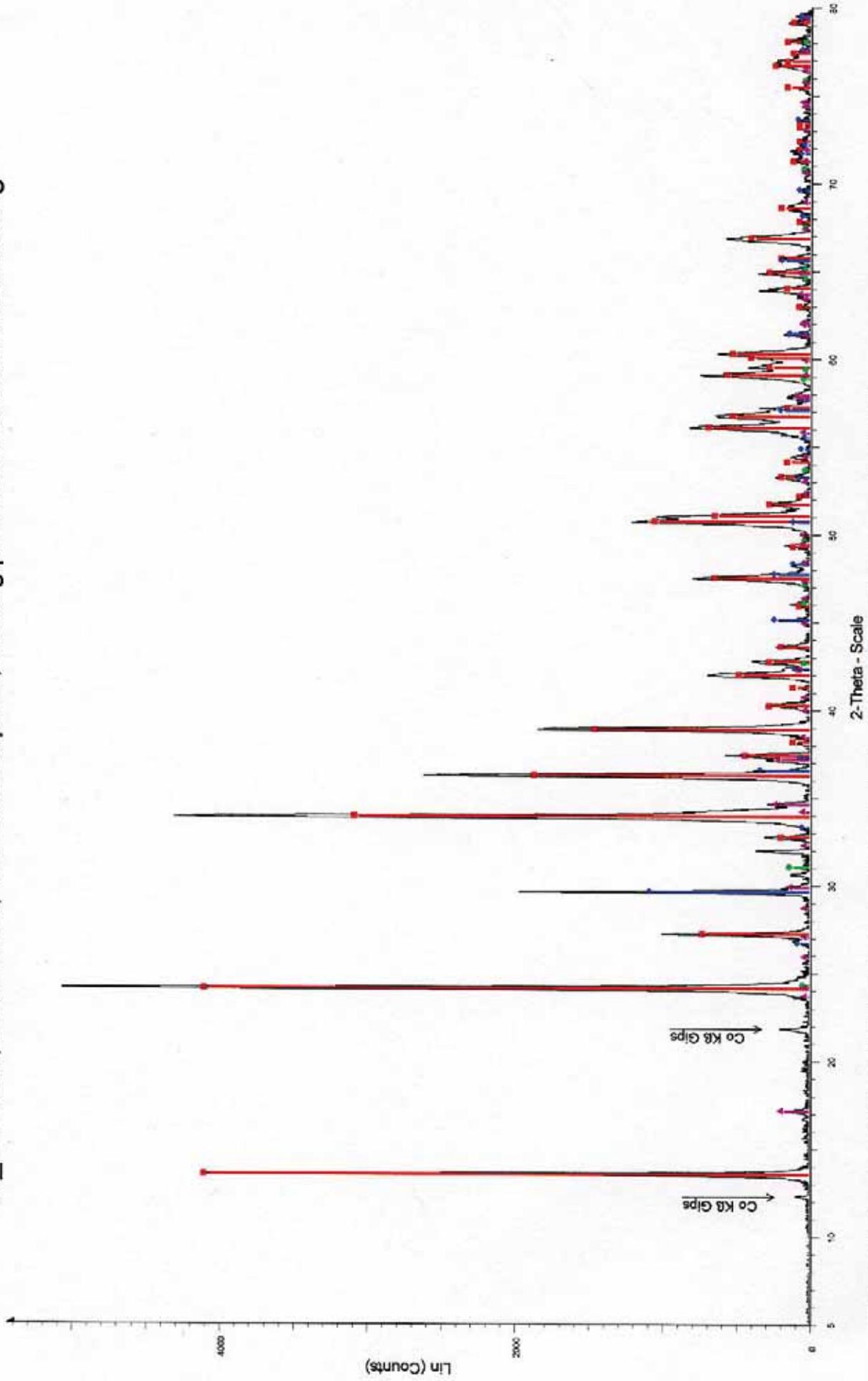


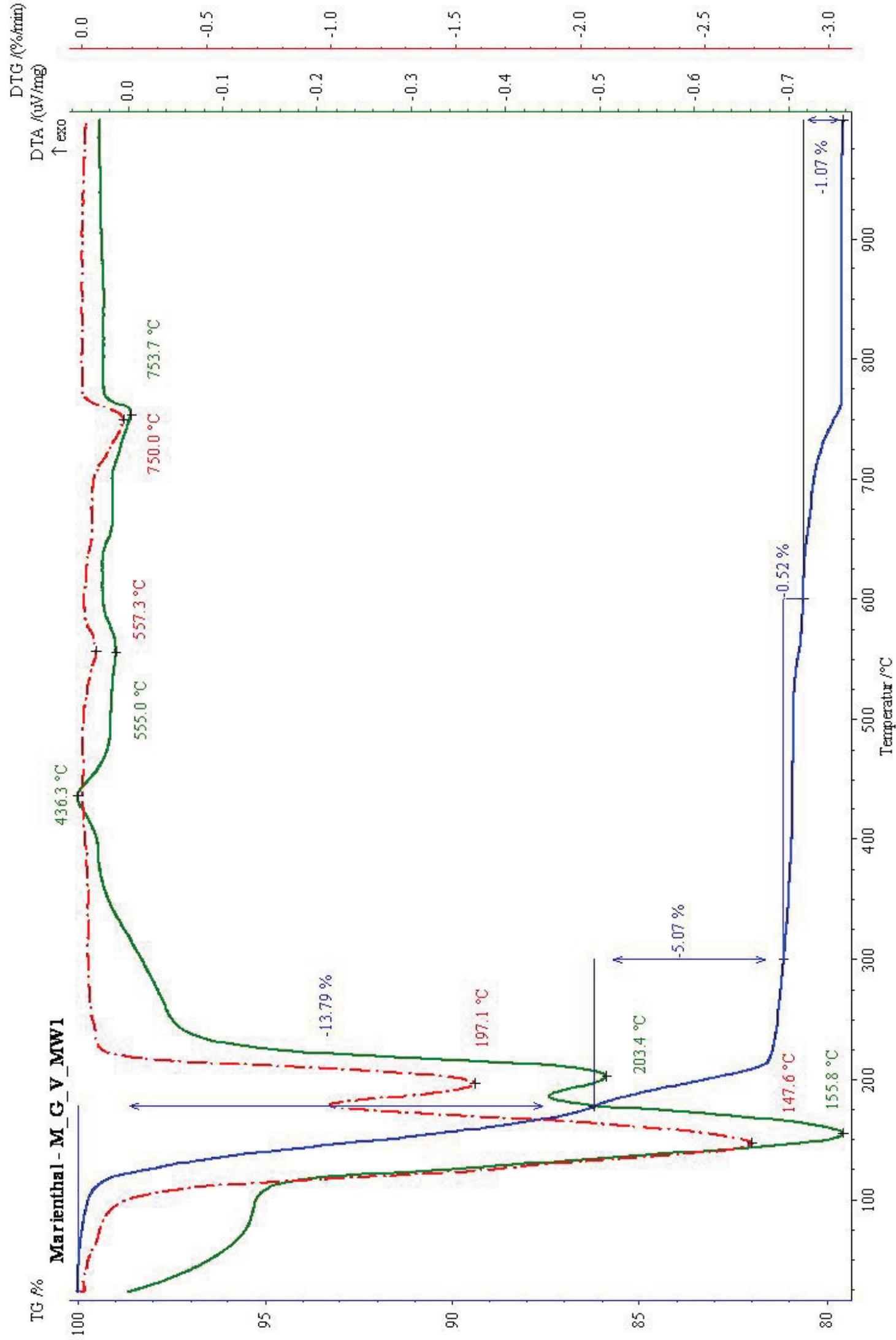
# M\_G v MW, Marienthal, Michaeliskapelle, Stuckgips vor Mikrowellentrocknung

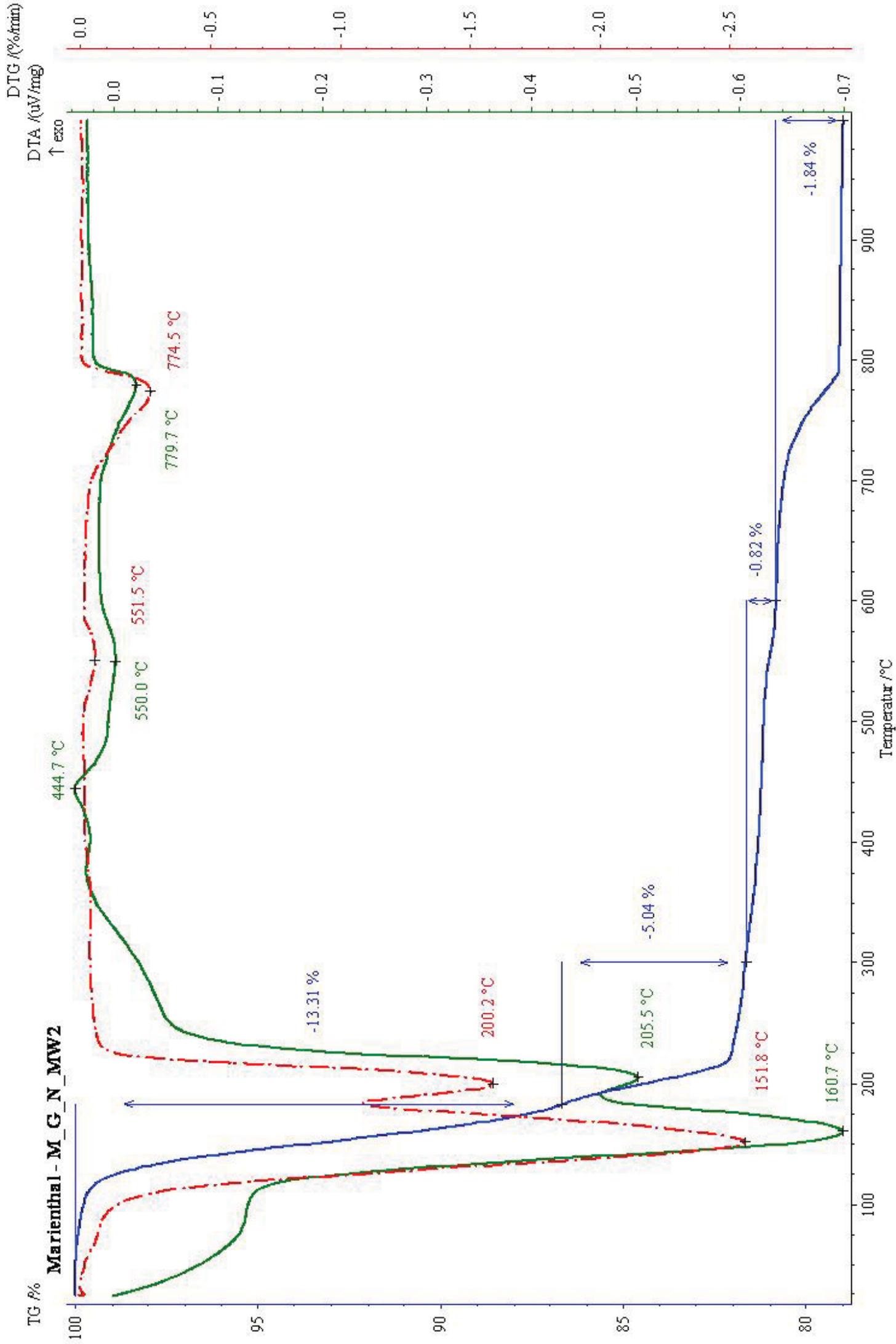


File: 8907 M\_G\_v\_MW\_1.RAW - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.030 ° - Step time: 4. s - WL: 1  
Operations: Background 1.000, 1.000 | Import  
33-0311 (\*) - Gypsum, syn - CaSO4·2H2O - Y: 77.08 % - d x by: 1. - WL: 1.78897  
37-1496 (\*) - Anhydrite, syn - CaSO4 - Y: 10.42 % - d x by: 1. - WL: 1.78897  
46-1045 (\*) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 2.08 % - d x by: 1. - WL: 1.78897  
41-0224 (I) - Bassanite, syn - CaSO4·0.5H2O - Y: 4.16 % - d x by: 1. - WL: 1.78897

# M\_G n MW, Marienthal, Michaeliskapelle, Stuckgips nach Mikrowellentrocknung







**Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.2)**

**Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:**

**Probenbezeichnung:** MK\_WA\_1  
**Datum der Messung:** 27.09.2011  
**Objekt:** Michaeliskapelle, Kloster Marienthal  
**Gestein:**  
**Besonderheiten:** Wasseraufnahmevermögen, linke Seite (neben Klimamessung), HW-Bereich

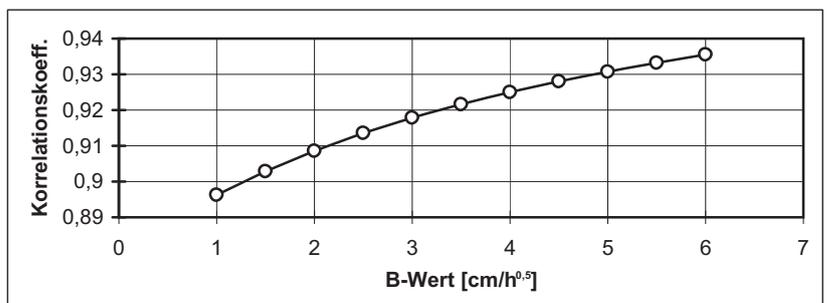
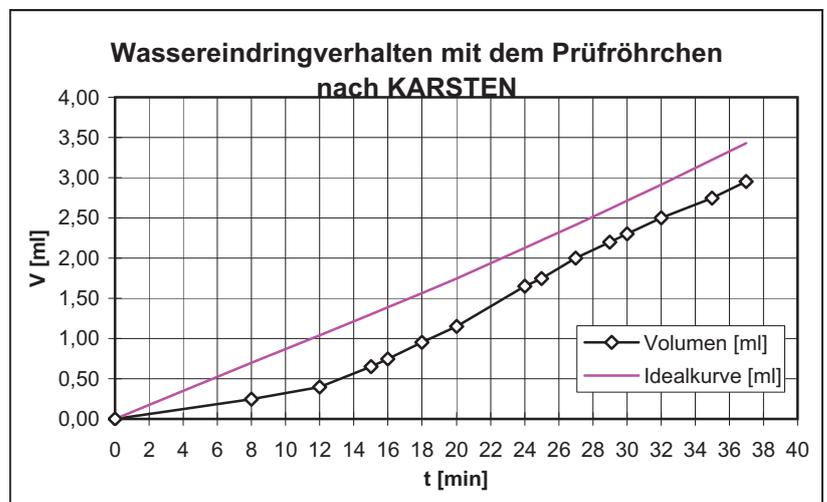
**Meßdaten und Auswertung:**

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]	4,55
Saugfläche (cm <sup>2</sup> ):	16,26

**Abschätzung des B-Wertes**

Untere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	1,00
Obere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	6,00
Schrittweite:	0,50

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	8,00	0,25	
3	12,00	0,40	
4	15,00	0,65	
5	16,00	0,75	
6	18,00	0,95	
7	20,00	1,15	
8	24,00	1,65	
9	25,00	1,75	
10	27,00	2,00	
11	29,00	2,20	
12	30,00	2,30	
13	32,00	2,50	
14	35,00	2,75	
15	37,00	2,95	



**Auswertungsergebnisse**

**Optimierter w-Wert:** 0,38 [l/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>)]  
**Zugehöriger B-Wert:** 6,00 [cm/h<sup>0,5</sup>]  
**WAK:** 0,63 [%]

**Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und  
Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen  
nach WENDLER  
(VERSION 3.2)**

**Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:**

**Probenbezeichnung:** MK\_WA\_2  
**Datum der Messung:** 27.09.2011  
**Objekt:** Michaeliskapelle, Kloster Marienthal  
**Gestein:**  
**Besonderheiten:** Wasseraufnahmevermögen, Sockel unten rechts

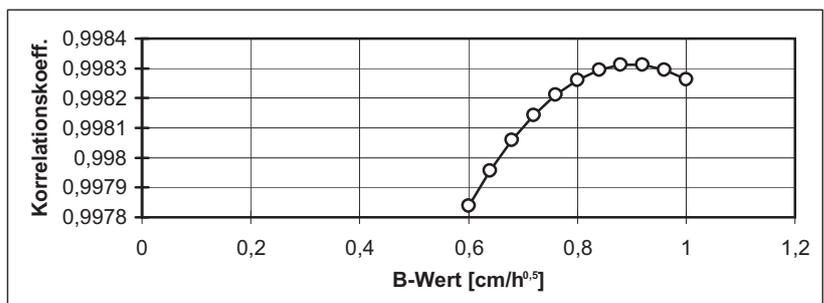
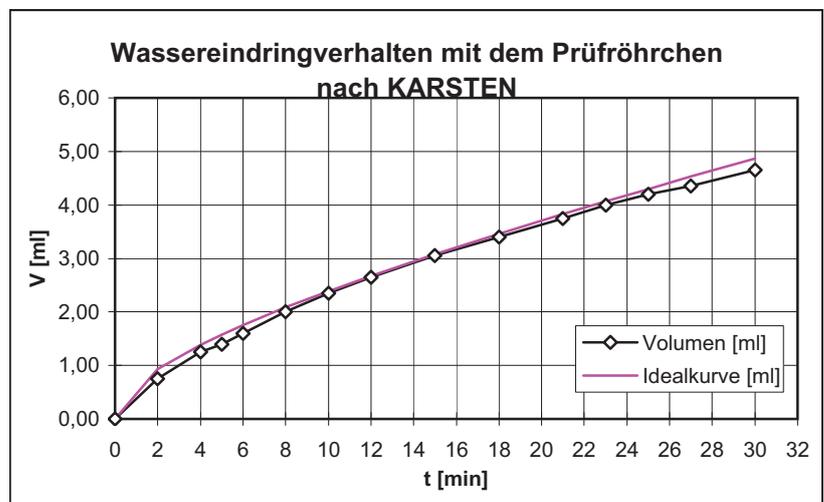
**Meßdaten und Auswertung:**

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]	4,55
Saugfläche (cm <sup>2</sup> ):	16,26

**Abschätzung des B-Wertes**

Untere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	0,60
Obere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	1,00
Schrittweite:	0,04

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	2,00	0,75	
3	4,00	1,25	
4	5,00	1,40	
5	6,00	1,60	
6	8,00	2,00	
7	10,00	2,35	
8	12,00	2,65	
9	15,00	3,05	
10	18,00	3,40	
11	21,00	3,75	
12	23,00	4,00	
13	25,00	4,20	
14	27,00	4,35	
15	30,00	4,65	



**Auswertungsergebnisse**

**Optimierter w-Wert:** 2,81 [l/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>)]  
**Zugehöriger B-Wert:** 0,92 [cm/h<sup>0,5</sup>]  
**WAK:** 30,59 [%]

**Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und  
Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen  
nach WENDLER  
(VERSION 3.2)**

**Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:**

**Probenbezeichnung:** MK\_WA\_3  
**Datum der Messung:** 27.09.2011  
**Objekt:** Michaeliskapelle, Kloster Marienthal  
**Gestein:**  
**Besonderheiten:** Wasseraufnahmevermögen, oben rechts polierte Fläche

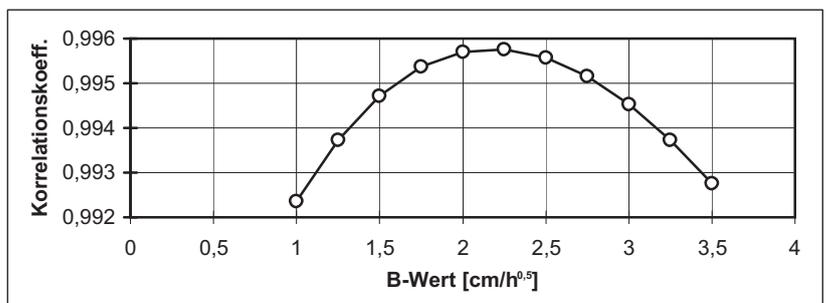
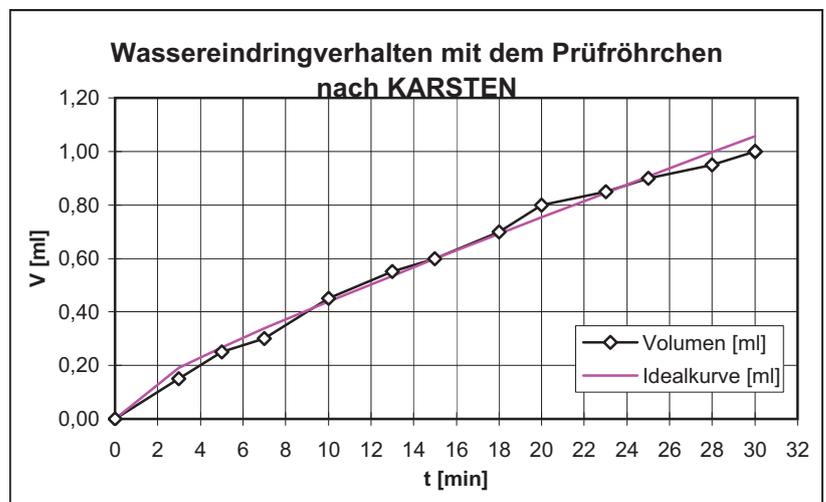
**Meßdaten und Auswertung:**

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]	4,55
Saugfläche (cm <sup>2</sup> ):	16,26

**Abschätzung des B-Wertes**

Untere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	1,00
Obere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	3,50
Schrittweite:	0,25

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	3,00	0,15	
3	5,00	0,25	
4	7,00	0,30	
5	10,00	0,45	
6	13,00	0,55	
7	15,00	0,60	
8	18,00	0,70	
9	20,00	0,80	
10	23,00	0,85	
11	25,00	0,90	
12	28,00	0,95	
13	30,00	1,00	
14			
15			



**Auswertungsergebnisse**

**Optimierter w-Wert:** 0,38 [l/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>)]  
**Zugehöriger B-Wert:** 2,25 [cm/h<sup>0,5</sup>]  
**WAK:** 1,69 [%]

**Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.2)**

**Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:**

**Probenbezeichnung:** MK\_WA\_4  
**Datum der Messung:** 27.09.2011  
**Objekt:** Michaeliskapelle, Kloster Marienthal  
**Gestein:**  
**Besonderheiten:** Wasseraufnahmevermögen, oben links polierte Fläche

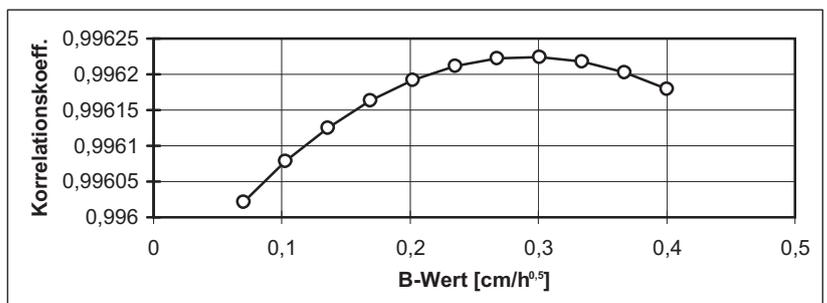
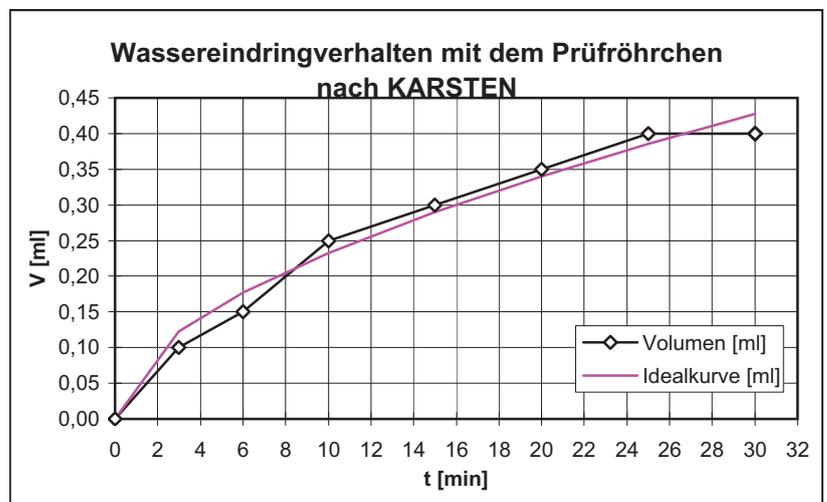
**Meßdaten und Auswertung:**

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]	4,55
Saugfläche (cm <sup>2</sup> ):	16,26

**Abschätzung des B-Wertes**

Untere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	0,07
Obere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	0,40
Schrittweite:	0,03

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	3,00	0,10	
3	6,00	0,15	
4	10,00	0,25	
5	15,00	0,30	
6	20,00	0,35	
7	25,00	0,40	
8	30,00	0,40	
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			



**Auswertungsergebnisse**

**Optimierter w-Wert: 0,32 [l/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>)]**  
**Zugehöriger B-Wert: 0,30 [cm/h<sup>0,5</sup>]**  
**WAK: 10,71 [%]**

**Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und  
Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen  
nach WENDLER  
(VERSION 3.2)**

**Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:**

**Probenbezeichnung:** MK\_WA\_5  
**Datum der Messung:** 27.09.2011  
**Objekt:** Michaeliskapelle, Kloster Marienthal  
**Gestein:**  
**Besonderheiten:** Wasseraufnahmevermögen, mittlere Höhe bei Klimamessung, HW-Bereich

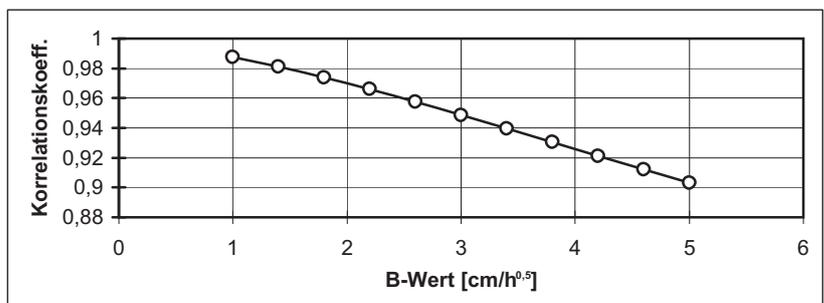
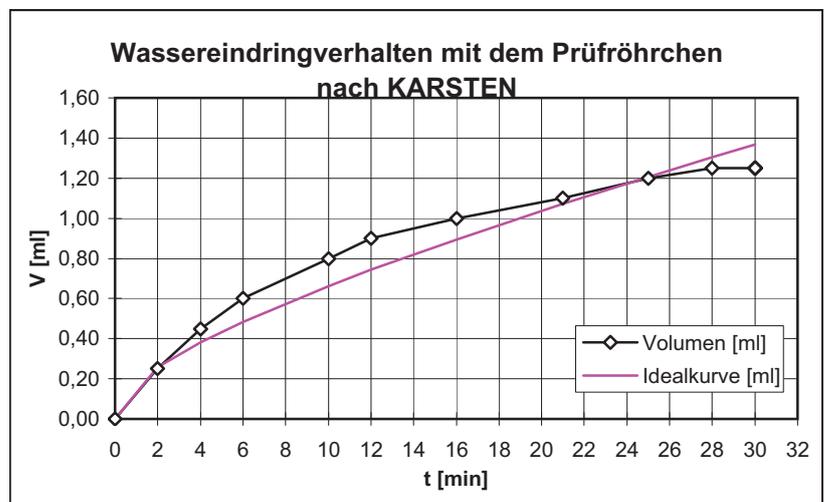
**Meßdaten und Auswertung:**

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]	4,55
Saugfläche (cm <sup>2</sup> ):	16,26

**Abschätzung des B-Wertes**

Untere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	1,00
Obere Grenze [cm/h <sup>0,5</sup> ]:	5,00
Schrittweite:	0,40

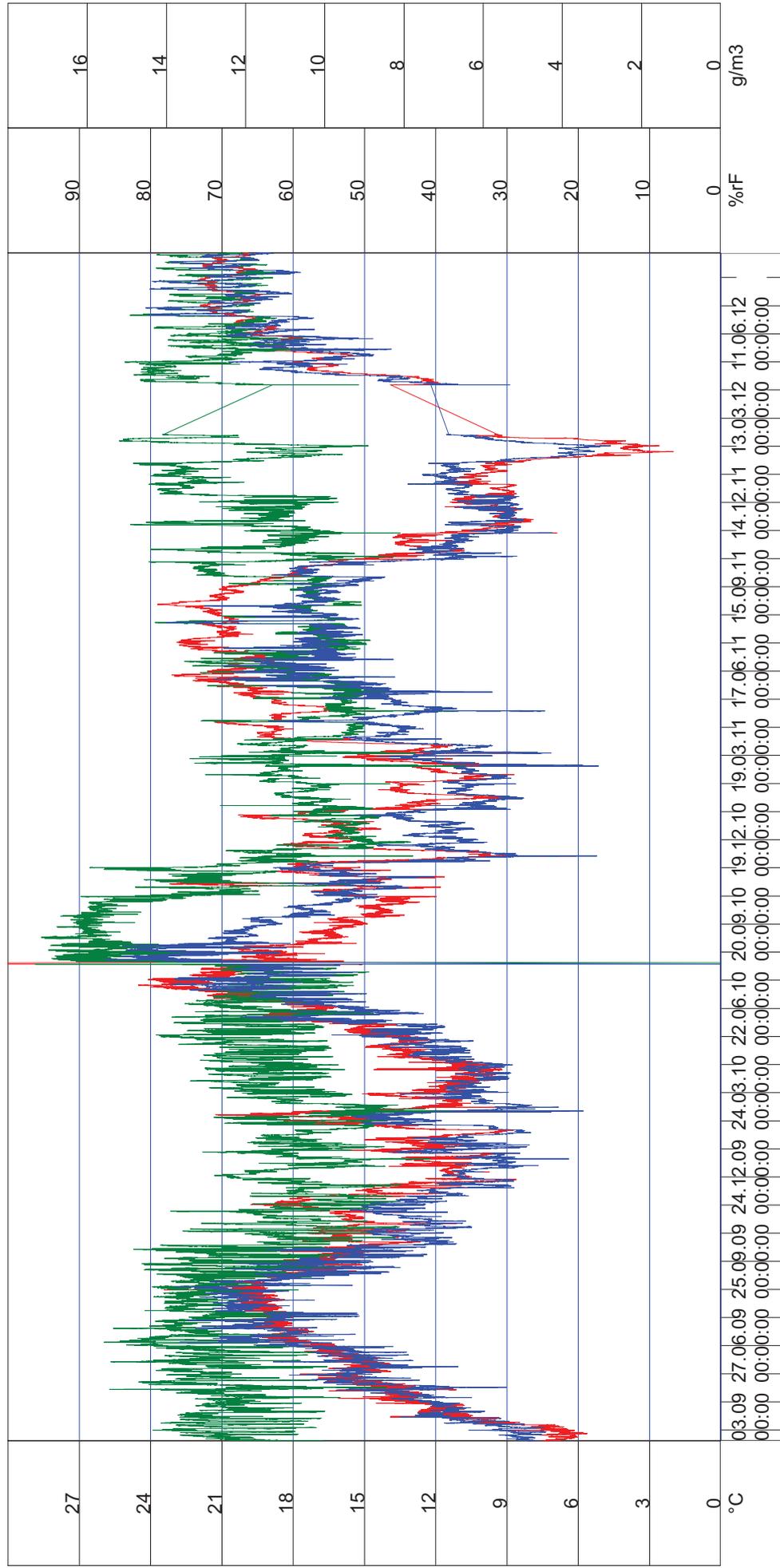
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	2,00	0,25	
3	4,00	0,45	
4	6,00	0,60	
5	10,00	0,80	
6	12,00	0,90	
7	16,00	1,00	
8	21,00	1,10	
9	25,00	1,20	
10	28,00	1,25	
11	30,00	1,25	
12			
13			
14			
15			



**Auswertungsergebnisse**

**Optimierter w-Wert:** 0,77 [l/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>)]  
**Zugehöriger B-Wert:** 1,00 [cm/h<sup>0,5</sup>]  
**WAK:** 7,66 [%]

Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: St. Marienthal - Michaeliskapelle		Seite 1/1
Bedingungen: Diagramm 1				
Kommentar: Raumklima Michaeliskapelle / Zeitraum: 17.03.2009 - 05.09.2012				
rot - Raumlufttemperatur		12-MAR~1 K:3 °C		
grün - rel.LF Raumluft		12-MAR~1 K:4 %rF		
blau - abs.LF Raumluft		12-MAR~1 K:5 g/m3		
Datum: Datum				
Startzeit: 17.03.2009 14:45:00				
Endezeit: 05.09.2012 11:45:00				
Kanäle: 3 (5)				
Meßpunkte: 116370				



Bedingungen: Diagramm 2

Kommentar: Vergleich der relativen Luftfeuchte im Raum und in abgedichteten Bohrröchern

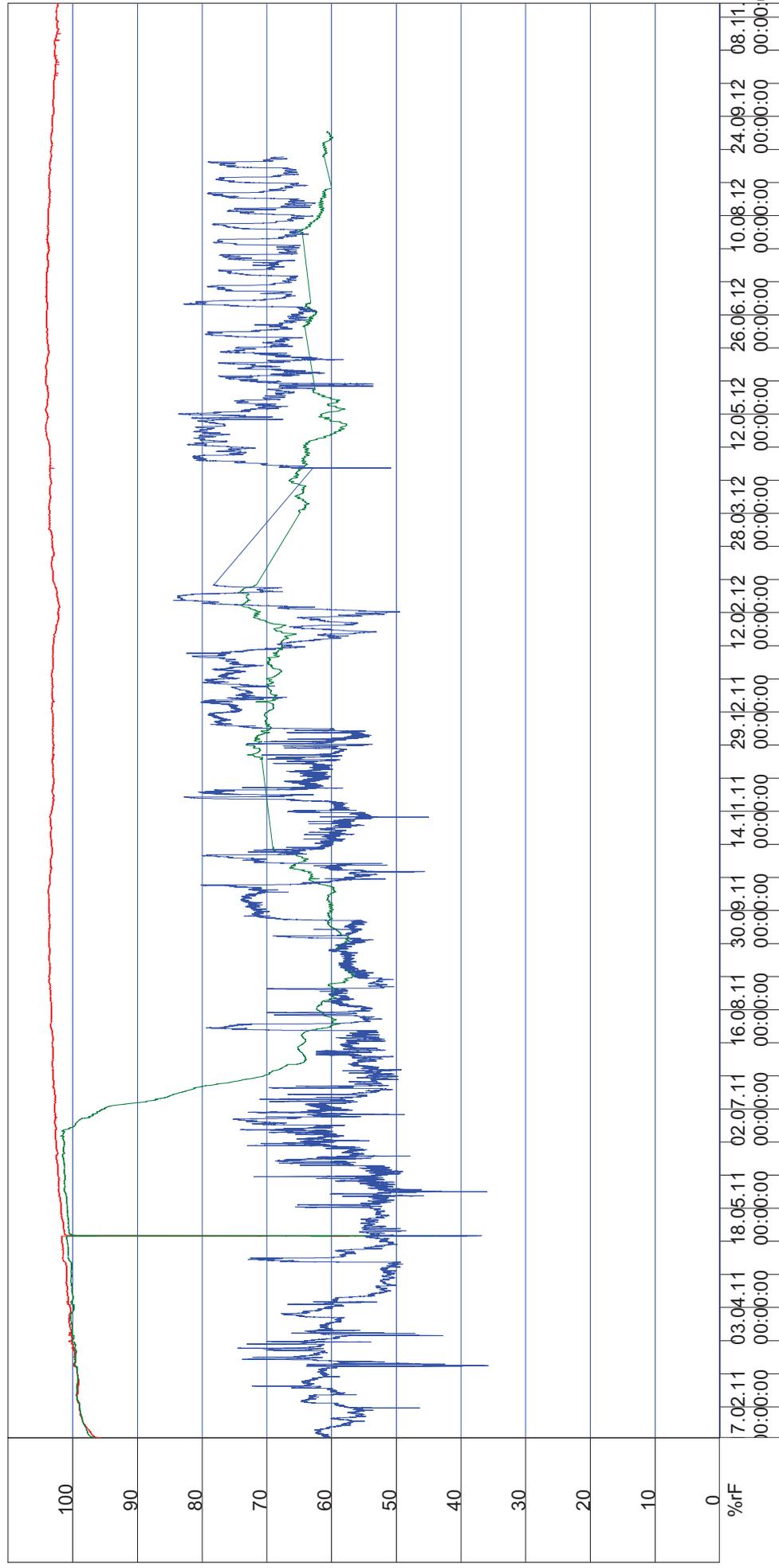
Zeitraum: 03.02.2011 - 14.11.2012

rot - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand oben

grün - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand unten

blau - rel.LF Raumluft

Datum: 19.11.2012	MAR-WA~1 K:4 %rF
Startzeit: 02.02.2011 14:15:00	MAR-WA~2 K:2 %rF
Endezeit: 14.11.2012 10:00:00	12-MAR~1 K:4 %rF
Kanäle: 3 (4)	
Meßpunkte: 69478	



Bedingungen: Diagramm 3

Kommentar: Vergleich der relativen Luftfeuchte im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern

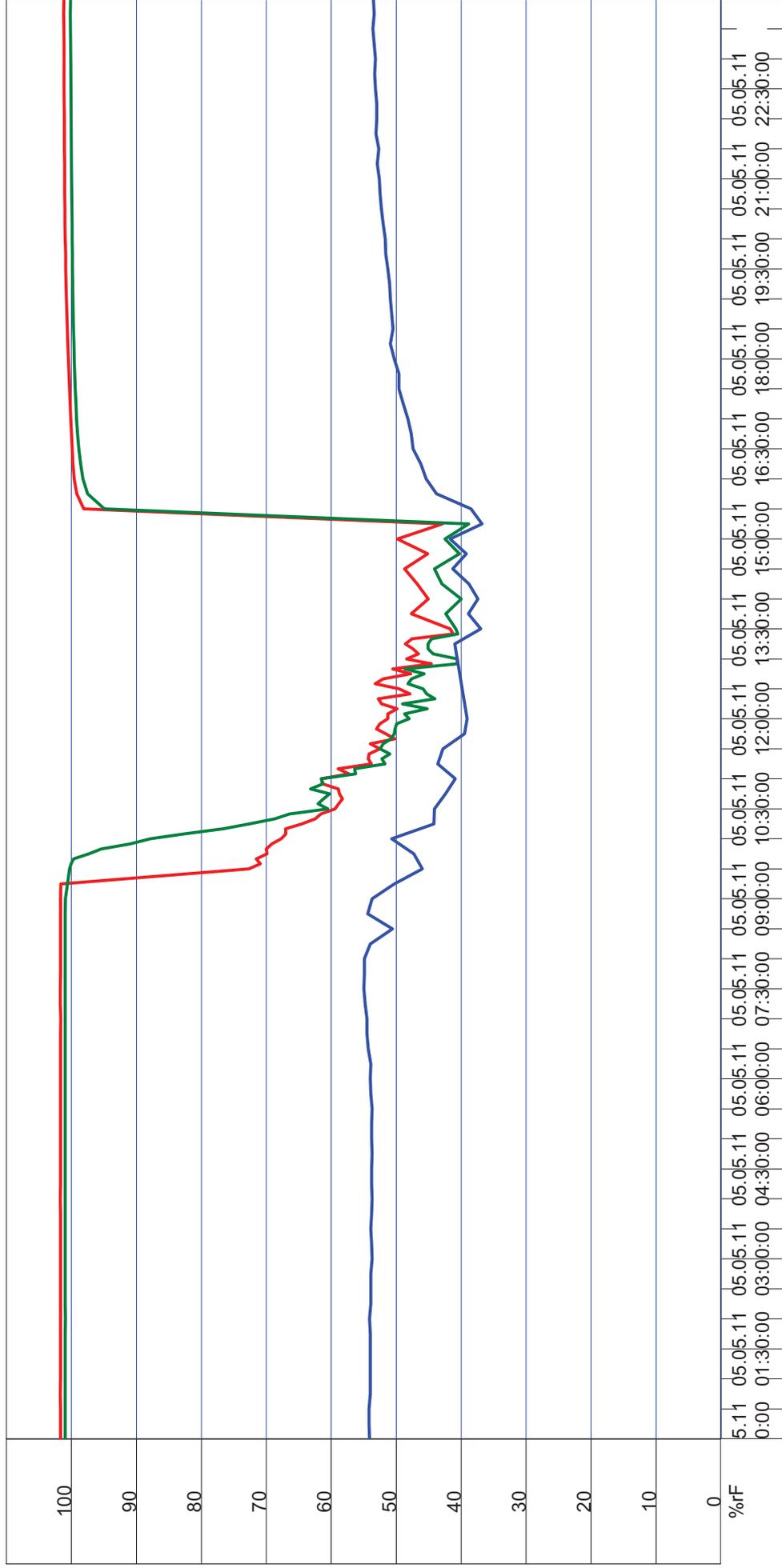
Zeitraum: 05.05.2011 / 1. Versuchstag

rot - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand oben

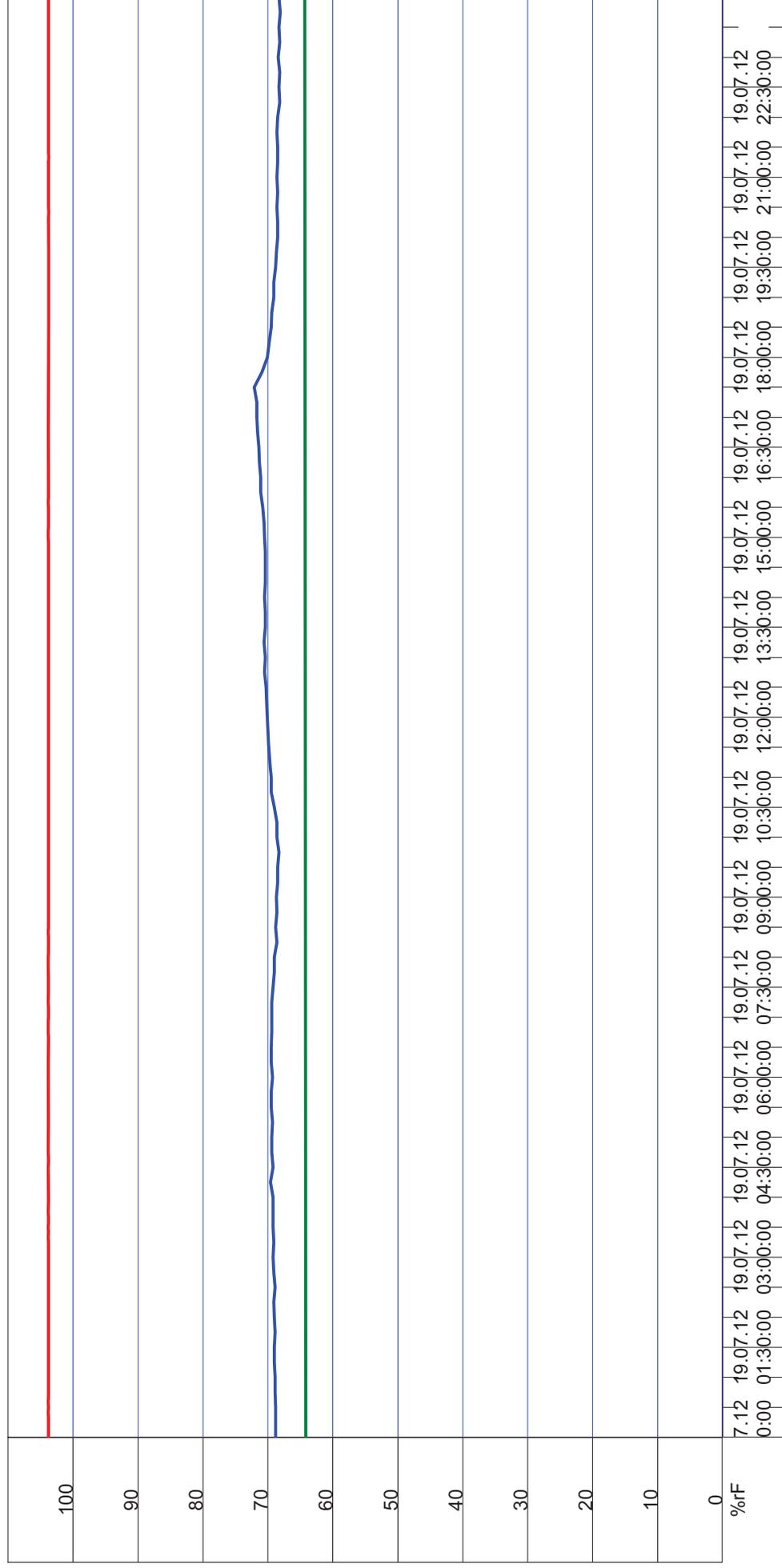
grün - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand unten

blau - rel.LF Raumluft

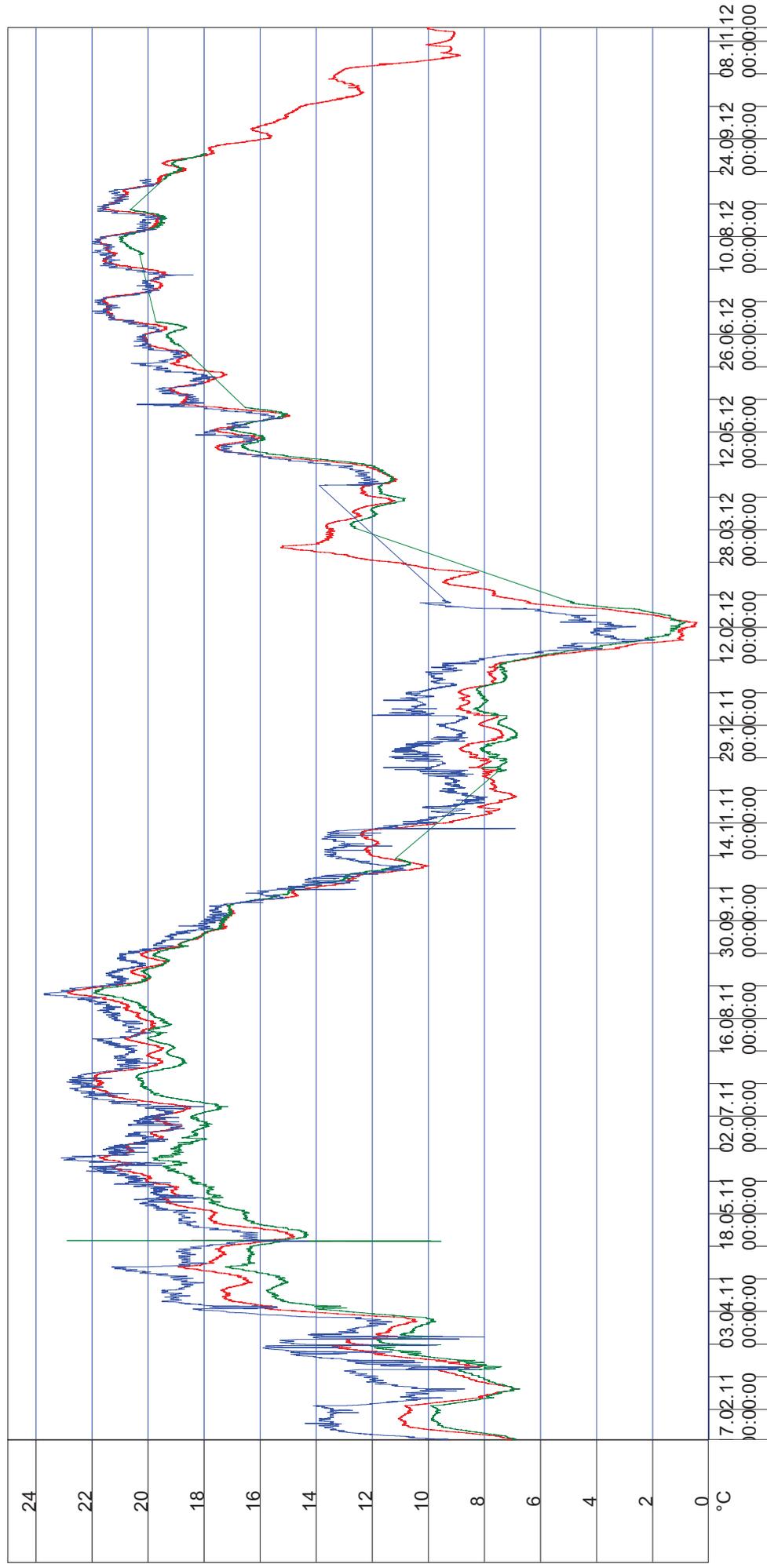
Datum:	19.11.2012	MAR-WA~1 K:4 %rF
Startzeit:	02.02.2011 14:15:00	MAR-WA~2 K:2 %rF
Endezeit:	14.11.2012 10:00:00	12-MAR~1 K:4 %rF
Kanäle:	3 (4)	
Meßpunkte:	69478	



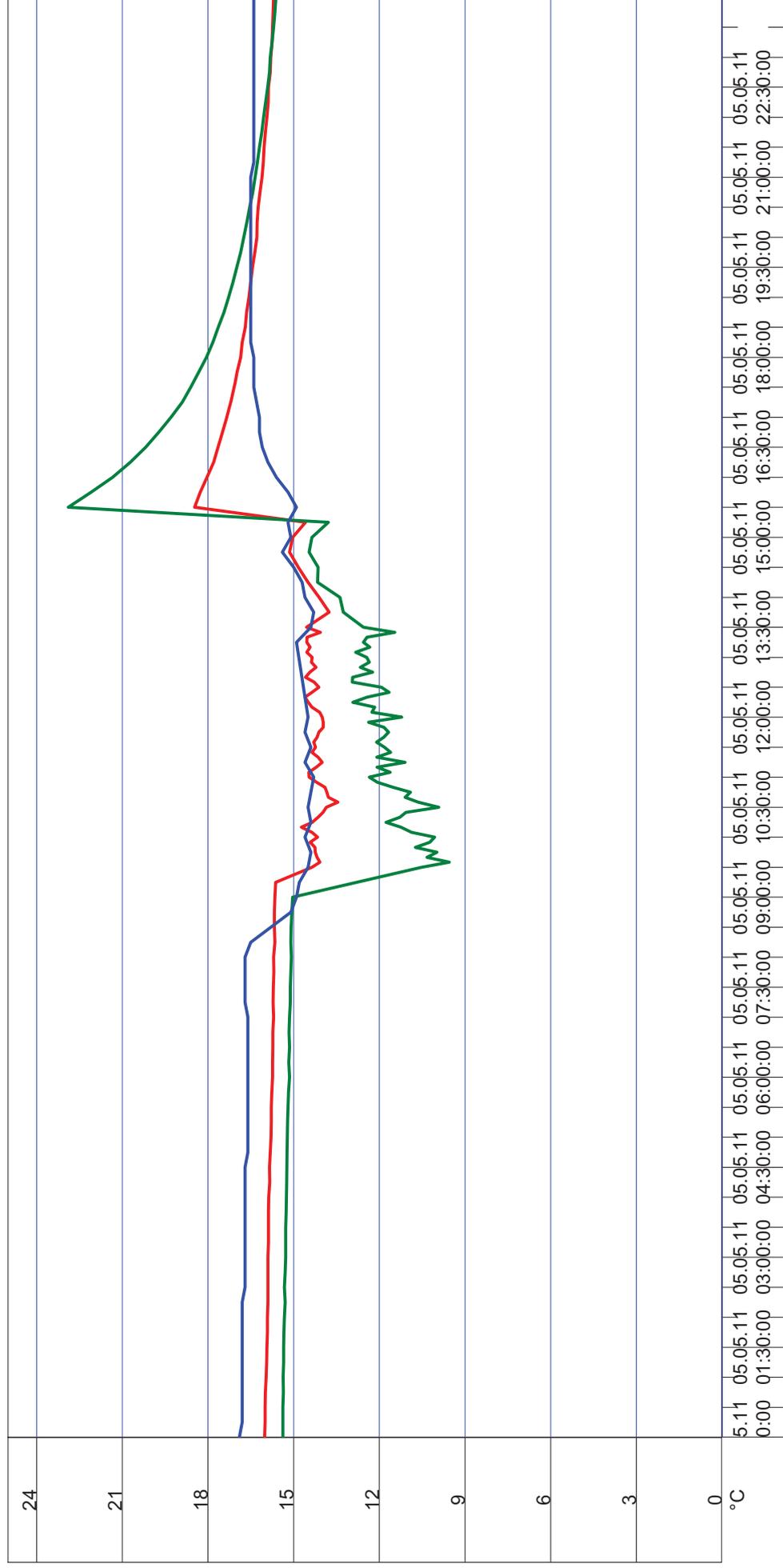
Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: St. Marienthal - Michaeliskapelle		Seite 1/1
Bedingungen: Diagramm 4				
Kommentar: Vergleich der relativen Luftfeuchte im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern				
Zeitraum: 19.07.2012 / 2. Versuchstag				
rot - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand oben				
grün - rel.LF im abgedichteten Bohrloch Wand unten				
blau - rel.LF Raumluft				
Datum: 19.11.2012		MAR-WA~1 K:4 %rF		
Startzeit: 02.02.2011 14:15:00		MAR-WA~2 K:2 %rF		
Endezeit: 14.11.2012 10:00:00		12-MAR~1 K:4 %rF		
Kanäle: 3 (4)				
Meßpunkte: 69478				



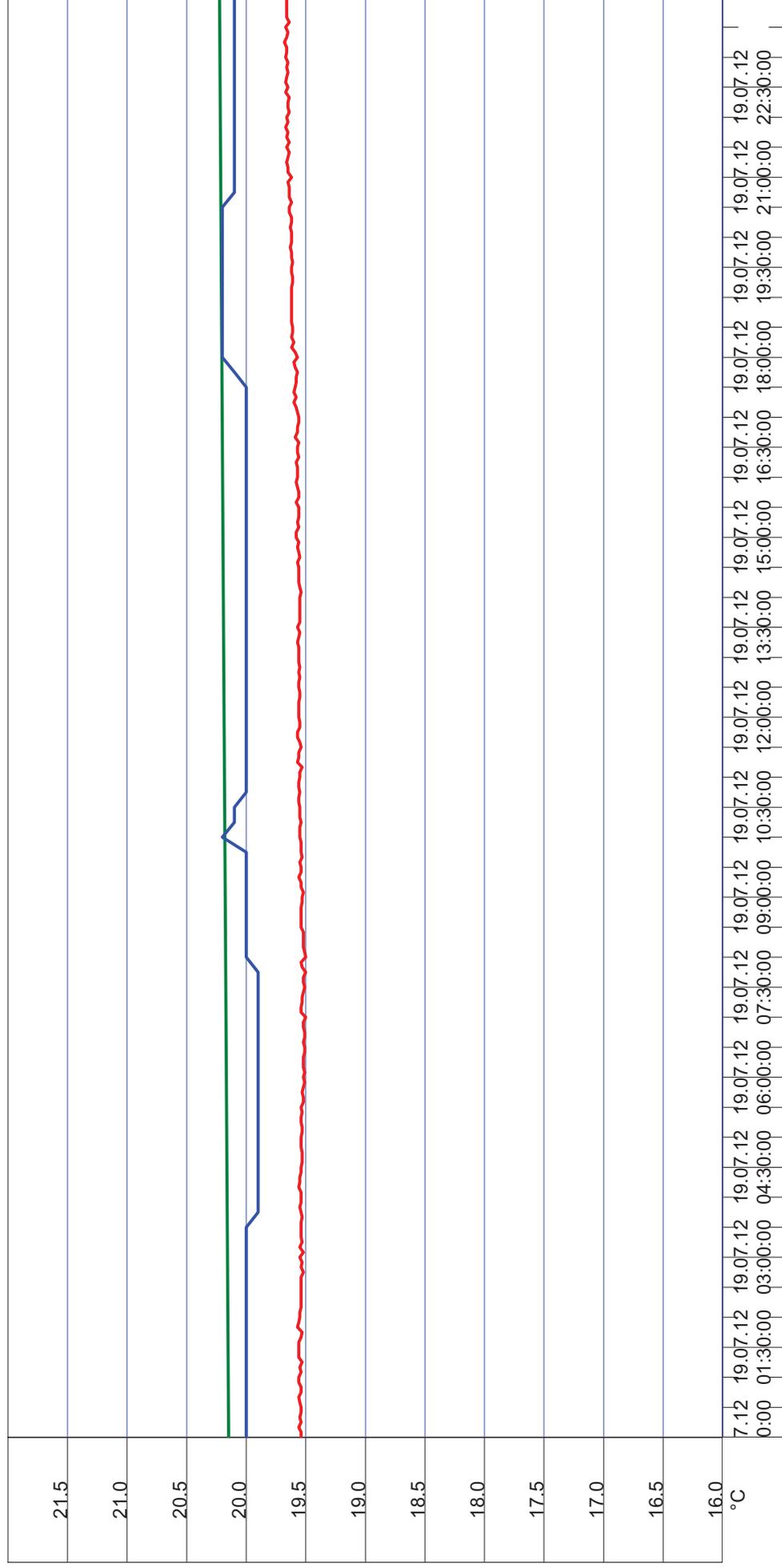
Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: St. Marienthal - Michaeliskapelle		Seite 1/1
Bedingungen: Diagramm 5				
Kommentar: Vergleich der Lufttemperaturen im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern				
Zeitraum: 03.02.2011 - 14.11.2012				
rot	-	Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand oben	MAR-WA~1	K:3 °C
grün	-	Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand unten	MAR-WA~2	K:1 °C
blau	-	Lufttemperatur Raumluft	12-MAR~1	K:3 °C
Datum: 19.11.2012				
Startzeit: 02.02.2011 14:15:00				
Endezeit: 14.11.2012 10:00:00				
Kanäle: 3 (4)				
Meßpunkte: 69478				



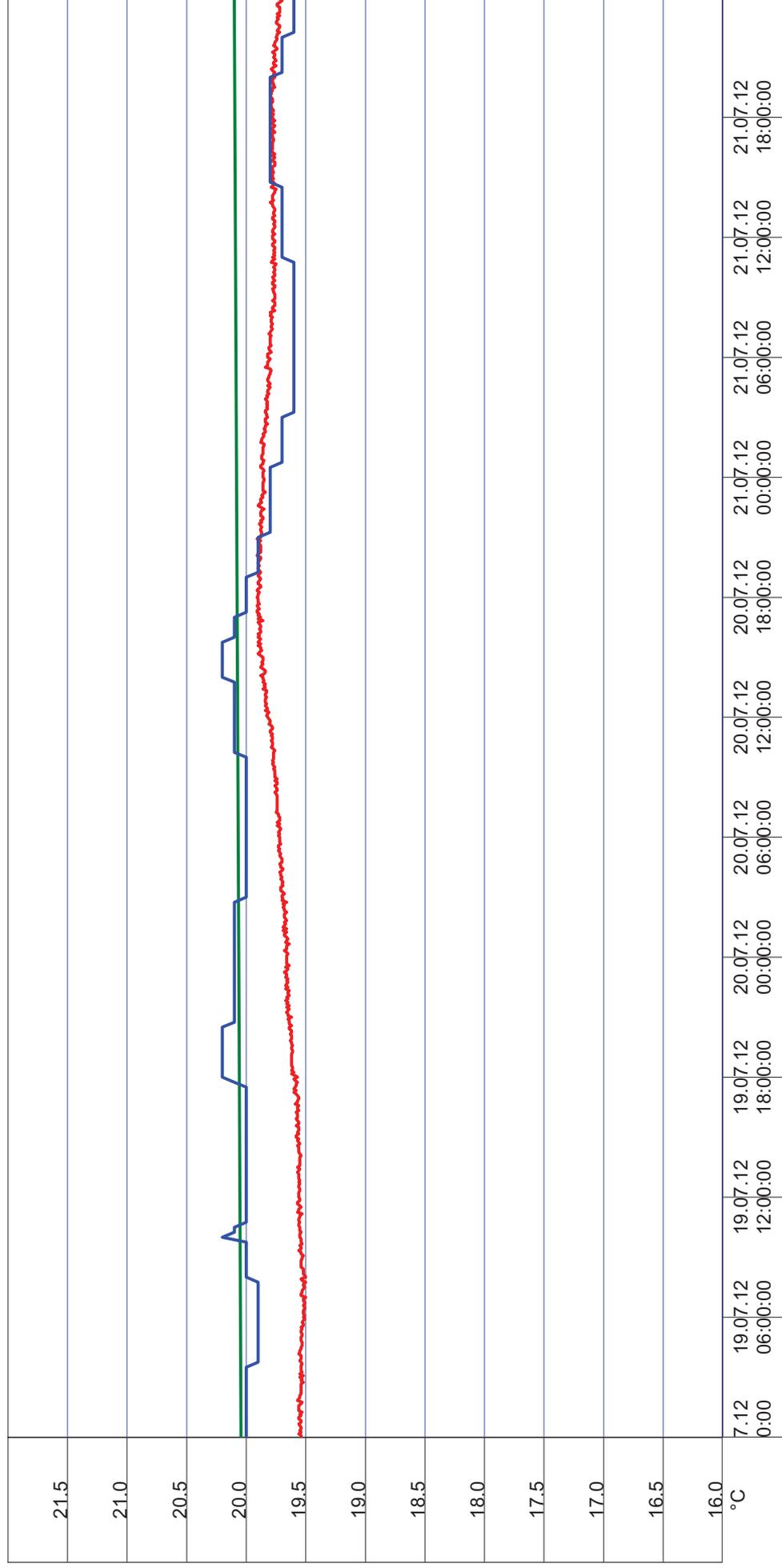
Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: St. Marienthal - Michaeliskapelle		Seite 1/1
Bedingungen: Diagramm 6				
Kommentar: Vergleich der Lufttemperaturen im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern				
Zeitraum: 05.05.2011 / 1. Versuchstag				
rot	- Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand oben			
grün	- Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand unten			
blau	- Lufttemperatur Raumluft			
Datum:	19.11.2012	MAR-WA~1	K:3	°C
Startzeit:	02.02.2011 14:15:00	MAR-WA~2	K:1	°C
Endezeit:	14.11.2012 10:00:00	12-MAR~1	K:3	°C
Kanäle:	3 (4)			
Meßpunkte:	69478			



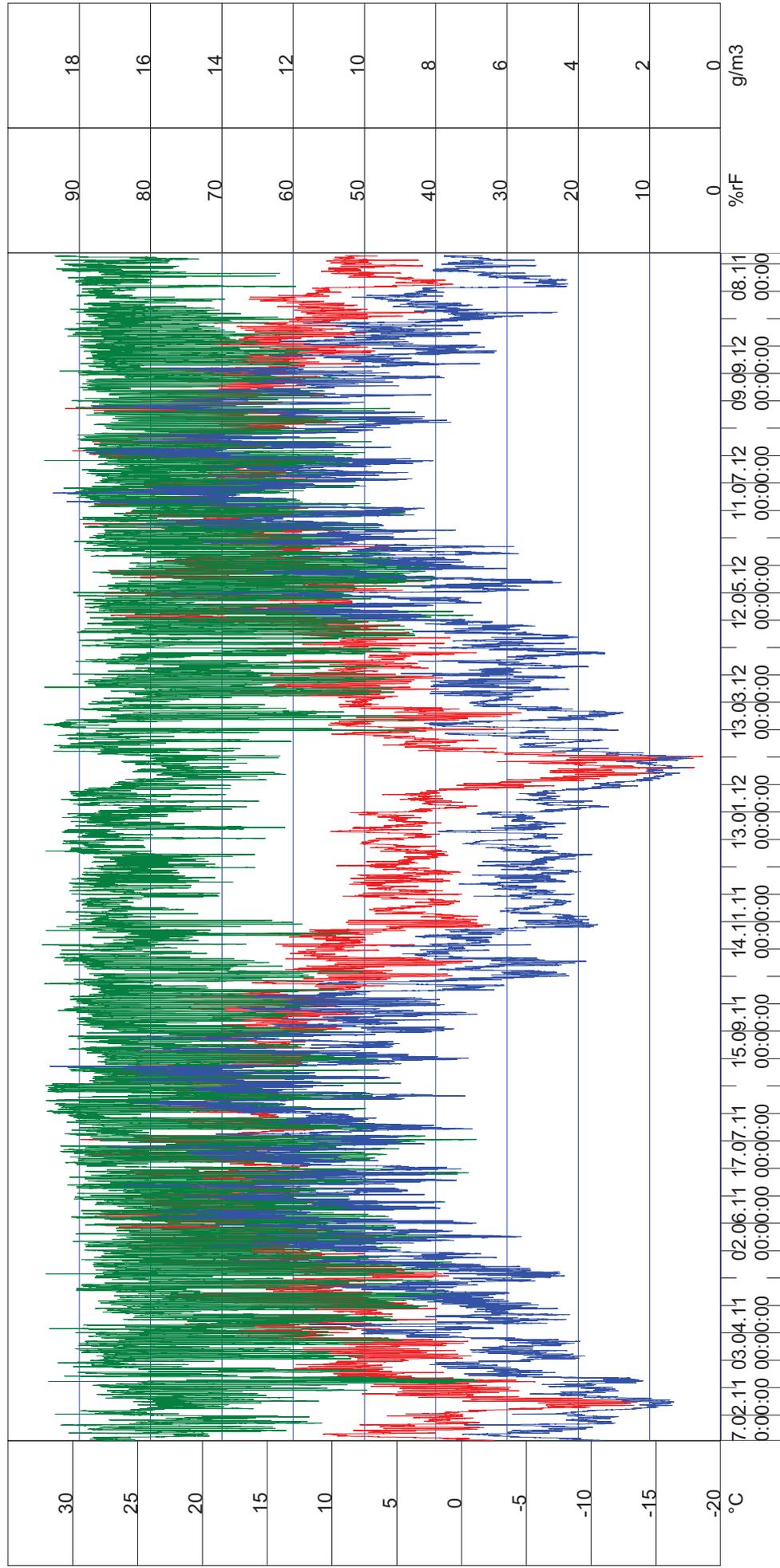
Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: 12-MAR~1		Seite 1/1	
Bedingungen: Diagramm					
Kommentar: Vergleich der Lufttemperaturen im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern					
Zeitraum: 19.07.2012 / 2. Versuchstag					
rot - Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand oben					
grün - Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand unten					
blau - Lufttemperatur Raumluft					
Datum: 19.11.2012		MAR-WA~1 K:3 °C			
Startzeit: 02.02.2011 14:15:00		MAR-WA~2 K:1 °C			
Endezeit: 14.11.2012 10:00:00		12-MAR~1 K:3 °C			
Kanäle: 3 (4)					
Meßpunkte: 69478					



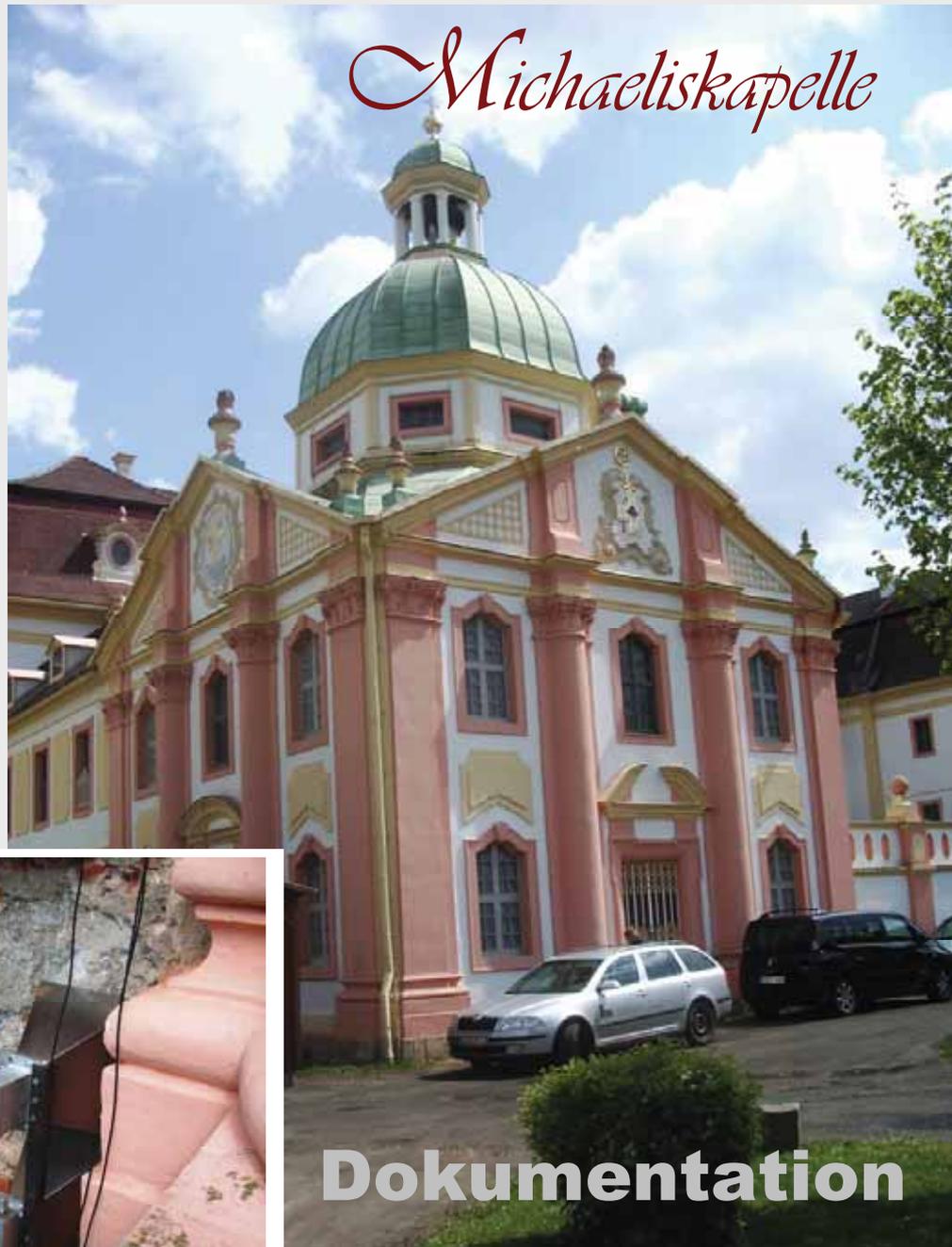
Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: 12-MAR~1		Seite 1/1	
Bedingungen: Diagramm 8					
Kommentar: Vergleich der Lufttemperaturen im Raum und in abgedichteten Bohrlöchern					
Zeitraum: 19.07.2012 - 21.07.2012 / 2. Versuchstag					
rot - Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand oben		Datum: 19.11.2012		MAR-WA~1 K:3 °C	
grün - Lufttemperatur im abgedichteten Bohrloch Wand unten		Startzeit: 02.02.2011 14:15:00		MAR-WA~2 K:1 °C	
blau - Lufttemperatur Raumluft		Endezeit: 14.11.2012 10:00:00		12-MAR~1 K:3 °C	
		Kanäle: 3 (4)			
		Meßpunkte: 69478			



Comfort-Software V2.2: IDK e.V.		Meßort: St. Marienthal - Michaeliskapelle		Seite 1/1
Bedingungen: Diagramm 9				
Kommentar: Außenklima St. Marienthal / Zeitraum: 03.02.2011 - 14.11.2012				
rot - Außenlufttemperatur		1-MAR_~1 K:1 °C		
grün - rel.LF Außenluft		1-MAR_~1 K:2 %rF		
blau - abs.LF Außenluft		1-MAR_~1 K:3 g/m3		
Kanäle:3 (3)		Datum: 20.11.2012		
Meßpunkte:124872		Startzeit:17.03.2009 15:00:00		
		Endezeit:12.11.2012 11:15:00		



*Klosterstift  
St. Marienthal bei Ostritz*



Trocknungsversuche im Wandmauerwerk unter Einsatz der Mikrowellentechnik

Klosterstift St. Marienthal bei Ostritz – Michaeliskapelle  
Trocknungsversuche im Wandmauerwerk unter Einsatz der Mikrowellentechnik

## Inhaltsverzeichnis

1. Dokumentation / Textteil
2. Belegfotos Abbildungen 01 bis 04
3. Tabelle Durchwärmungsverlauf
4. Lageskizze
5. Mikrowellentechnik – Sicherheitsunterlagen
  - 5.1 Betriebsanweisung
  - 5.2 Risikobeurteilung
  - 5.3 Gefährdungsbeurteilung / verbaler Teil
  - 5.4 Erklärung zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung

für die Ausführung vor Ort: gez. A. Eule

für die Zusammenstellung der Dokumentation: gez. A. Schramm

Dresden, am 14. September 2012

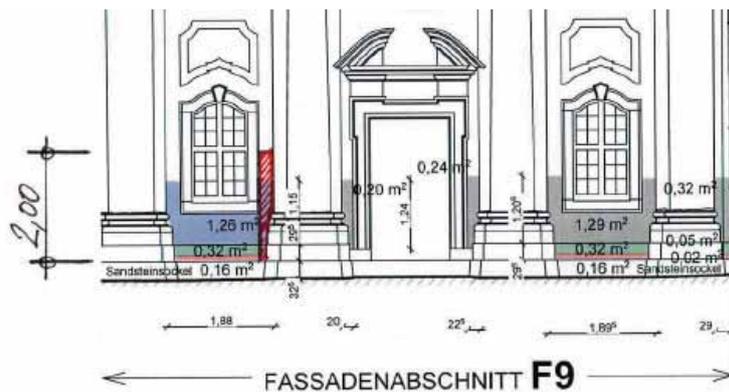
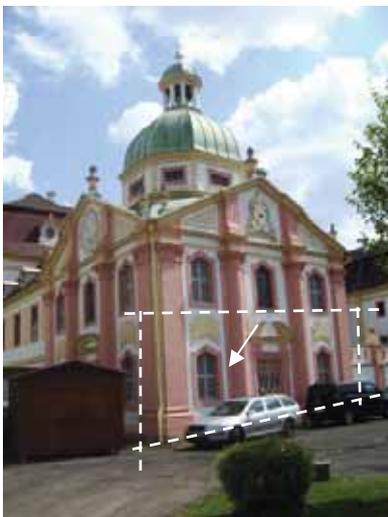
## Klosterstift St. Marienthal bei Ostritz – Michaeliskapelle Trocknungsversuche im Wandmauerwerk unter Einsatz der Mikrowellentechnik

### Dokumentation / Textteil

#### 1. Veranlassung

Am 08.05.2012 wurde von der Bauleitung / ARGE Cieslak – Rentsch ein Angebot zu dem vorher abgestimmten Feldversuch „Mikrowellentrocknung“ (17.04.2912) von der Fa. **bhd** GmbH erbeten. Der Feldversuch sollte im Rahmen des DBU-Projektes „Modellhafte Instandsetzung hochwassergeschädigter, historischer Gipsstuckelemente in der Michaeliskapelle, Kloster St. Marienthal“ unter Leitung des IDK durchgeführt werden.

Zur Ausführung sollte auch eine Dokumentation des technischen Ablaufes mit einer Ergebnisauswertung angefertigt werden. Letzteres konnte seitens der Fa. **bhd** GmbH nur für die anlagenintegrierte Durchwärmungsmesstechnik bzw. deren tabellarisch aufgezeichnete Ergebnisse erfolgen.



(Planauszug ARGE Cieslak – Rentsch mit der Lokalisation der Versuchsfläche / rot eingezeichnet)

Der Versuch war für den 06. Juni 2012 vereinbart worden, musste aber an diesem Tage wegen Starkregen abgebrochen werden. Die Wiederholung erfolgte dann am 19. Juli 2012. Nachfolgender Text beschreibt die technische Ausführung vom 19.07.2012.

#### 2. Anlage

Die Ausführung erfolgte mit einer Einheit (bestehend aus 2 Magnetronen und 2 Horn-Antennen) des Typs MWA – LC 1.1R des Herstellers MTB Mittenwalde, technische Parameter:

Anschluß 230 V / 16 A, Leistung pro Magnetron 0,8 kW, Frequenz 2,45 GHz, Wellenlänge  $\lambda$  12,2 cm.

Über das Steuergerät der Anlage sind bis 4 Temperaturmeßfühler anschließbar, die Temperaturanzeige erfolgt numerisch über ein Display, Anzeigewerte in °C. Die Vorrichtung erlaubt durch Umschalten eine jeweils zeitgleiche Temperaturanzeige / - Ablesung von verschiedenen Meßpunkten. Da kein Datenlogger integriert ist, muß die Aufzeichnung manuell und tabellarisch erfolgen.

Der Wirkmechanismus bei der Mauerwerkstrocknung (bzw. bei der Trocknung mineralischer Baustoffe) beruht auf der Dipolstruktur der Wassermoleküle. Bei der Einwirkung von Mikrowellen werden diese zum Schwingen angeregt, durch die damit erzeugte Molekülreibung entsteht Wärme. Dieser Prozess wird auch bei anderen Stoffen mit bipolarer Molekülstruktur, z. B. Holz (Cellulose – Dipol), in Gang gesetzt.

Zu weiteren Grundlagen der Mikrowellentechnik muß auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

Zur Anlage:



Steuergerät der  
Mikrowelleneinheit



Hornantennen in Arbeitsposition



Temperaturmeßfühler, in spezielle Bohrungen  
eingesetzt

### 3. Trocknungsversuch, äußere Bedingungen

Der Verlauf von Mikrowellen- Trocknungsvorgängen im (Normal-) Mauerwerk ist durch die breite Anwendung bei der Bauwerkstrocknung allgemein bekannt. Für den vorliegenden Fall waren 2 Aspekte ausschlaggebend, einen speziellen Versuch zu begründen bzw. durchzuführen:

#### 1. Inhomogene Mauerwerksstruktur aus verschiedenen Materialien / Steinmaterial und Bindemittel

Es handelt sich bei dem Mauerwerk der Michaeliskapelle um ein Bruchstein-Mischmauerwerk, in dem sowohl Natursteine verschiedener Dichte und Struktur als auch gebrannte Mauerziegel mit z. T. unterschiedlicher Dichte / Porenstruktur verwendet worden sind. Auch die verwendeten Mörtel weisen strukturelle Unterschiede auf. Dazu kommen die Putzmörtel, die z. T. als Putzstuckmörtel (Architekturgliederung) in erheblichen Schichtdicken aufgetragen sind.



Beispiele für Mauerwerksstruktur und Architekturgliederung in der Michaeliskapelle (außen / innen)

#### 2. Grundrißgeometrie, Architekturgliederung

Während bei Standardmauerwerkstrocknungen allgemein von einem weitgehend homogenen Mauerwerk gleicher Dicke (z. B. 2-Stein dickes Kellermauerwerk, / Rohbaumaß alt 51 cm, neu 49 cm) auszugehen ist, sind bei der Michaeliskapelle durch die Grundrißgliederungen wie Nischen, Vorsprünge / Lisenen, Halbsäulen usw. unterschiedlichste Mauerwerksdicken auf im Verhältnis kurzen Längen zu verzeichnen. Das Mauerwerk ist bauphysikalisch in die Gruppe „überschweres Mauerwerk“ einzuordnen.

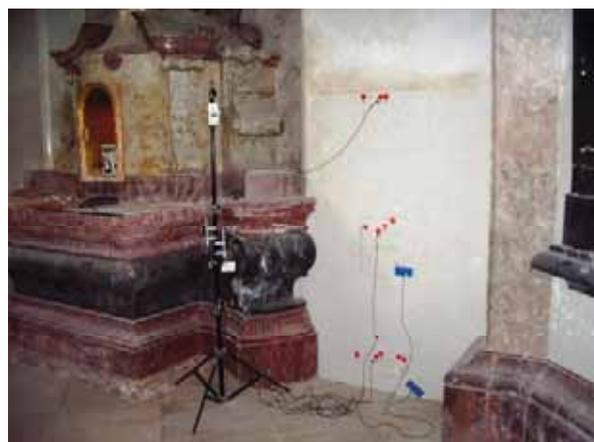
Es war davon auszugehen, dass entsprechend der beschriebenen Struktur- und Geometrieunterschiede mit deutlichen Abweichungen bei der Temperatursausbreitung und damit auch im Trocknungsablauf auftreten werden. Nur wenn es gelingen würde, diese Abweichungen zu erfassen und einen Zusammenhang zwischen Form, Einwirkzeit und Trocknungseffekten zu erkennen, wäre die Bearbeitung eines Modells als Grundlage für eine technisch definierte Ausschreibung zur Mikrowellentrocknung gegeben, die dann allerdings optimiert (Einsatz mehrerer Einheiten) durchgeführt werden müßte.

Mit dem Feldversuch sollte geklärt werden, ob ein solches Modell zu entwickeln ist und damit die Mikrowellen-Bauwerkstrocknung auch hier und bei vergleichbarer Denkmalsubstanz mit technisch vertretbarem Aufwand anwendbar wäre. Außerdem sollte überprüft werden, ob bei diesen äußeren Bedingungen Schadensfreiheit sichergestellt werden kann.

#### 4. Durchführung

Der Trocknungsversuch wurde am 19. Juli 2012 von 8.30 – 18.00 Uhr (Meßzeiten 10.45 bis 17.00 Uhr – siehe Tabelle) von einem sachkundigen und erfahrenen Techniker, Herrn Eule, unter der Anleitung des IDK (Herrn Dr. Franzen und Mitarbeiter) durchgeführt. Vorausgegangen waren seitens des Ausführungsbetriebes Konsultationen mit dem Hersteller der Anlage, Herrn Steinbach. Der Aufbau der Mikrowellentechnik wird in den beigefügten Abbildungen 01 – 04 gezeigt. Bis auf die unmittelbaren Temperaturmessungen mit Hilfe der anlagenintegrierten Meßvorrichtung wurden alle anderen Messungen vom IDK mit institutseigener Meßtechnik realisiert. Vom Ausführenden wurde vermittelt einer Wärmebildkamera die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche zur allgemeinen Kontrolle mit überwacht, das IDK setzte eine eigene Wärmebildkamera ein.

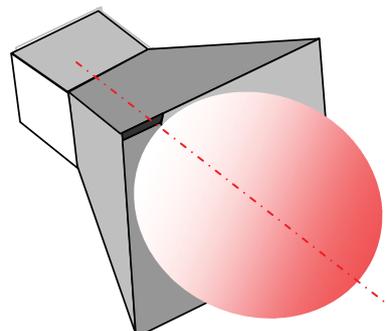
Der Durchwärmungsverlauf ist in der beigefügten Tabelle dokumentiert, das Manuskript dazu befindet sich bei den Unterlagen des Ausführenden. Es wurde im oberen Teil der angegebenen Versuchsfläche begonnen und die Durchwärmung nach unten fortlaufend fortgesetzt. Technische Probleme bzw. Anomalien traten nicht auf.



Probeentnahme im späteren Durchwärmungsbereich (IDK)

Messpunkte an der Innenwand (gegenüber des MW- Eintrages (IDK))

Antennenstellung 1 (Doppelstellung), unten die Kabel der Temperaturmeßfühler



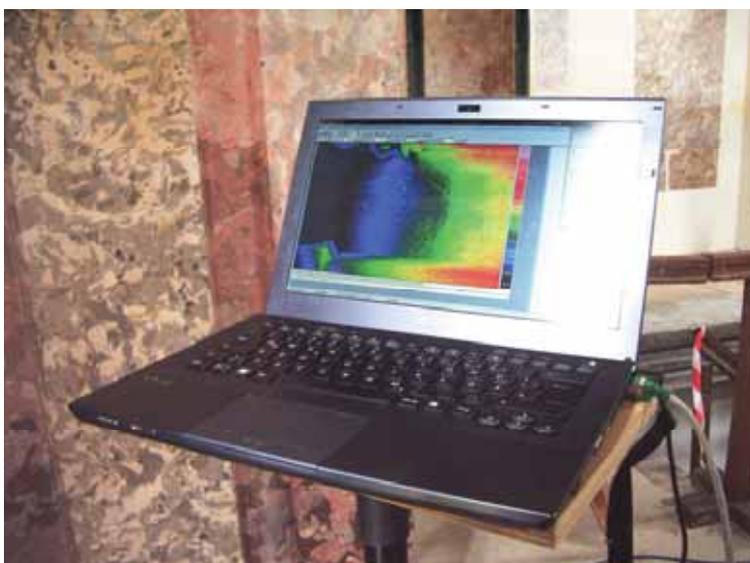
Wirkungsfeld der Mikrowellen beim Austritt aus der Hornantenne (schematisch)



Antennenstellung im Sockelbereich zum Ende des Durchwärmungsversuches

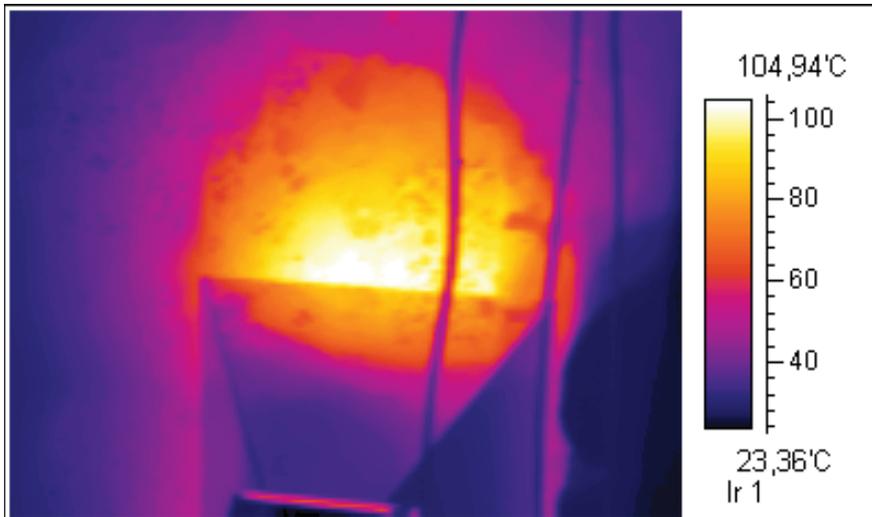


Durchwärmungskontrolle für die Antennenstellung im oben gezeigten Bild

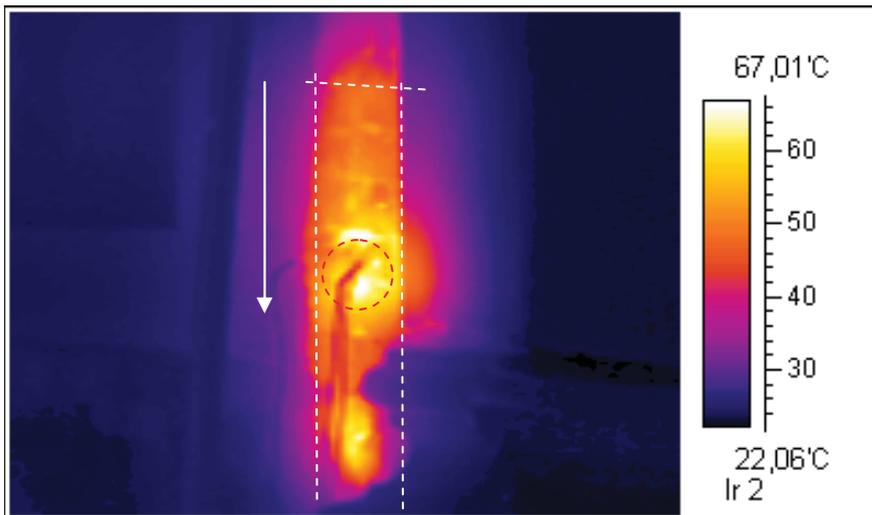


Temperaturüberwachung / Kontrollstand im Bauwerksinneren (DK)

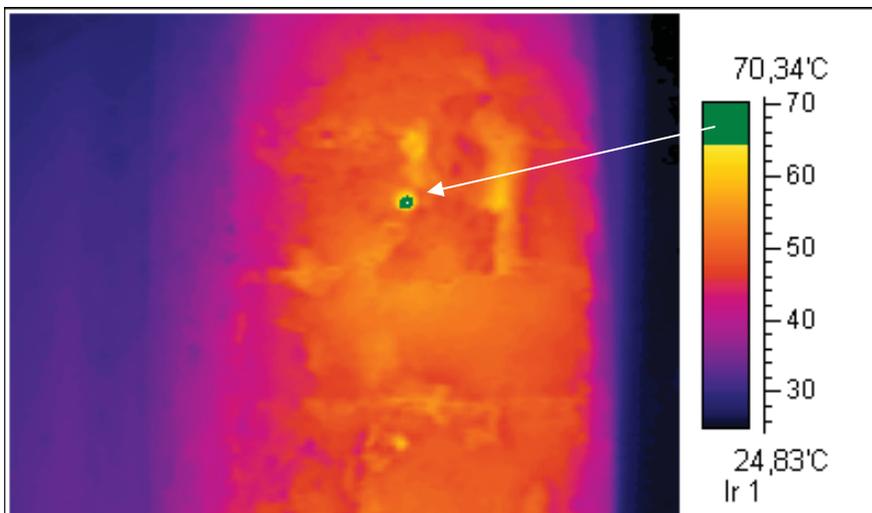
Verschiedene Durchwärmungskontrollbilder / bhd



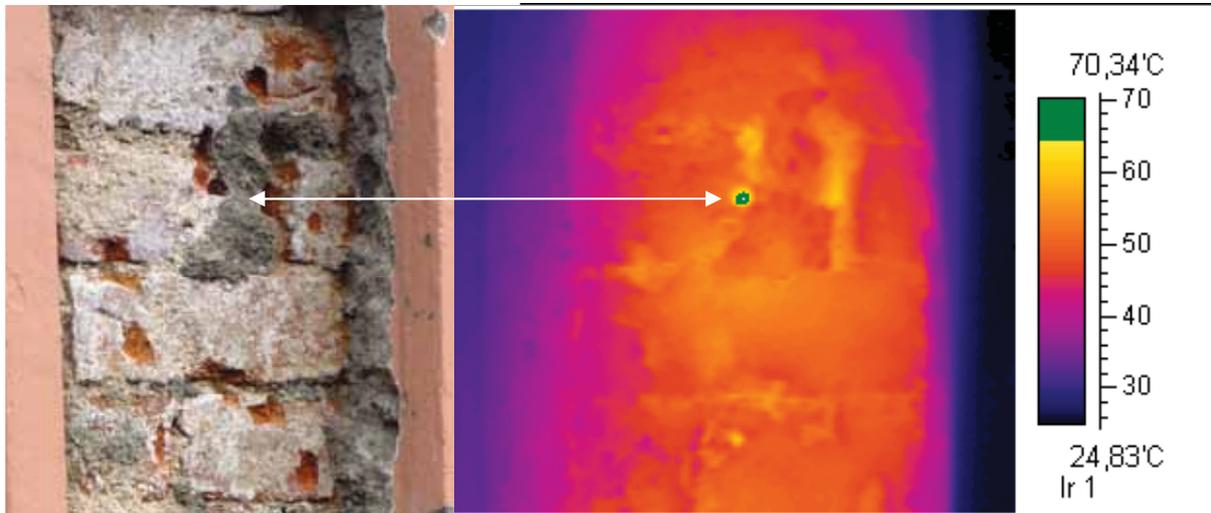
Oberflächentemperaturen unmittelbar nach Umsetzen der Antennen (Versetzen um ½ Antennenhöhe), noch inhomogene Temperaturverteilung



Temperaturausgleich über die Zeitachse nach mehrmaligem Antennenumsetzen. Deutlich erkennbar die temperaturmeßfühler, Meßpunkte 4,5 u.6



Weitgehend ausgeglichene Oberflächentemperaturen, die Mauerwerksstruktur zeichnet sich (undeutlich) ab. Einzelne Hotspots (grün) sind auf punktuelle Materialstörungen zurückzuführen – siehe Folgebild

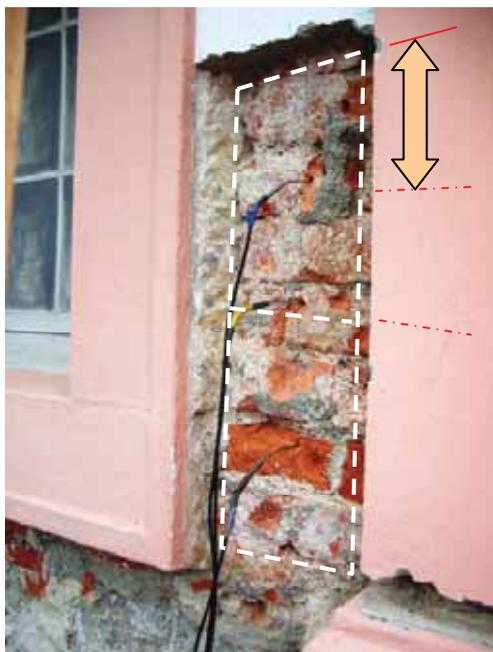


Vergleich des Fotos mit dem Thermogramm. In diesem Mauerwerksbereich sind weitgehend gleichartige Mauerziegel verbaut worden, deshalb zeichnet sich nur das Fugenbild ab (Thermogramm nach erfolgtem Temperaturengleich aufgenommen)

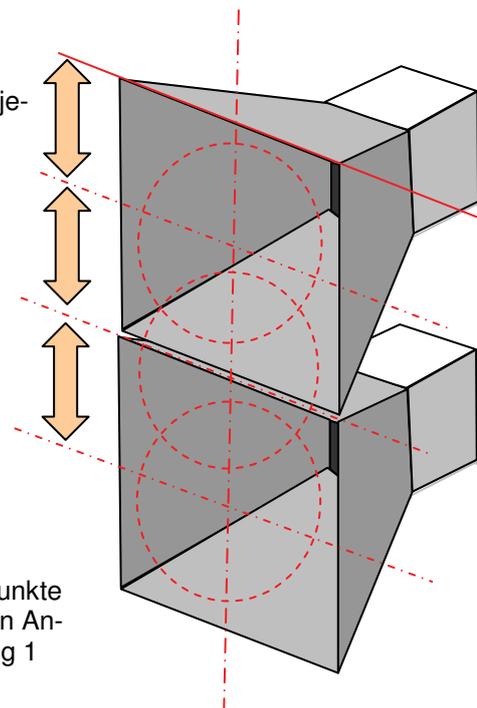
### 5. Temperaturmessung und Tabelle

Die Fläche für den Durchwärmungsversuch war bereits vom Planer festgelegt worden (siehe S. 1 / Planauszug). Meßpunkte / Temperaturmeßsondenanordnung sowie die Meßintervalle wurden unmittelbar vor Ort vom IDK vorgegeben.

Die folgend beigefügte Tabelle zeigt den vom Techniker aufgezeichneten Temperaturverlauf vom Beginn der Durchwärmung um 10.45 Uhr bis zur letzten Ablesung 17.00 Uhr (Sockelzone). Es handelt sich jeweils um Materialtemperaturen in definiertem Abstand von der Oberfläche (Anordnung der Sonden siehe auch Textbilder).



Versatzschritte jeweils 15 cm



Lage der Meßpunkte 1 bis 3 unter den Antennen / Stellung 1

Klosterstift St. Marienthal bei Ostritz – Michaeliskapelle  
Trocknungsversuche im Wandmauerwerk unter Einsatz der Mikrowellentechnik



**Abbildung 01:**  
Versuchsaufbau vom 06.06.2012,  
der Versuch musste wegen Stark-  
regen abgebrochen werden. Der  
Versuchsaufbau am 19.07.2012  
erfolgte analog dazu...

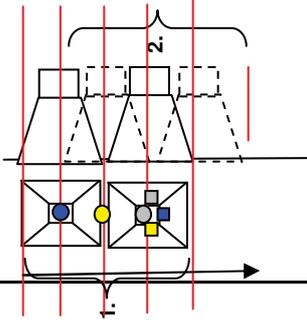


**Abbildung 02:**  
... zur Sicherheit war aber ein  
leichtes Foliezelt errichtet worden.



**Abbildungen 03 und 04:**  
Antennen in der Endstellung des  
Versuches, im Sockelbereich so-  
wie witterungsgeschützt aufge-  
stellte Magnetronen. Der Steuer-  
stand war im Fahrzeug eingerichtet  
worden (siehe Abb.01/ 02)

Bauteil / - Abschnitt		Meßprotokoll Michaeliskapelle											Temperatur (außen / [°C]) : Morgen 17,0 Mittag 22,0 Abend		
Stellung	Startzeit (fortfltd.)	Schaltstufe (G1 / G2)	Temperatur [°C] / elektron. gemessen								Oberfl.- Feuchte / vor Trocknung	Oberfl.- Feuchte / nach Trocknung			
			Meßpkt. 1 Sonde: ● (1)	Meßpkt. 2 Sonde: ● (1)	Meßpkt. 3 Sonde: ○ (1)	Meßpkt. 4 Sonde: ■ (2)	Meßpkt. 5 Sonde: ■ (2)	Meßpkt. 6 Sonde: ■ (2)	Meßpkt. 7	Meßpkt. 8					
	10,45	7/7	21,9	25,0	20,6										
	11,00	7/7	24,9	47,2	42,9										
1	11,15	7/7	27,2	65,9	64,2										
	11,25	9/9	26,5	62,2	64,4										
	11,40	9/9	30,5	60,7	64,2										
2	11,45	9/9	34,3	62,2	64,9										
	12,00	9/9	34,4	60,7	65,2										
	12,15	9/9	38,2	73,3	72,6										
3	12,30	9/9	40,2	79,6	78,6										
	12,40	9/9	41,5	79,2	77,7										
	12,55	9/9	43,5	86,9	85,8										
4	13,00	9/9	45,5	94,2	96,3										
	13,50		42,6	67,0	74,5										
	14,20		41,0	56,3	64,3										
	14,55	9/9							41,1	49,1	56,5				
	15,10	9/9							40,4	45,8	52,4				
5	15,25	9/9							40,2	44,5	51,1				
	15,25	9/9							37,4	45,0	50,1				
	15,40	9/9							37,1	43,9	47,9				
	15,55	9/9							36,8	42,8	46,6				
6	16,00	9/9							38,1	42,7	46,1				
	16,15	9/9							38,0	41,8	45,2				
7	16,30	9/9							37,4	40,7	43,6				
	16,30	9/9							37,3	40,7	43,6				
	16,45	7/7							37,0	39,8	42,9				
8	17,00	7/7							36,7	39,1	42,5				



Schritt: ca. 15 cm  
(entspr. halbe Antenne)

siehe auch  
Lageskizze

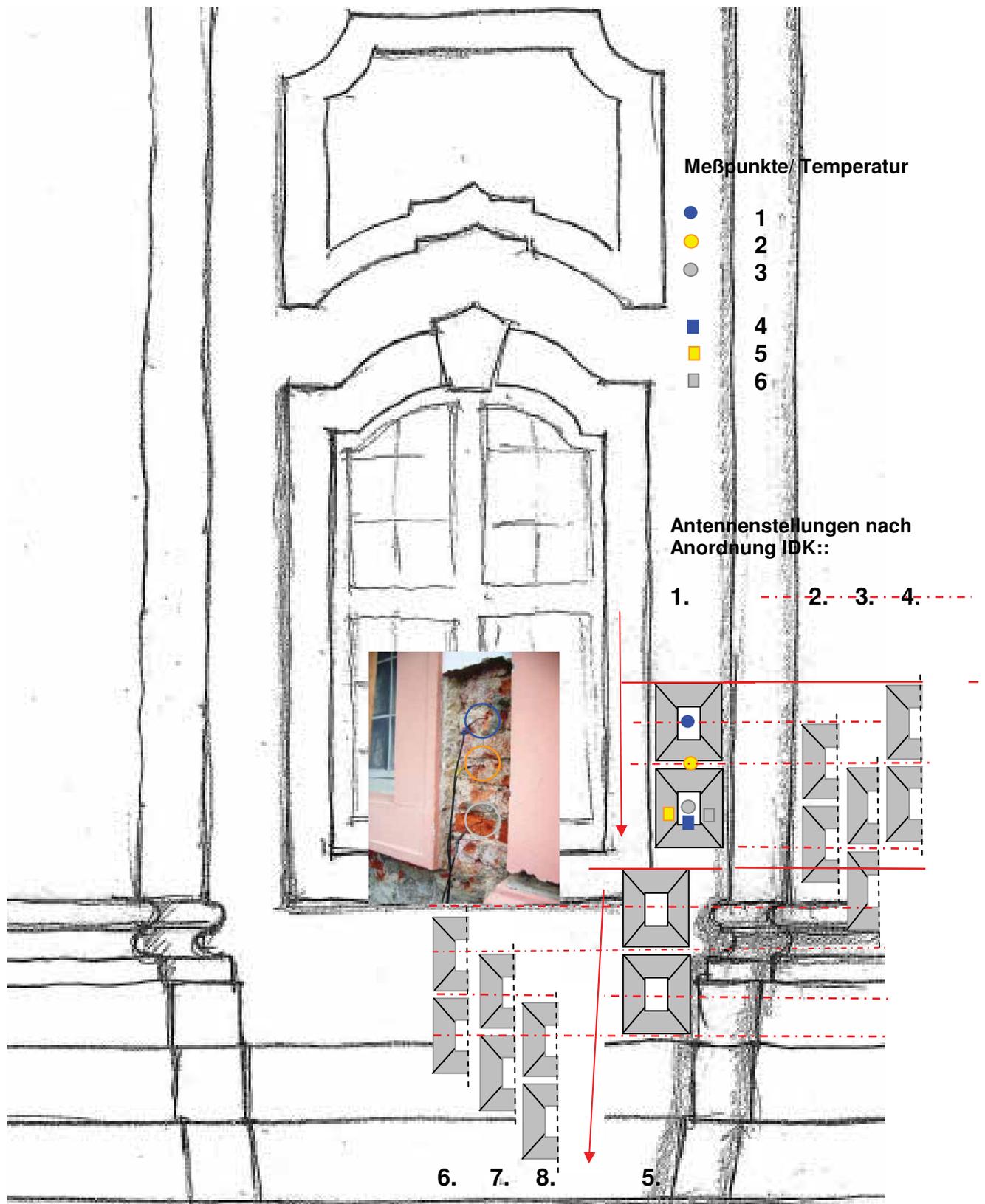
Meßpunkte für die Dauer  
der Durchwärmung  
konstant

- Meßpunkte / Tiefe:
- MP 1 20 cm
  - MP 2 10 cm
  - MP 3 5 cm
  - MP 4 40 cm
  - MP 5 5 cm
  - MP 6 10 cm

Oberflächentemperatur Mauerwerk vor Durchwärmung: 19,4° C, RH (9.00 Uhr) = 65,2 %,  
Außentemperatur 13.00 Uhr: 23,6° C, RH = 48%

Ausführung: gez. A. Eule

Klosterstift St. Marienthal bei Ostritz – Michaeliskapelle  
Trocknungsversuche im Wandmauerwerk unter Einsatz der Mikrowellentechnik



Antennenstellungen und Meßpunkte während des Trocknungsversuches  
(Anlage zur Tabelle)

# Betriebsanweisung "Mikrowelleneinsatz"

<b>Baustelle: Klosterstift St. Marienthal, Michaeliskapelle</b>	
<b>Betrieb: bhd</b> Bautenschutz und Hygienesdienstleistung GmbH Scharfenberger Str. 27 / 01139 Dresden Tel.: (0351) 4 76 79 47	<b>Tätigkeit:</b> Bauteiltrocknung, Versuch zur Durchwärmung überschweren Mauerwerkes
<b>Technische Parameter</b>	
<b>Bezeichnung / Art der Geräte:</b> Steuergerät, Generatoren, Antennen, Temp.-Meßsonden, Strahl.-Meßger. "RadMan" und Hilfsmittel	<b>Elt.(Anschl.):</b> 230 V / 16 A <b>Leistung:</b> pro Generat. (Magnetron) 0,8 kW <b>Frequenz:</b> <b>2,45 GHz</b> <b>Wellenl. λ:</b> <b>12,2 cm (Luft)</b>
<b>Mögliche Gefahren für Mensch und Umwelt</b>	
	Physiologische Wirkung: Durch Energieeinkopplung Überhitzung, Eiweißgerinnung, Verbrennungen. Bereiche mit hohem Strahlungsniveau sind sicher abzusperren, durch Reflexion / Transmission austretende Strahlung durch laufende Kontrollmessung lokalisieren und überwachen, ggf. Erweiterung des Sicherheitsbereiches herstellen. Gefahr durch Beeinflussung elektronischer und anderer medizin. Hilfsmittel (Implantate usw.) Heiße Oberflächen während und nach Strahlungseinwirkung. <b>Grenzwert 5 mW / cm<sup>2</sup> beachten !</b>
<b>Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln</b>	
	Steuergeräte mit "Not-Aus"- Schalter in sicherer Entfernung aufstellen, Sicherheitsbereich um die Antennen festlegen und mittels "RadMan" laufend kontrollieren, Haustiere entfernen, Fremdpersonen vom Zutritt ausschließen. Elektronische Geräte abschalten. Nicht freischaltbare Technik mit geeigneten Metallfolien abschirmen. In Strahlungsmessungen auch Nebenräume mit einbeziehen. Vor Umsetzen der Antennen Einheiten ausschalten. Vorsicht bei erwärmten Oberflächen! Bei Holz ggf. Hotspots und Austritte von heißem Harz. Temperaturmeßsonden und Coax- Kupplungen erwärmen sich ggf. stark! Spannungsführende Kabel gegen mechan.und therm. Beschädigung schützen. Während des Betriebes ständige Anwesenheit unterwiesenen Personals sicherstellen
<b>Verhalten im Gefahrfall</b>	
	Bei Unregelmäßigkeiten sofort "Not-Aus"- Schalter betätigen. Im Entzündungsfall Brandbekämpfung mit geeignetem Löscher veranlassen, ggf. Feuerwehr <b>112</b> rufen. Bei jeder Störung Selbstschutz beachten, Bauleitung informieren
<b>Erste Hilfe</b>	
	Bei jeder Erste Hilfe Maßnahme Selbstschutz beachten; Anlage stromlos schalten, verunfallte Personen bei Transportfähigkeit aus dem Arbeitsbereich bringen. Bei Irritationen, spontanen Schmerzen und Unwohlsein umgehend einen Arzt aufsuchen, ggf. Rettungsdienst 112 verständigen !
<b>Vorschriften</b>	
DIN VDE 0848 Teil 2 vom Oktober 1991 Sicherheit in elektromagnetischen Feldern Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz	
BA - NR.: BAA 409	

## Risikobeurteilung für Maschinen und Geräte

Nr.: 04 / 09    Maschine / Gerät: **Mikrowellenanlage / -einheit**    Stand: IV / 09

**Betrieb:**    **bhd**  
 Bautenschutz und Hygiene-  
 dienstleistung GmbH  
 Scharfenberger Straße 27  
 01139 Dresden  
 Tel.: (0351) 47 67 947



**Typ: MWA- LC1.1R**

**Einsatzgebiete:**  
 bek. wirks. HS  
 EHS- Bekämpfung  
**Trocknung**

### Verantwortung

<b>verantwortliche Mitarbeiter:</b>	Name:	Vorname:

### Schutzvorrichtungen und Hilfsmittel / Überprüfung

- elektr. Schutzkontaktverbindungen, Schalter, Kabelführung, Kabelzustand / 220 V
- Hochfrequenzkabel (Koaxialkabel) mit Schraubkupplungen, Zustand u. Funktion
- Steuerkabel, Zustand und Funktion
- Steuergerät, NOT - AUS- Taster, Schalter und Kontroll - Lampen
- techn. Zustand von Geräteträgern u. Stativen (stabile Montage, Standsicherheit)
- Funktionsüberprüfung des Strahlungsmonitors ("RadMan")
- Handfeuerlöscher / Bereitstellung und Funktionsicherheit

### Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln

- sicheren Anlagenstand gewährleisten (Kipp- und Absturzgefahr)
- Kabelverlegung ohne Stolpergefahr sicherstellen, **nur Schutzkontaktanschluß**
- desgl. für Hochfrequenzkabel, **hohe Erwärmung der Kabel im Betriebszust. beachten**
- Steuerkabel u. Temperatursondenkabel geordnet verlegen, Abstand zu heißen Teilen
- Absperrungen im Einflußbereich der elektromag. Strahlung sicherstellen**
- Überprüfen der Absperrzone mittels Strahlungsmonitor ("RadMan")
- bei Betriebspausen Anlage ausschalten u. gegen unbefugte Inbetriebnahme sichern
- hohe Temperatur von Kabeln, Kupplungen u. anderen Oberfl. auch nach Abschalten
- Temperaturverlauf bei Durchwärmung ständig überwachen, Überhitzungen vermeiden
- planmäßige Abkühlung durchwärmten Materials verm. Temperatursonden überwachen
- baustellenabhängige Betriebsanweisung beachten

### Verhalten bei Störungen und Gefahrfällen

- bei Betriebsstörungen mit "NOT - AUS" Anlage ausschalten u. Netzstecker ziehen
- bei Kabelbrüchen / Isolationsbeschädigungen Anlage ausser Betrieb nehmen
- bei "hot-spots" (lokalen Überhitzungen) sofort ausschalten u. Brandentstehung verhind.
- Handfeuerlöscher bereithalten

### Erste Hilfe - Notruf 112

- +

  - bei Unfall im Arbeitsbereich Anlage sofort ausschalten
  - bei jeder Erste-Hilfe-Leistung auf Selbstschutz achten
  - Verletzte bei Transportfähigkeit aus dem Arbeitsbereich bringen
  - bei Erfordernis Arzt holen bzw. Rettungsdienst verständigen
  - Baustellenmappe u. Betriebsanweisung bereithalten

Ort, Datum:

Betriebsleiter:

## Gefährdungsbeurteilung für die Ausführung von Durchwärmungen mittels Mikrowellentechnik

### Allgemeiner / verbaler Teil

gültig für:

#### 1. thermischer Holzschutz

Bekämpfung von Lebewebefällen alternativ zur Regelausführung (DIN 68 800 T 4)  
(Ausführung von Bekämpfungsmaßnahmen im verbauten Holz gegen holzerstörende Insekten)

#### 2. thermische Hausschwammbekämpfung

alternativ zur Regelausführung (DIN 68 800 T 4)

### 3. Trocknung durchfeuchteten Mauerwerkes ( Bauwerkstrocknung )

Expositionen:

- elektromagnetische Strahlung (trivial „Elektrosmog“)
- Wärmestrahlung
- im Ausnahmefall Abdampfungen / Austritt von flüchtigen Verbindungen aus durchwärmtem Material

Einschätzung:

Bei den verwendeten Anlagen / mobilen Baustelleneinheiten handelt es sich um offene Anlagen, d.h., die Strahlung wird aus sog. „Antennen“ offen auf das zu durchwärmende Teil bzw. in den Raum abgestrahlt. Die Strahlungsintensität nimmt in bereits geringem Abstand von den Antennen ab und erreicht nach einigen Metern ein unkritisches Niveau ( $< 5 \text{ mW/cm}^2$ ). Das Strahlungsniveau kann mittels spezieller Geräte (hier sog. Rad Man) gemessen werden, das Messergebnis ist die Grundlage zur **Absperrung des Gefahrenbereiches**. Der Aufenthalt innerhalb der Absperrung ist nur bei ausgeschalteter Anlage zulässig.

■ primäre Gefährdungen:

- Energieeinkopplung in Körperteile / Gewebe und Gegenstände
- Verbrennungen an heißen Oberflächen und Teilen (Anlage und Durchwärmungsmaterial)

■ sekundäre Gefährdungen:

- Stolpergefahr durch komplizierte Kabel- und Leitungsführungen zwischen Kontrollstand und unmittelbarem Geräte- / Antennenstandort
- Transport schwerer Teile ohne Hilfsmittel und in exponierte Lagen

Die primären Gefährdungen sind durch striktes Befolgen der Betriebsanweisungen (BA Hersteller und betriebliche baustellenbezogene BA), die sekundären Gefährdungen durch eine entsprechende Gestaltung des Arbeitsbereiches und arbeitsorganisatorische Maßnahmen abzuwenden.

Zum Einsatz kommt eine Mikrowellenanlage MWA – LC 1.1 auf der Grundlage der Betriebsanweisung des Herstellers. Zu einer Einheit gehören ein Steuergerät und jeweils 2 Magnetronen und Antennen einschließlich der Verkabelungen und der Temperaturmeßtechnik.

### Betriebliche Sicherheitsunterlagen:

- (standortgebundene) Betriebsanweisung „Mikrowelleneinsatz“
- Blatt „Risikobeurteilung“ Mikrowellenanlage
- Gefährdungsbeurteilung

## Bauwerkstrocknungsmaßnahmen u. Maßnahmen des thermischen Holzschutzes - Einsatz der Mikrowellentechnik -

### Erklärung zum Schutz vor elektromagnetischer Strahlung im Arbeitsbereich einer Mikrowellenanlage, hier Anl.-Typ MWA- LC1.1.R (MTB)

#### Vorschriften:

DIN VDE 0848 Teil 2 vom Oktober 1991

Sicherheit in elektromagnetischen Feldern

Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz

Die auf Baustellen für Durchwärmungen und Trocknungen verwendeten Mikrowellenanlagen sind offene Systeme, d. h., dass die elektromagnetische Strahlung frei aus den (Horn-) Antennen austritt und sich ein freies elektromagnetisches Feld im Raum aufbaut. Das im Regelfall ortsfeste Trocknungs- bzw. Durchwärmungsgut muß sich in Bereichen mit Feldstärken befinden, die von ihrer Größenordnung her in der Lage sind, die Schwingungsvorgänge, die zur Molekülreibung führen, zu bewirken. Diese Bereiche sind räumlich begrenzt, die Feldstärke nimmt umgekehrt proportional zur Entfernung von der Strahlungsquelle ab (je größer die Entfernung um so geringer die wirksame Leistung / gem. in  $mW/cm^2$ ). Als sicher gelten Bereiche mit Werten unter  $5mW/cm^2$ .

Im Gegensatz dazu sind Haushaltmikrowellen geschlossene Systeme, die Durchwärmung von Stoffen erfolgt im geschlossenen und abgeschirmten Raum.

Während des Betriebes einer Mikrowellenanlage werden aus Sicherheitsgründen ständig Messungen ausgeführt (Messgerät sog. „RadMan“, Grenzwert siehe oben). Im unmittelbaren Einflussbereich der Antennen, das heißt bei Messwerten über  $5 mW/cm^2$ , dürfen sich keine Menschen, keine Tiere und Pflanzen, keine elektrischen und elektronischen Geräte, Informationsanlagen, Datenträger usw. befinden. Dieser Einflussbereich erstreckt sich bei der verwendeten Anlage in den 3 Raumachsen nur über wenige Meter, wobei die größte Ausdehnung in Richtung der Längsachse der jeweiligen Antenne auftritt.

Streustrahlungen oder Ablenkungen durch Reflexionen und andere physikalische Erscheinungen sind nicht auszuschließen, sie werden aber ebenfalls mit den Messungen erfasst. Zur Sicherheit sind ortsfeste elektronische Geräte und Einrichtungen abzuschalten / herunterzufahren und erhalten zusätzlich eine Abschirmung durch einen Metallfolievorhang. Informationsleitungen sind im Regelfall abgeschirmt und damit ausreichend sicher gegen Energieeinkopplungen. Elektrische Leitungen müssen spannungsfrei geschaltet werden.

In der Praxis heißt das, dass bei Geschoßdeckenbehandlungen das jeweils darüber oder darunter liegende Geschoß (teil-)geräumt werden muß, die betreffenden Räume sind in die Messungen mit einzubeziehen. Der unmittelbare Arbeitsbereich wird gekennzeichnet / optisch abgesperrt. Der Techniker überwacht während des Betriebes der Anlage die Temperaturentwicklungen im Material und den Sicherheitsbereich ständig. Die Anlage ist durch einen „Not-Aus“ – Taster sofort außer Betrieb zu setzen. Mit dem Abschalten der Anlage ist der Arbeitsbereich sofort strahlungsfrei.



## Arbeitsbericht - Veranlassung

Ort: 02899 Ostritz

Objekt: Kloster St. Marienthal

Objektteil: Michaeliskapelle

Auftraggeber: Zisterzienserinnenabtei  
Klosterstift St. Marienthal  
St. Marienthal 1 / 02899 Ostritz  
Telefon: 035823 77300

Auftragnehmer: André Glauche  
Stuckateurmeister  
Untere Hauptstraße 59 / 09243 Niederfrohna  
Telefon: 03722 815730

Aufgabenstellung: Proberestaurierung / Aufarbeitung von Probeflächen des nach dem Hochwasser 2010 geschädigten Stuckmarmors

Ausführungszeitraum: 19. KW - 24. KW

Autor des Berichtes: André Glauche

Inhalt des Berichtes: Seite 2 - 3 Textteil  
Seite 4 - 14 Fototeil

## 1. **Aufgabenstellung**

Die Situation nach dem Wassereintritt in die Michaeliskapelle im August 2010 ist schon umfassend dargelegt und beschrieben wurden. Der durchfeuchtete Stuckmarmor hat nach langer Standzeit sein ursprüngliches Erscheinungsbild und seine glänzende Oberfläche nicht wieder erlangt. Verschiedene Schadensphänomene wie Salzausblühungen, Schimmelspuren, gelbliche Verfärbungen sowie dunklere Verglasungen prägen das Erscheinungsbild.

Bisherige Versuche den Stuckmarmor mittels Microwellen zu trocknen und so sein helleres Erscheinungsbild wieder zu bekommen, sind ohne Erfolg geblieben.

Als Aufgabenstellung stand nun eine Aufarbeitung mit rein handwerklichen Methoden. An 5 verschiedenen belasteten Stellen soll eine Aufarbeitung des Stuckmarmors durchgeführt werden.

## 2. **Lokalisierung der Probeflächen**

Probefläche Nr. 1 - Westwand, links vom Kreuzigungsaltar, weiße Wandfläche

Probefläche Nr. 2 - Südwestecke, weiße Fläche unter dem schwarzen Nischengesims sowie das darunter sitzende große Sockelgesims

Probefläche Nr. 3 - Südostecke, weiße Fläche unter dem schwarzen Nischengesims sowie das darunter sitzende große Sockelgesims

Probefläche Nr. 4 - Ostwand, mittige vertieft liegende Wandnische, rechter unterer weißer und farbiger Bereich

Probefläche Nr. 5 - Nordwand, Eingangsbereich, linker Eckpfeiler, Fläche die nach Westen ausgerichtet ist

## 3. **Beschreibung der Schadenssituation und der ausgeführten Arbeitsschritte**

Auf allen durch das Hochwasser betroffenen Bereichen ist die verdichtete Politur verloren gegangen.

### *Probefläche Nr. 1*

Diese Probefläche erstreckt sich über einen unteren Bereich, der von uns in der Maßnahme 2009/10 neu hergestellt wurde, und in der oberen Hälfte einen Altbestand. Oberhalb der Grenze zwischen den beiden Bereichen sowie angrenzend rechts im Altbestand gab es hauptsächlich eine gelbe/bräunliche Verfärbungen. Bis 50 cm vom linken Pilaster wurde mittels Entsalzungskompressen diese Verfärbung abgenommen. Rechts davon und bis ca. 15 cm auf die glatte Fläche nach dem Halbrundstab habe ich mit dem groben Bimsstein diese gelbliche Verfärbung abgeschliffen. Am Morgen darauf hat sich ein leichter gelblicher Film gezeigt. Vermutlich wirkt eine mechanische Abnahme nur an der Oberfläche wobei bei einer Entsalzung aus einigen Millimetern Tiefe das Proteinkonzentrat gezogen wird. Später gab es noch einmal eine handtellergröße rauhe Ausblühung. Dieses zeigt ebenfalls, das durch Wassereintrag noch Salze gelöst werden können.

Danach erfolgte ein Neuaufbau vom Bimstein Nr. 2 bis zur Politur.

### *Probefläche Nr. 2*

Auf der weißen Fläche gab es kleine schwarze Punkte welche ich als Schimmel angesehen habe. Diese Punkte gab es schon gleich nach dem Hochwasser 2010. Das farbige Sockelgesims war vorab mittels Kompressen entsalzt und somit auch gereinigt wurden. Danach erfolgte ein Neuaufbau vom Bimstein Nr. 2 bis zur Politur.

### *Probefläche Nr. 3*

Die weiße Fläche ist nur gering mit gelblichen Ausblühungen belastet gewesen. Das farbige Sockelgesims hingegen zeigte schon bei unserer Restaurierung 2009/10 schwere Schädigungen wie ausblühende Salze und zerstörte Oberflächen welche durch die

Sprengkraft der Salze entstanden sind. Eine Abnahme der dunklen Krusten mittels Bimsstein gestaltete sich sehr schwierig da die Oberfläche aufgebrochen war. Somit wurde im Nachgang eine Entsalzung mittels Kompressen durchgeführt die ihre Wirkung auch in den Tälern der gestörten Oberfläche entfaltete.

Danach erfolgte ein Neuaufbau vom Bimstein Nr. 2 bis zur Politur. Jedoch gab es im Sockelbereich mehrmals am nächsten Morgen Salzausblühungen. Durch das beim Arbeiten eingetragene Wasser wurden Salze gelöst und mit dem Abtrocknen sind diese an die Oberfläche gewandert. Dies weißen Schleier habe ich trocken abgenommen und weitergearbeitet.

#### *Probefläche Nr. 4*

An dieser Fläche wurden die weißen Bereiche ebenfalls bei der Restaurierung 2009/10 erneuert. Die farbige mittlere Fläche ist Altbestand.

Die marmorierte Fläche ist dunkler gewesen und es befand sich auf ihr ein Salzrasen. Die weißen Flächen waren mit einem Krakelee von gelblichen Ausblühungen überzogen. Nach einem Aufschleifen erfolgte zusätzlich noch eine Entsalzung mit Kompressen bevor der Neuaufbau vom Bimsstein Nr. 2 bis zur Politur durchgeführt wurde.

#### *Probefläche Nr. 5*

Das nach dem Hochwasser eingetretene Erscheinungsbild war in den durch uns in der Bauphase 2009/10 gearbeiteten Bereichen deutlich dunkler als zuvor. Hierbei spricht man von einer Verglasung. Diese kann ebenfalls durch eine Ansammlung abgetrockneter Proteine in der Oberfläche entstanden sein. Einem Aufschleifen folgte eine Behandlung mit Kompressen. Danach erfolgte ein Neuaufbau vom Bimstein Nr. 2 bis zur Politur.

#### **4. Erkenntnisse und Empfehlungen**

Die ausgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass eine 100 % sichere Aufarbeitung nicht möglich ist. Dennoch spricht die Qualität der fertiggestellten Flächen dafür, über eine Vorgehensweise für alle Stuckmarmorflächen in der Michaeliskapelle nachzudenken. Ich hoffe das eine Phase von 2 - 3 Monaten genügt um eventuell erneute sichtbare Veränderungen an den Ausbesserungsflächen wahrzunehmen. Wenn während dieser Zeit keine Veränderungen mehr auftreten, könnte man von einer Beruhigung der bauphysikalischen Situation ausgehen.

Ich halte es generell für notwendig und vorteilhaft alle zu bearbeitenden Flächen vor Beginn der Aufarbeitung mittels Kompressen zu entsalzen. Zusätzlich empfehle ich alle Problemflächen, Flächen mit starker Verfärbung und Flächen mit starken Salzausblühungen, vorab ein zweites Mal mittels Kompressen zu behandeln.

Schichtenabsprengungen, wie sie an der Probefläche Nr. 3 sich darstellten, sind zum Beispiel nur durch eine vorab Entsalzung mittels Kompressen von belasteten Oberflächen zu befreien. Diese behandelten Flächen stellen sich danach als saubere und trockene Oberflächen dar. Dieser Zustand ist mit einem Zwischenschritt der Stuckmarmorherstellung zu vergleichen.

In der weiteren Abfolge müssen alle notwendigen Schleif- und Poliergänge wie beim Neuaufbau eines Stuckmarmors erfolgen. Für eine Verkürzung des Aufwandes sehe ich leider keine Möglichkeit.

Auch für die Zukunft sollte ein gewisser Unterhalt / Pflege- und Reparaturaufwand für die Stuckmarmorflächen in der Michaeliskapelle eingeplant werden.