

Insa Christiane Hennen, Uwe Kalisch
Henning Kersten, Jens Klocke, Thomas Löther
Karin Petersen, Christoph Zimmermann

Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln

F 3074

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0228-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

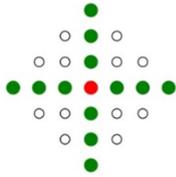
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



EVANGELISCHE KIRCHE
IN MITTELDEUTSCHLAND



Evangelisch-Lutherische
Landeskirche Sachsens



gefördert durch:



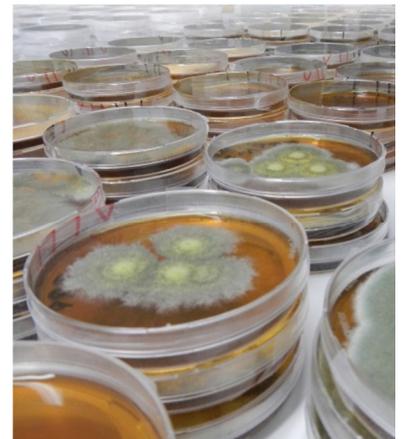
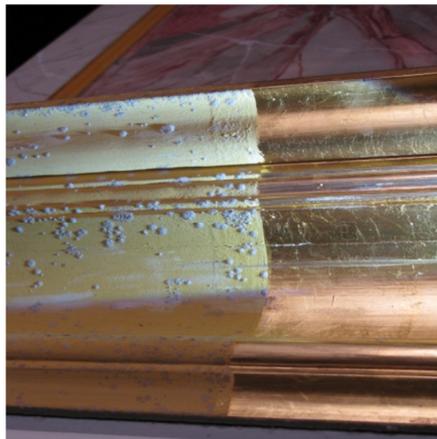
Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

und

FORSCHUNGSINITIATIVE **ZukunftBAU**

Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln



Abschlussbericht

Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln

Verfasser

Insa Christiane Hennen, Uwe Kalisch, Henning Kersten, Jens Klocke, Thomas Löther,
Karin Petersen und Christoph Zimmermann
im Auftrag der Evangelischen Kirche Mitteldeutschlands (EKM) als Projektträgerin

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ 31242-45) und der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt und Raumforschung gefördert (AZ. SWD – 10.08.18.7 – 14.16).

Die Eigenanteile stellten die Evangelische Kirche Mitteldeutschlands (EKM), die Evangelisch-Lutherische Landeskirche Sachsens (EVLKS) und das Thüringische Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie (TLDA).

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Februar 2018

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	6
1	Anlass, Ausgangslage, Zielsetzung	7
1.1.	Schimmelbefall an Orgeln	7
1.2.	Mitteldeutsche Orgellandschaft – Ein Überblick.....	8
2	Arbeitsschritte, Methoden	12
2.1	Fragestellungen, Überblick über den Projektverlauf	12
2.2	Online-Befragung	15
2.3	Recherchen.....	16
2.4	Mikrobiologische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen.....	16
2.5	Klimatische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen.....	20
2.6	Chemische und physikalische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen	22
3	Ergebnisse	24
3.1	Ergebnisse der Online-Befragung	24
3.2	Ergebnisse der Recherchen	26
3.3	Mikrobiologische Ergebnisse: Pilzarten, Aktivität, Wachstumsstadien	29
3.4	Einfluss klimatischer Umgebungsbedingungen auf das Schimmelwachstum.....	41
3.5	Ergebnisse der chemischen und physikalischen Untersuchungen.....	58
4	Diskussion der Ergebnisse	63
4.1	Klimaeinflüsse	63
4.2	Einflüsse von Beschichtungen.....	64
4.3	Wirkungen von Luftbestandteilen	66
5	Öffentlichkeitsarbeit.....	67
6	Fazit	68
7	Literaturverzeichnis	70
8	Abbildungsverzeichnis.....	73
9	Anhang.....	74
9.1	Befahrungsprotokolle: Übersicht Schimmelarten – Befallsgrade:	74
9.2	Adressen der Autoren (Email)	80

0 Kurzfassung

Ausgangspunkt des im Herbst 2014 begonnenen und Anfang 2018 abgeschlossenen Forschungsprojektes der Evangelischen Kirche Mitteldeutschlands (EKM) war der seit etwa 20 Jahren vermehrt beobachtete Schimmelbefall an Orgeln. Die Kirchgemeinden als Eigentümer der betroffenen Instrumente, Kantoren, die kirchlichen Bauabteilungen und viele Orgelbauer stellen sich die Frage nach eventuell von den Pilzen ausgehenden Gesundheitsgefahren und sorgen sich um die wertvollen historischen oder modernen Instrumente.

Das interdisziplinäre Projekt, an dem Fachleute aus den Bereichen Orgelbau, Mikrobiologie, Materialkunde, Bauklimatik und Denkmalpflege beteiligt waren, zielte auf die Erkennung der Ursachen des Befalls.

Um eine solide Datenbasis zu gewinnen, wurde zunächst eine Online-Befragung veranstaltet, im Zuge derer für etwa 400 Objekte mögliche Einflussfaktoren – die Bauart der Orgeln und der Gebäude, Daten zur Restaurierungsgeschichte, zur Beheizung der Kirchenräume, zu Nutzungsgewohnheiten, zu Eigenschaften der jeweiligen Umgebung usw. – erfasst wurden.

Der Umstand, dass sich die Ergebnisse der statistischen Auswertung teilweise – scheinbar – widersprachen, bestätigte die Hypothese, dass mehrere Faktoren zusammenspielen und sich überlagern.

Im Folgenden wurden gut 50 Objekte in Mitteldeutschland besucht und schließlich 19 Vertiefungsfälle näher untersucht, wobei zunächst die im Einzelfall angetroffenen Pilze und ihre Aktivität bestimmt wurden. Auch schimmelfreie Orgeln waren in die Untersuchungen einbezogen.

Schwerpunkte der weiterführenden Messungen und Untersuchungen vor Ort und im Labor waren die jeweiligen klimatischen Bedingungen und eventuell vorhandene wachstumsfördernde oder schimmelhemmende Beschichtungen auf den Oberflächen der Instrumente wie auch sonst im Raum. Recherchen zu Emissionen und Luftbestandteilen wie auch zur Restaurierungsgeschichte erbrachten weitere Anhaltspunkte und halfen, die Fragestellungen schrittweise zu präzisieren. Anzuchtversuche, für die Isolate aus ausgewählten Vertiefungsobjekten Verwendung fanden, lieferten wertvolle Erkenntnisse bezüglich der Wachstumsansprüche der an Ort und Stelle aktiven Pilze. Langzeitklimamessungen und Nebelversuche führten zum tieferen Verständnis der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Kirchenräumen und zur Feststellung, dass die Orgeln im Kirchenraum oft wie ein „Luftentfeuchter“ wirken.

Im Ergebnis konnten die Ansprüche der Pilze und das Zusammenspiel von Klima, mikrobiell verwertbaren Untergründen und veränderten Luftbestandteilen präzise beschrieben werden. Die daraus ableitbaren Eingriffsmöglichkeiten sollen in einem Folgeprojekt näher erkundet und erprobt werden.

Die gesundheitliche Relevanz des Befalls tritt durch die Identifikation der beteiligten Arten mehr in den Hintergrund.

1 Anlass, Ausgangslage, Zielsetzung

1.1. Schimmelbefall an Orgeln

Seit den 1990er Jahren wird an Orgeln in Kirchenräumen vermehrt Schimmelbefall beobachtet. Aus Sorge um die Instrumente und der Befürchtung heraus, Kantoren, Orgelbauer und andere Personen, die sich häufig in den Orgeln oder in der Nähe der Instrumente aufhalten, könnten gesundheitlich gefährdet sein, wurden und werden deshalb nach einer Reinigung häufig Biozid-Behandlungen vorgenommen. Diese bekämpfen den akuten Befall, setzen also am Symptom an, sind kostspielig, nur von begrenzter Wirkdauer und mit eigenen Risiken behaftet. So werden Chemikalien auf unterschiedlich vorbehandelte Untergründe aufgebracht, weshalb Wechselwirkungen mit bestimmten Materialien nicht auszuschließen sind. Darüber hinaus muss die Möglichkeit der Ausbildung von Resistenzen gegen häufig eingesetzte Biozide berücksichtigt werden.

Ziel des Projekts „Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln in Mitteldeutschland“ war, die Ursachen des Befalls zu erkennen.

Aus der Tatsache, dass in der Bundesrepublik Deutschland etwa 50.000 Orgeln existieren, die es vor Schimmel zu schützen gilt, resultiert auch eine wirtschaftliche Relevanz. Alle diese Instrumente sind Unikate, die für den jeweiligen Raum geschaffen wurden, viele von herausragender historischer Bedeutung. Anfang Dezember 2017 wurden der Orgelbau und die Orgelmusik in die Liste des immateriellen Kulturerbes der UNESCO aufgenommen.



Abb. 1 Schimmelbefall an den Holzpfeifen einer Orgel

In der Forschungsliteratur (s. Anhang: Literaturverzeichnis) wird ein Zusammenhang zwischen dem Raumklima, vor allem der Feuchte an den Oberflächen der Orgeln, und dem Befall mit Schimmelpilzen vermutet. Es wird deshalb empfohlen, „richtig“ zu heizen und zu lüften (z. B. Goethe 2007).

Gutachten, die für bestimmte Instrumente erstellt wurden und im Rahmen des Projektes eingesehen werden konnten, enthalten oft eine Vielzahl nachgewiesener Pilzarten unterschiedlicher Gefährdungspotentiale. Die konkreten Wachstumsbedingungen für die an Ort und Stelle, in welchem Entwicklungsstadium auch immer, nicht nur vorhandenen sondern tatsächlich aktiven Pilzarten werden jedoch im Allgemeinen nicht bestimmt. Ebenso werden nur ausnahmsweise mögliche Einflüsse von Beschichtungen erwogen. Staubauflagerungen werden als Risiko beschrieben.

1.2. Mitteldeutsche Orgellandschaft – Ein Überblick

Als Mitteldeutsche Orgellandschaft werden hier die Länder Thüringen, Sachsen-Anhalt und Sachsen verstanden, somit das Gebiet der Evangelischen Kirche in Mitteldeutschland (EKM) und der Evangelisch-lutherischen Kirche in Sachsen (EVLKS).

Auf dem Gebiet der EKM stehen 3996 Kirchen. Dies sind 20 % aller 20.506 Kirchengebäude der Evangelischen Kirche in Deutschland (EKD). Dem gegenüber leben jedoch in diesem Bereich nur 3,3 % der Kirchenmitglieder der EKD. Beinahe jede Kirche verfügt über eine Orgel, manche sogar über mehrere Instrumente. Bei den 21.900.000 Mitgliedern der EKD (Stand 2016) beträgt das Verhältnis 1.068 Mitglieder pro Kirche bzw. Orgel. Im Bereich der EKM (730.000 Mitglieder) sind es 182 Mitglieder pro Kirche bzw. Orgel. Dieses Verhältnis verdeutlicht die besondere kirchliche Situation in der EKM. Der EVLKS gehörten Ende 2016 701.008 Mitglieder an. Von den aktuell 1442 Orgeln der EVLKS sind 1050 vor 1945 entstanden.¹

In Thüringen befand sich die älteste nachweisbare Orgel um 1225 im Erfurter Dom. Die älteste spielbare Orgel steht heute in der Wilhelmsburg Schmalkalden (um 1590). Das Land Thüringen ist erst 1920 durch den Zusammenschluss mehrerer Fürstentümer entstanden und hat dadurch auch im kulturellen Bereich eine hervorragende Vielfalt erfahren. Dies spiegelt sich auch im Orgelbau wider. Hier konnten auch Musikerfamilien, wie die Bachs, alle notwendigen Anregungen und Möglichkeiten finden. Orgeln von Trost und Silbermann genießen noch heute eine überragende Wertschätzung. Auch im 19. Jahrhundert finden wir eine fast nicht zu überschauende Vielfalt im Orgelbau. Dabei gab es in Weimar eine besondere Konstellation, die Auswirkungen auf den gesamten deutschen Orgelbau hatte: Hier lebten Johann Gottlob Töpfer als Organist und Orgeltheoretiker (1830-1870 in Weimar tätig), Franz Liszt (1843-1861 in Weimar) und Johann Friedrich Schulze (1815-1858 als Orgelbauer in der Nähe tätig). Die Zusammenarbeit dieser Persönlichkeiten hatte eine außergewöhnliche gegenseitige Befruchtung im künstlerischen und handwerklichen Schaffen zur Folge. Außerdem brachte die Industrialisierung weitere Impulse und es entstanden danach zunehmend auch Orgeln von auswärtigen Orgelbauern.

¹ Für die Angaben zur EVLKS danken die Verfasser Tobias Haase!



Abb. 2 Trost-Orgel in Waltershausen

Auch in Sachsen-Anhalt befinden sich z.T. sehr alte, wertvolle Instrumente, etwa die Scherer-Orgel von 1624 in Tangermünde. Die gegenseitigen Anregungen zwischen Musikern und Orgelbauern sind auch in Sachsen-Anhalt nicht zu übersehen: hier finden wir das Ergebnis der fruchtbaren Zusammenarbeit von Johann Sebastian Bach und Zacharias Hildebrandt in St. Wenzel zu Naumburg.

Der Großteil der heutigen Instrumente wurde im 19. Jahrhundert gebaut. Neben Wäldner in Halle/Saale, Reubke in Hausneindorf und Rühlmann in Zöbzig nimmt die Orgelbaufirma Ladegast in Weißenfels eine herausragende Stelle ein, deren Orgeln weit über die Landesgrenzen hinaus geschätzt wurden. Besondere Orgeln aus dieser Werkstatt finden wir in seinem Wirkungsort Weißenfels sowie seine legendäre Domorgel in Merseburg.

"Klingende Namen" unter den in Sachsen tätigen Orgelbauern sind die seit dem ausgehenden 17. Jahrhundert über mehrere Generationen in Leipzig und Westsachsen wirkende Familie Donati, im 18. Jahrhundert als Antipoden Gottfried Silbermann und Johann Ernst Hähnel jeweils mit ihren zahlreichen Schülern und Nachahmern, um 1800 die Dresdner Werkstatt Kayser und die Familie Trampeli im Vogtland, im 19. Jahrhundert Friedrich Nikolaus Jahn, Friedrich Ladegast sowie Kreutzbach Vater und Sohn. Die heute noch bestehenden Firmen Eule in Bautzen und Jehmlich in Dresden dominierten bereits um 1900 den sächsischen Orgelbau. Heute bestehen allein in Sachsen einschließlich kleiner Hersteller von Spezialteilen (Zungenregister, Metallpfeifen) 20 Orgelbaufirmen.



Abb. 3 Rötha, Spieltisch der Silbermann-Orgel in St. Marien

In den letzten Jahrzehnten wurde der Schatz der historischen Orgelwerke neu erkannt. Die Organisten akzeptieren zunehmend die musizierpraktischen Einschränkungen der historischen Instrumente.

Die 40 Jahre DDR haben in der mitteldeutschen Orgellandschaft deutliche Spuren hinterlassen: oft wurden aufgrund der wirtschaftlichen Verhältnisse historische Orgeln nicht durch Neubauten ersetzt. Deshalb sind viele der alten Orgeln – auch aus dem zeitweise ungeliebten 19. Jahrhundert – erhalten geblieben. Diese können nun oft mit einer überschaubaren klanglichen Rekonstruktion ihre ursprüngliche Geschlossenheit wieder erlangen. Das Gros der jährlichen Baumaßnahmen in den beiden Landeskirchen bilden dem entsprechend Restaurierungen und Instandsetzungen.

Leider gibt es aber nicht nur glänzende Bilder: Es gibt Orgeln, die seit 40 Jahren nicht spielen, d.h. es gibt schon 1 ½ Generationen, die keinen Orgelklang im Gottesdienst erleben. Hier stellt sich die Frage: haben diese Gemeinden überhaupt das Gefühl, dass im Gottesdienst etwas fehlt? Es gibt defekte Orgeln in Kirchen, deren Bauzustand eine Instandsetzung der Orgel noch nicht zulässt. Bei der Frage nach dem Umgang mit solchen Instrumenten wird die Wechselbeziehung zwischen dem Orgelbau und der Organistenausbildung deutlich: Organisten brauchen gute Instrumente → gute Instrumente brauchen Spieler – gute, intakte Orgeln regen zum Üben an!

Der Orgelfonds der EKM ermöglicht eine finanzielle Unterstützung von Orgelbaumaßnahmen. Daneben gibt es verschiedene öffentliche Fördermöglichkeiten, die sich aber regional stark

unterscheiden. Es bleibt immer ein großer Eigenanteil, der in der Regel eine unglaubliche Herausforderung für die Kirchengemeinden bedeutet.

Aus der skizzierten Situation erklärt sich, weshalb ein quasi „minimalinvasiver“ Eingriff bei der Schimmelproblematik angestrebt wird.

2 Arbeitsschritte, Methoden

2.1 Fragestellungen, Überblick über den Projektverlauf

Das auf eine Laufzeit von drei Jahren angelegte Vorhaben wurde im Oktober 2014 begonnen und im Februar 2018 inhaltlich abgeschlossen. Die beteiligten Forscher näherten sich der Problematik des Schimmelbefalls an Orgeln aus verschiedenen Blickwinkeln: dem Orgelbau, der Mikrobiologie, den Material- und Restaurierungswissenschaften, der Bauklimatechnik und der Denkmalpflege.

Begleitet wurden die Forschungen durch die Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats, Dr. Ina Stephan, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM), Dr. Herbert Juling, Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) der Freien Hansestadt Bremen, und Tobias Haase, Orgelbeauftragter der Evangelisch-lutherischen Kirche Sachsens (EVLKS), Orgelbauer und Kantor. Mitarbeiter der Landesämter für Denkmalpflege, Landeskonservator Holger Reinhardt und Susanne Scheibner (Thüringen), Christine Kelm (Sachsen) und Dr. Karoline Danz (Sachsen-Anhalt), standen wie die Mitarbeiter der kirchlichen Bauabteilungen, Elke Bergt und Marcus Schmidt (EKM), Katrin Tauber und Stephan Däßler (EVLKS), für den fachlichen Austausch zur Verfügung. Seitens der Fördermittelgeber begleiteten Dr. Paul Bellendorf für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und Dr. Michael Brüggemann für die „Forschungsinitiative Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bau- und Raumforschung (BBR) das Vorhaben. Die EKM, die EVLKS und der Freistaat Thüringen brachten die notwendigen Eigenanteile der Finanzierung auf, das Bistum Erfurt und das Bacharchiv Leipzig unterstützten das Projekt ideell.

Die Autoren danken an dieser Stelle für die gewährte Förderung und Unterstützung!

Der vorliegende Bericht stellt die Arbeitsschritte, Verfahren und Resultate des Projektes in knapper Form vor. Im Interesse der Lesbarkeit werden die Ergebnisse beispielhaft präsentiert und auf die Wiedergabe sämtlicher Einzelresultate weitgehend verzichtet.

Am Beginn des Projektes wurden als **Ursachen oder den Schimmelbefall begünstigende Einflussfaktoren** das Raumklima, das in den letzten Jahrzehnten im Zuge der natürlichen Klimaerwärmung möglicherweise gegenüber früher wärmer und feuchter geworden ist, in Betracht gezogen, daneben mögliche Aus- oder Nebenwirkungen von Modernisierungen, etwa negative Effekte neuer Heizungsanlagen oder dichter Fenster. Weitere Hypothesen waren, dass heutzutage in der Luft bestimmte Bestandteile nicht mehr in der Menge vorkommen, in der sie früher vorlagen und u. U. eine Besiedlung hemmten, und dass moderne Materialien, insbesondere Lacke und Farben (Beschichtungen), eine Schimmelbildung befördern könnten, indem sie mikrobiell verwertbare Inhaltsstoffe enthalten oder/und das Diffusionsverhalten der Untergründe beeinträchtigen und die Feuchtepufferkapazität der Bausubstanz mindern.

Um sich dem komplexen Thema des Schimmelbefalls an Orgeln zu nähern, erfolgte zunächst eine umfangreiche Bestandserfassung. Dazu wurde eine **Online-Befragung** auf dem Gebiet der beiden beteiligten Landeskirchen, der EKM und der EVLKS, veranstaltet, die Daten aus Sachsen und Thüringen, Sachsen-Anhalt und einigen Gemeinden im Süden Brandenburgs lieferte. Anhand der Umfrageergebnisse konnten bereits einige Anhaltspunkte bzgl. der Zusammenhänge zwischen Schimmelbefall (oder Nichtbefall) und den örtlichen Gegebenheiten, erkannt werden. Andere Ergebnisse widersprachen sich scheinbar, woraus gefolgert wurde, dass sich verschiedene Faktoren überlagern. Auf der Basis dieser Zwischenergebnisse wurden im nächsten Schritt

Objekte für eine Begutachtung vor Ort und schließlich möglichst repräsentative Vertiefungsfälle ausgewählt, an denen im weiteren Projektverlauf detaillierte Untersuchungen erfolgten.

Insgesamt zehn **Exkursionen** wurden zu 50 Kirchen in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Brandenburg und Niedersachsen unternommen, um an Ort und Stelle weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Bei diesen Befragungen wurden die örtlichen Gegebenheiten in Augenschein genommen und knapp protokolliert, dabei die im Fragebogen gemachten Angaben verifiziert. Die Instrumente wurden gründlich untersucht. Die Raumlufttemperatur und die rel. Luftfeuchte sowie die Holzfeuchte wurden im Sinne von **Momentaufnahmen** gemessen.

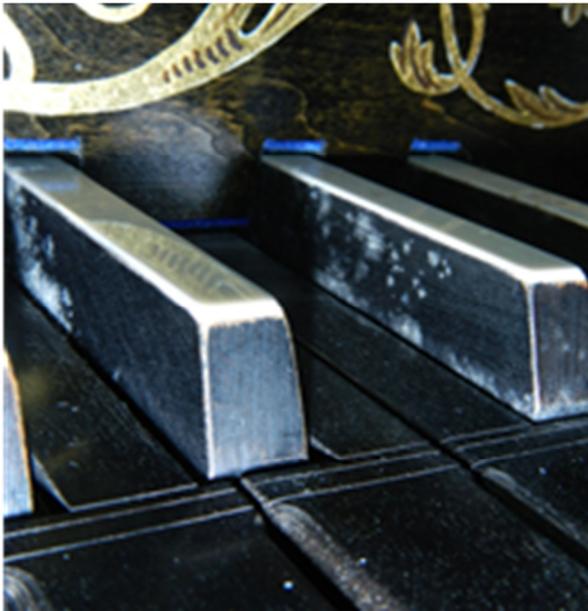


Abb. 4 Typische Besiedlungssituationen an den Organen (siehe auch Abb. 1)

In den Organen wurden an schimmelbefallenen Stellen Klebefilm-Proben zur mikroskopischen Bestimmung der Pilze genommen. Die Aktivität der vorgefundenen Pilze wurde mittels ATP-Schnelltests bestimmt.



Abb. 5 Untersuchungen vor Ort

Für die zweite Projektphase wurden 19 Objekte als **Vertiefungsfälle** ausgewählt. Einbezogen wurden Objekte, die repräsentativ für eine Gruppe ähnlicher Instrumente und/oder Gebäude sind. Das bedeutet, dass Orgeln in stärker oder schwächer beheizten Kirchen mit unterschiedlichen Heizungssystemen (Bank-, Fußboden-, Dampf-, Warmluftheizung, luftfeuchtegesteuerte Heizung, mit/ ohne Grundtemperierung im Winter) und in unbeheizten Räumen ebenso berücksichtigt wurden wie z. B. Orgeln, die oft oder nur selten gepflegt werden, oder solche in Räumen, deren Wandoberflächen mit Kalk- oder Dispersionsfarben gestrichen sind. Auch Orgeln ohne Schimmelbefall wurden intensiver untersucht.

Alle Vertiefungsobjekte wurden mit Sensoren **zur Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte** im Kirchenraum, in der Orgel und außen ausgestattet. **Nahfeldklimamessungen** dienten der Erfassung von Oberflächentemperaturen an Holz- und Metalloberflächen. **Thermographisch** wurden flächige Temperaturverteilungen im Kirchenraum und im Bereich der Orgeln sichtbar gemacht. **Nebelversuche** wurden zur Visualisierung von Luftströmungen im unbeheizten und beheizten Raum eingesetzt. An befallenen Stellen wurden **Stempelproben** zur Gewinnung von Isolaten für Laboruntersuchungen genommen.

Weiterhin wurden **Beschichtungsproben für Laboranalysen** entnommen, um verwertbare Bindemittel- oder den Befall hemmende Bestandteile von Lacken, Einlassungen oder Holzschutzmittelrückständen nachzuweisen. Die Entnahmestellen wurden photographisch dokumentiert. An einigen Objekten wurden am Außenbau **Krusten** entnommen, um (früher vorhanden gewesene) Luftbestandteile, insbesondere Schwefel nachzuweisen.

Außerdem wurden **Recherchen** zu Renovierungen und Modernisierungen der Instrumente und Kirchengebäude angestellt, wie auch zu in den letzten Jahrzehnten eventuell eingetretenen Veränderungen hinsichtlich der **Luftbestandteile**, insbesondere dem vermuteten Wegfall von schimmelhemmenden Luftbestandteilen aus Emissionen.

Alle Zwischenergebnisse wurden bei insgesamt zehn **Arbeitstreffen** der Forschergruppe zusammengelegt und diskutiert.

Auf der Basis der Ergebnisse der Online-Befragung und der Exkursionen wurde festgelegt, die Anforderungen der an den Objekten nachgewiesenen Pilze hinsichtlich des Feuchteangebots, der Temperaturen sowie verwertbarer oder befallshemmender Bestandteile der Untergründe durch **Anzuchtversuche** näher zu bestimmen. Proben von Beschichtungen aus den Orgeln wurden hinsichtlich der Substratfähigkeit (Verwertbarkeit) oder hemmender Bestandteile untersucht und mögliche Hydrophobierungseffekte in Folge von öligen Beschichtungen diskutiert. Nachdem erste Tastversuche zum Einfluss des Lichts auf die Pilze keine eindeutigen Ergebnisse erbracht hatten, wurde dieser Fragekomplex im Folgenden nur am Rand weiterverfolgt.

2.2 Online-Befragung

Ziel der Online-Umfrage war es, möglichst viele denkbare Einflussfaktoren zu erfassen. 95 Fragen waren jeweils zu beantworten: zur Orgel (Bauart, Luftzufuhr), ihrem Standort im Kirchenraum, zum Gebäude, seiner Bausubstanz, zu Pflege- und Renovierungsmaßnahmen an der Orgel und am Bauwerk und anderen vor Ort herrschenden Rahmenbedingungen (Heizung, Lüftung, Nutzungsgewohnheiten).

Für die Befragung wurde das Umfrageportal www.q-set.de genutzt. Die Aktion begann am 18.05.2015. Die Kirchengemeinden waren vorher schriftlich zur Beteiligung eingeladen worden. Zunächst war eine Laufzeit von ca. 8 Wochen geplant, die aufgrund des großen Interesses bis zum 27.08.2015 verlängert wurde. Es gingen über 400 Datensätze ein, was die Bearbeitung von nahezu 40.000 Antworten nach sich zog. Die Ergebnisse der Befragung wurden statistisch ausgewertet und in der Arbeitsgruppe diskutiert.

Umfrage zum Schimmelbefall an Orgeln in Mitteldeutschland

Seite 1 von 7

Forschungsprojekt der Evangelischen Kirche in Mitteldeutschland, in Kooperation mit der Evangelisch-Lutherischen Landeskirche Sachsens, dem Thüringischen Landesamt für Denkmalpflege, dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, dem Bistum Erfurt und dem Bacharchiv Leipzig

Projekttitel: Schimmelbefall an den Orgeln in Mitteldeutschland
Förderer: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Forschungsförderung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
Ansprechpartner: Christoph Zimmermann, Orgelreferent im Landeskirchenamt der EKd, Tel.: 0361/51800573, E-Mail: christoph.zimmermann@ekmd.de

+++ Aufgrund des großen Interesses wird die Laufzeit der Umfrage bis zum 10.07.2015 verlängert! +++

Hinweise zum Fragebogen:

Sicherlich können Sie die meisten Fragen kompetent beantworten, doch ist zur Vorbereitung eine Begehung des Objektes mit den ausgedruckten Fragen (siehe Anhang) ratsam. Sie können natürlich auch ggf. mit den damit vertrauten Personen (Küster, Orgelsachverständige, Orgelbauer, vertrautes Baubüro etc.) noch offene Fragen klären. Bei den durchschnittlichen Besucherzahlen genügen pauschale Angaben, z.B. „50-100“. Im Zweifel ist es besser, eine Frage unbeantwortet zu lassen, als die Bearbeitung des Fragebogens ganz zu unterlassen.

Gliederung des Fragebogens:

1. Allgemeine Angaben (Fragen 1-11)
- 2.-7. Fragen zur Orgel (Fragen 12-41)
- 8.-10. Fragen zu Standort und Gebäude (Fragen 42-73)
- 11.-12. Nutzung/Heizung etc. (Fragen 74-95)

- Der Fragebogen hat 7 Seiten
- Mit den roten Schaltflächen am unteren Ende der Seiten kann vorwärts bzw. rückwärts geblättert werden
- Soll die Umfrage zwischengespeichert werden, auf Schaltfläche „Fragebogen speichern“ oben links klicken und die Jhtml-Datei auf dem Rechner speichern (Achtung! – die aktuell geöffnete Seite kann nicht mit gespeichert werden – am sichersten eine Speicherung auf Seite 7 vorzunehmen, da sind 1-6 gespeichert und nur die letzte Frage offen).
- Zum Fortsetzen der Umfrage diese Datei öffnen und einfach weitermachen
- Durch die Betätigung der Schaltfläche „Fragebogen jetzt absenden“ auf Seite 7 werden die Daten übermittelt (Achtung! – damit haben Sie keinen Zugriff mehr auf Ihre Antworten! – Sie müssten die Angaben ggf. vorher (!) ausdrucken)

Hinweis zum Datenschutz:

Wir sichern Ihnen zu, dass Ihre Daten ausschließlich im Rahmen des Forschungsprojektes "Schimmelbefall an Orgeln in Mitteldeutschland" Verwendung finden.

Abb. 6 Titelseite der Online-Umfrage (Screenshot)

2.3 Recherchen

Für einige Objekte wurden Archivrecherchen zu Renovierungen und Modernisierungen der Instrumente und Kirchengebäude angestellt. Außerdem wurden Online-Recherchen zu in den letzten Jahrzehnten (eventuell) eingetretenen Veränderungen hinsichtlich der Luftbestandteile, insbesondere dem vermuteten Wegfall von schimmelhemmenden Luftbestandteilen aus Emissionen unternommen.

2.4 Mikrobiologische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen

Die **Bestimmung der angetroffenen Pilzarten** erfolgte mikroskopisch. Zur Erstellung eines Mikroskopiepräparates wird ein handelsüblicher durchsichtiger Klebefilmstreifen vorsichtig auf die Oberfläche des zu beprobenden Objektes gedrückt. Die auf der Oberfläche ausgebildeten Besiedlungsanteile bleiben dabei an der Klebeschicht haften und können abgehoben werden. Für den Transport vom Objekt ins Labor wird der Klebefilm auf einen glatten Untergrund (idealerweise einen sterilen Objektträger) aufgeklebt. Das am Klebefilm anhaftende Probenmaterial wird im Mikroskop auf mikrobiologische Strukturen hin untersucht. Je nach Art und Häufung der Zellen kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob am Objekt ein Befall vorliegt oder nicht. Gegebenenfalls kann anhand der Morphologie eine Identifizierung von Organismen erfolgen. In der Regel lässt sich zumindest eine Gattungsbestimmung für Schimmelpilze vornehmen. Um auch vorliegendes farbloses Zellmaterial sichtbar zu machen, werden die Proben vor der Analyse mit Cotton Blue angefärbt. Bei Cotton Blue handelt es sich um eine mikrobiologische Färbemethode, mit deren Hilfe u. a. Chitin und Cellulose angefärbt wird.

Die Aktivität der vorgefundenen Pilze wurde mittels **ATP-Schnelltests** bestimmt. Aktiv Stoffwechsel betreibende Organismen speichern in ihren Zellen Energie in Form von Adenosintriphosphat (ATP). Die Messung des oberflächlichen Energiegehaltes wird genutzt, um die Aktivität eines mikrobiellen Befalls zu erfassen. Unter einem aktiven Befall versteht man Zellen, die Stoffwechsel betreiben und dabei Energie in Form von Adenosintriphosphat (kurz ATP) speichern. Das vorliegende ATP ist für das eingesetzte Messverfahren entscheidend. Zu beachten ist, dass es sich hierbei nicht um einen Vitalitätsnachweis handelt. Viele Mikroorganismen sind in der Lage, auch längere Perioden ohne Nährstoffe oder bei ungeeignetem Klima zu überleben. Sie befinden sich dann in einer Art Ruhezustand, in dem Vitalität (Lebensfähigkeit) aber kein Stoffwechsel (also kein ATP) nachweisbar ist. Liegt ein Befall im Ruhezustand oder sogar tot vor, kann er sich zwar optisch störend auswirken, wird sich aber weder ausbreiten noch zu Schäden am Objekt führen. Im Gegensatz zu inaktiven aber lebenden Zellen (Ruhezustand) lassen sich tote Zellen nicht aktivieren. Für die Erfassung des oberflächlichen Energiegehaltes mittels ATP werden die oberflächlichen Keime in einem definierten Bereich mit einem Wattestäbchen abgenommen und in einer Extraktionslösung lysiert. Sind aktive Keime vorhanden, wird hierbei Adenosintriphosphat frei, welches im nächsten Schritt des Tests genutzt wird, um ein zugesetztes Substrat enzymatisch umzusetzen. Bei dieser Reaktion entstehen Lichtblitze, die mit dem Photomultiplier erfasst werden können. Die gemessene Lichtmenge ist als geräteinterne Messgröße (RLU= Relativ Light Units) ablesbar. Basierend auf Erfahrungswerten kann die Aktivität am Ort der Probeentnahme eingeschätzt werden. Nicht nur Mikroben, sondern alle Lebewesen können ATP enthalten, so z. B. auch Insekten oder deren Eiablagen. Auch bei der Bewertung der hier erzielten Ergebnisse ist daher der Abgleich mit der Mikroskopieprobe zwingend erforderlich.

Stempelproben dienen der Gewinnung von Isolaten für Laboruntersuchungen. Dabei wurden die oberflächlich vorliegenden Keime des Objekts erfasst, indem mit einem Stück sterilem Samt die

Oberfläche des Objekts abgestempelt und die Keime so direkt vor Ort auf Nährböden übertragen wurden. Der Vorteil dieser Form des Abklatschpräparates gegenüber dem üblichen Verfahren (das Objekt direkt mit dem Nährboden abzustempeln) liegt darin, dass es nicht zur Anreicherung verwertbarer organischer Substanzen auf der Objektoberfläche kommen kann. Die Nährböden werden anschließend für mindestens eine Woche im Labor inkubiert und das Wachstum beobachtet. Mit Hilfe des Abklatschpräparates ist es bei Bedarf auch möglich, die Keimbelastung quantitativ (KBE / beprobter Fläche) und vor allem qualitativ zu erfassen. Bei der Auswertung ist zu bedenken, dass unter den optimalen Bedingungen im Labor auch Keime anwachsen, die zwar am Objekt vorliegen, unter den dortigen Bedingungen aber nicht zur Ausbildung kommen. Ein Abgleich mit Mikroskopiepräparaten ist deshalb erforderlich. Bei der quantitativen Beurteilung ist weiterhin zu beachten, dass die Keimverteilung am Objekt nie gleichmäßig ist. Hier ist es sinnvoll, den beprobten Bereich optisch mit der gesamten Oberfläche zu vergleichen. Man geht davon aus, dass bei einer Keimbelastung > 5 KBE / 25 cm^2 eine mikrobielle Belastung vorliegt und Keimzahlen > 50 KBE / cm^2 deutlich über dem tolerierbaren Wert liegen.

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche im Rahmen der Exkursionen wurde die Auswahl der als Vertiefungsfälle geeigneten Instrumente getroffen. Anlässlich erneuter Ortstermine erfolgte die zerstörungsfreie Probennahmen zur Anzucht der an den verschiedenen Orgeln ausgebildeten Schimmelpilzarten. Hierbei wurde berücksichtigt, dass alle im Projektrahmen als relevant erkannten Arten in die geplanten Laboruntersuchungen einbezogen werden konnten.

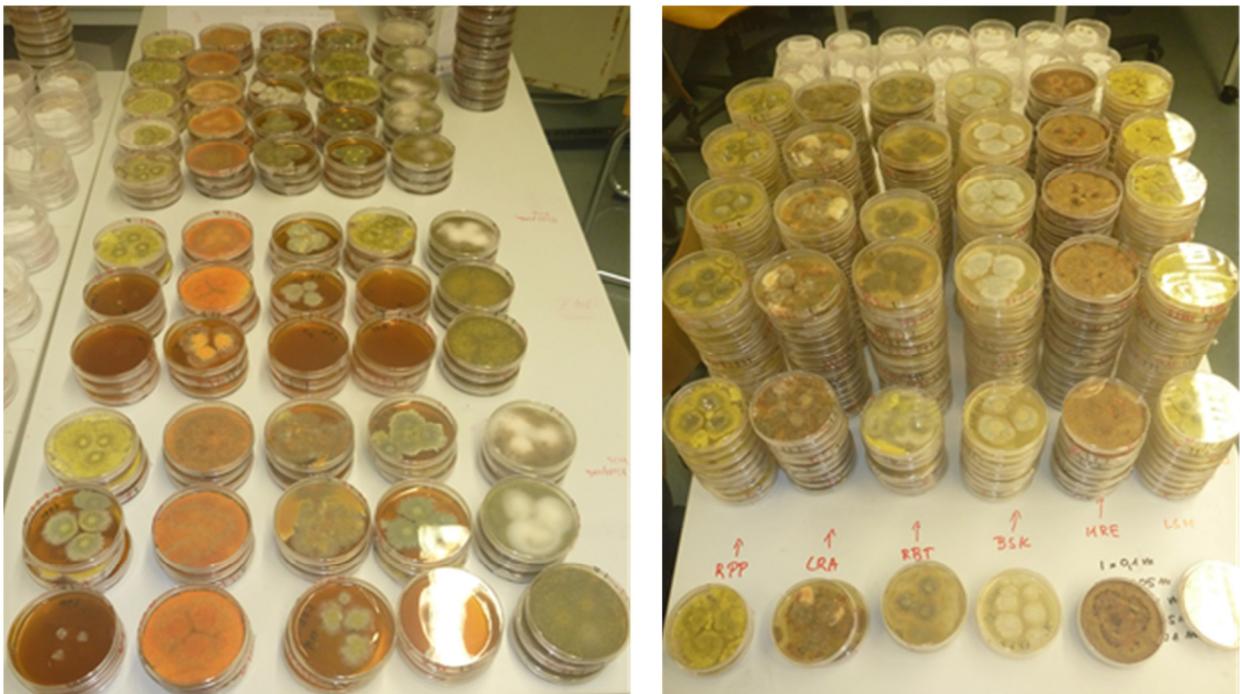


Abb. 7 Anzuchtversuche: Nährböden mit Pilzkolonien unterschiedlicher Ausprägung

Die **Anzuchtversuche** erfolgten mit folgenden Isolaten:

<i>Aspergillus restrictus</i>	isoliert aus Braunschweig, St. Katharinen (BSK), für diese Art ist eine Fruchtkörperbildung nicht beschrieben (fungi imperfecti)
aus der <i>Aspergillus glaucus</i> -Gruppe:	
<i>Eurotium amstelodamii</i>	isoliert von der Totentanz-Orgel in St. Marien, Lübeck (LSM), die hier einbezogen wurde
<i>Eurotium herbariorum</i>	isoliert aus den Kirchen Trinitatis (RBT) und St. Peter und Paul (RPP), in Reichenbach
<i>Eurotium rubrum</i>	isoliert aus den Orgeln in Crawinkel (CRA) und in Krevese (KRE)

Für die **Untersuchungen zu den Ansprüchen an das Klima** wurden Keimsuspensionen hergestellt, mit denen die jeweiligen Nährmedien auf Basis von Malzextrakt-Medien angeimpft wurden. Das Einstellen unterschiedlicher Wasseraktivitäten erfolgte über die Zugabe entsprechender Mengen von Glycerin zu den Nährmedien.

Der Begriff der Wasseraktivität (aw-Wert) ist nicht gleichzusetzen mit der Materialfeuchte, da er nur den für die Mikroorganismen verfügbaren freien – also z. B. nicht chemisch gebundenen – Anteil des Wassers in einem Material erfasst. Der aw-Wert ist abhängig von der Zusammensetzung des Substrats, der Temperatur und dem pH-Wert und liegt zwischen 0 (kein verfügbares Wasser) und 1,0 (kondensiertes Wasser). Zur relativen Luftfeuchte besteht folgender Zusammenhang:

$$\text{rel. F (\%)} = \text{aw} \times 100.$$

Die Messung erfolgt daher auch über die Messung der relativen Luftfeuchte in einem geschlossenen System.

Die Kultur wurde dann in im Bereich von 6 bis 26 °C in entsprechend eingestellten Klimaschränken für bis zu 113 Tage Versuchsdauer durchgeführt. In regelmäßigen Abständen erfolgte die Kontrolle auf das Quellen der aufgebrauchten Konidien, den Beginn der Auskeimung, die Ausbildung von Hyphen und den Koloniedurchmesser, sowie den Beginn einer Vesikelbildung, die der Ausbildung ungeschlechtlich gebildeter (vegetativer) Konidien vorausgeht, sowie der Ausbildung von mikroskopisch kleinen Fruchtkörpern, in denen die geschlechtlich gebildeten (generativen) Sporen sich entwickeln. (Hyphen sind aus Sporen ausgekeimte Zellfäden, Vesikel Blasen, die der Konidienbildung vorausgehen, Konidien vegetativ gebildete Sporen).

Über diese Anzuchtversuche lassen sich die Bedingungen für die Ausbildung einer Besiedlung am Objekt erfassen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Klimabedingungen im Versuchsansatz für die gesamte Versuchsdauer gleich blieben, während am Objekt sowohl im Tages- wie auch im Jahresverlauf Veränderungen des Klimas erfolgen. Auf die Bedeutung dieser Tatsache wird noch einzugehen sein.

Untersuchungen zu den Auswirkungen von Lacken, Beschichtungen und Fassungen

Schimmelpilze sind als sogenannte Kohlenstoff heterotrophe Organismen auf organische Nahrungsquellen angewiesen. Diese können u. a. in Stäuben enthalten sein, die in jeder Kirche eine andere Zusammensetzung haben dürften.

Im Projektrahmen wurde überprüft, ob gängige Beschichtungen, Lacke oder Klebstoffe als Substrat genutzt werden können. Hierzu wurden entsprechende Aufstriche hergestellt und mit den zuvor beschriebenen Keimsuspensionen beimpft. Die Substratwirkung der jeweiligen Materialien wurde über die Wachstumsintensität bewertet. Um eine Fehlinterpretation durch möglicherweise in den Mitteln enthaltene Hemmstoffe auszuschließen, erfolgten diese Testungen auch mit zugesetzter Nährlösung. Wenn in den Ansätzen mit dem zu testenden Mittel bei gleichzeitigem Nährlösungsangebot kein Wachstum erzielt werden konnte, lässt dies zwingend auf einen Hemmstoff in dem getesteten Material schließen. Für die Verwertung von Kasein erfolgte die Testung zusätzlich auf Nähmedien, die Magermilchpulver als Kohlenstoffquelle enthielten. Erfolgt hier eine Verwertung von Milcheiweiß, so lässt sich das an einer Aufhellung des Nährbodens im Bereich der ausgebildeten Kolonien ablesen. Unterbleibt diese Lyse, so ist davon auszugehen, dass das möglicherweise erzielte Wachstum auf der Verwertung von Milchfett oder Milchzucker beruht. Allerdings ist es auch möglich, dass eine Proteinverwertung erst dann einsetzt, wenn der Milchzucker oder das Milchfett vollständig aufgebraucht worden sind.

Diese Testungen erfolgten mit folgenden handelsüblichen Materialien:

Magermilchpulver
Schellack
Mowiol 4-88
Mowilith 35-73
Alkydharz
Dispersionsfarbe
Paraloid B 72
Nitrozellulose

Die Versuchsdauer betrug 21 Tage unter optimalen Klimabedingungen.

Beobachtungen an einigen Instrumenten legten die Vermutung nahe, dass historische Fassungen mit Zink oder Bleianteilen die Entwicklung einer Besiedlung zumindest hemmen könnten. Um diese Vermutung zu untersuchen, erfolgten auch Wachstumsversuche auf Medien mit dem Zusatz von Zinkstaub, Zinkchlorid und Zinksulfat in den Konzentrationen 0,001 bis 0,1 mol/l. Die Bewertung der Wachstumsintensität erfolgte nach 21 Tagen Versuchsdauer über den Koloniedurchmesser. Vergleichbare Untersuchungen erfolgten für die Zugabe von Bleiweiß zu den Nährböden.

Versuche zur Beeinflussung der Besiedlung durch anthropogene Faktoren wie Luftverunreinigung

Um die Auswirkung der Luftverunreinigung zumindest im Hinblick auf Schwefeldioxid und Stickoxide zu erfassen, erfolgten Laborversuche zum Wachstum der Isolate auf Nähmedien mit unterschiedlicher Sulfit- und Nitritkonzentration.

Für Sulfit ist die Hemmwirkung gegen Mikroorganismen seit Langem bekannt und wird auch bei der Weinherstellung wie auch der von Trockenfrüchten nach wie vor eingesetzt. Es wurde den

Nährböden Sulfid- bzw. Nitritkonzentration von 0.01 bis 0,1 mol/l zugesetzt. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine mögliche Änderung des pH-Wertes konnte in ergänzenden Versuchen ausgeschlossen werden.

Die Beurteilung der Wachstumsintensität erfolgte nach 21 Tagen Versuchsdauer über den Koloniedurchmesser.

2.5 Klimatische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen

Die Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen werden wesentlich von der verfügbaren Feuchtigkeit und den Umgebungstemperaturen bestimmt. Daraus leitet sich ab, dass insbesondere die den Schimmelpilz umgebende relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur wichtige (messbare) Einflussgrößen sind. Aus diesem Grund wurden im Projekt „Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln“ nicht nur in der Online-Umfrage gezielt raumklimatisch relevante Fragen gestellt, sondern auch an den 19 Vertiefungsobjekten und einigen Referenzobjekten umfangreiche klimatische Untersuchungen vorgenommen.

Raumklimamessungen

Um eine möglichst breite und vergleichbare Basis von Raumklimadaten unterschiedlichster Kirchen zu erfassen, wurden die Klimamessungen pro Objekt auf das nötigste Maß reduziert. Erfasst wurden in den 19 Vertiefungsobjekten jeweils das Raumklima im Orgelgehäuse, im Kirchenschiff im Bereich der Orgelempore und das Außenklima am Untersuchungsort. An einigen Objekten konnte im Orgelgehäuse und / oder im Kirchenschiff noch ein zweiter Klimamesspunkt installiert werden. Dies erfolgte vor allem in größeren Kirchen oder größeren Orgeln; nachfolgend einige Bilder typischer Klimamesspunkte.



- Protokollierung der
- relativen Luftfeuchte
 - Lufttemperatur
 - absoluten Luftfeuchte

Abb. 8 Klimamesspunkte auf der Orgelempore



Abb. 9 Klimamesspunkte im Orgelgehäuse

- Protokollierung der
- relativen Luftfeuchte
 - Lufttemperatur
 - absoluten Luftfeuchte

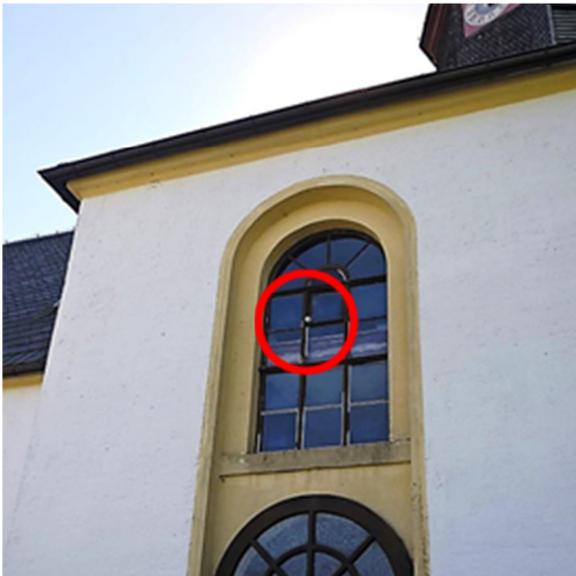


Abb. 10 Klimamesspunkte im Außenbereich

- Protokollierung der
- relativen Luftfeuchte
 - Lufttemperatur
 - absoluten Luftfeuchte

Verwendet wurden geeichte und hochauflösende Sensoren und Datenlogger verschiedener Hersteller (testo AG, Rotronic, Driesen + Kern GmbH und Ahlborn Messtechnik GmbH mit den jeweiligen Typen: 175 H1, 177 H1, 171-6, DK 320 sowie HL-1D und MA 2590-4S). Die Genauigkeit der Sensoren lag hinsichtlich der Temperatur im Messbereich $0^{\circ}\text{C} - +40^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), hinsichtlich der relativen Feuchte im Messbereich 10% - 90% ($\pm 1,8\%$ rel. F).

Aufgezeichnet wurden 156 Messgrößen. Bezieht man in diese Aufstellung die 9 zusätzlichen Referenzobjekte ein, erhöht sich die Anzahl der ausgewerteten Messgeräte von 59 auf 77.

Somit sind die erfassten Klimadaten innerhalb dieses Forschungsprojektes gut miteinander vergleichbar und decken einen größeren geographischen Bereich ab, da Kirchen in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen einbezogen werden konnten. Besonders vorteilhaft war der nahezu identische Zeitraum aller Klimamessungen, weil damit bestimmte Außenklimaschwankungen oder zeitlich begrenzte Raumklimabeeinflussungen (z.B. durch erhöhtes Besucheraufkommen an

Weihnachten und Ostern) miteinander verglichen werden konnten (Siehe 3.4 Ergebnisse der Klimamessungen).

Nahfeldklimamessungen zur Erfassung von Oberflächentemperaturen

An zwei Orgeln wurden Sensoren zur Erfassung von Nahfeldklimasituationen installiert und die erfassten Messdaten ausgewertet. Abb. 8 zeigt einen Sensor zur Erfassung der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur an einer Oberfläche einer Holzpfeife. In einer weiteren Orgel konnte ein Sensor die Oberflächentemperatur eines Metallteiles erfassen (Siehe 3.4 Ergebnisse der Klimamessungen).



Abb. 11 Nahfeldklimasensor zur Erfassung von Klimadaten an Oberflächen

Nebelversuche zur Visualisierung von Luftströmungen

Da das Raumklima einer Kirche nicht nur durch die Parameter der Luftfeuchte und Lufttemperatur beeinflusst wird und beschrieben werden kann, erfolgten in drei Kirchen auch Visualisierungen von Luftbewegungen bzw. Luftwalzen, die sich bei Erwärmungen der Raumluft einstellen. Diese Luftbewegungen in einem Kirchenraum haben einen erheblichen Einfluss auch auf die dort befindliche Orgel und andere Ausstattungsgegenstände.

Um Luftbewegungen in einem Raum darstellen zu können, bietet sich ein Nebelversuch an. Dabei wird ein für Mensch und Ausstattung unschädlicher Nebel in den Raum an vorher ausgewählten Stellen eingebracht. Da dieser Nebel für einige Minuten sichtbar bleibt, können Luftbewegungen wahrgenommen und dokumentiert werden.

2.6 Chemische und physikalische Untersuchungen an den Vertiefungsfällen

Proben von Beschichtungen aus den Orgeln untersuchte die FH Potsdam mittels portabler Röntgenfluoreszenzanalyse (pXRF) auf den Befall hemmende Bestandteile von Lacken, Einlassungen oder Holzschutzmittelrückstände. Das Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) wurde zum Nachweis von mikrobiell verwertbaren Bestandteilen der Bindemittel verwendet.

An einzelnen Objekten am Außenbau der Kirchen entnommene Krusten wurden an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg auf aus der Luft stammende, in den Mörtel eingetragene Bestandteile, insbesondere Schwefel, untersucht. Die Proben wurden

rasterelektronenmikroskopisch abgebildet und in Kombination dazu mittels EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) analysiert.

Das UCL Umwelt Control Labor GmbH Kiel bestimmte im Auftrag der Projektgruppe mit Hilfe der Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) die Konzentrationen von Holzschutzmittelwirkstoffen in Holzproben aus Orgeln bzw. von Orgelgehäusen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Online-Befragung

Aufgrund der großen Anzahl eingegangener Fragebögen erfolgte die Auswertung der Online-Umfrage weitestgehend elektronisch. Es zeigte sich, dass ca. 38% der erfassten Instrumente von Schimmelbefall betroffen waren, dem entsprechend 62% nicht.

Die durch die Umfrage erfassten Objekte wurden mit Hilfe eines Kartierungsprogrammes visualisiert. Dadurch ließ sich die räumliche Verteilung der schimmelbelasteten Objekte, zu denen Daten gewonnen wurden, gut darstellen. Weiterhin kam sie als Hilfsmittel bei der Koordination der verschiedenen Ortstermine zum Einsatz.



Abb. 12 Geografische Verteilung der in der Online-Umfrage erfassten Objekte; Rot: die Frage nach dem Auftreten von Schimmel wurde mit „ja“ beantwortet; Grün: die Frage nach dem Auftreten von Schimmel wurde mit „nein“ beantwortet. **(Auf die Wiedergabe der Karte wird in diesem Bericht aus urheberrechtlichen Gründen verzichtet!)**

Über kombinierte Abfragen der Datensätze wurde versucht, Zusammenhänge zwischen Schimmelbefall (bzw. Nichtbefall) und verschiedenen Parametern herzustellen. Dadurch sollte der Fokus auf bestimmte Aspekte, z.B. die im Winter übliche Raumtemperatur oder die Bauart der Orgel, gelenkt werden, deren genauere Betrachtung in den weiterführenden Untersuchungen vorgenommen wurde. Der prozentuale Anteil bestimmter Antworten verbunden mit einer Schimmelbelastung des entsprechenden Objektes wurde auf den prozentualen Anteil aller schimmelbelasteten Objekte bezogen; Bezugsgröße waren somit die durchschnittlich 38 % aller erfassten Fälle, die von Schimmel befallen waren. Bei einigen Vergleichen ergaben sich direkt

erste Anzeichen für bestehende Zusammenhänge. So war festzustellen, dass überdurchschnittlich viele Orgeln mit Luftzufuhr aus dem (im Zweifelsfall im Winterhalbjahr beheizten) Kirchenraum betroffen waren, während die Instrumente mit Luftzufuhr aus einem (im Winter kalten, im Sommer warmen) Dachraum oder Turm weniger häufig Schimmelbefall zeigten.

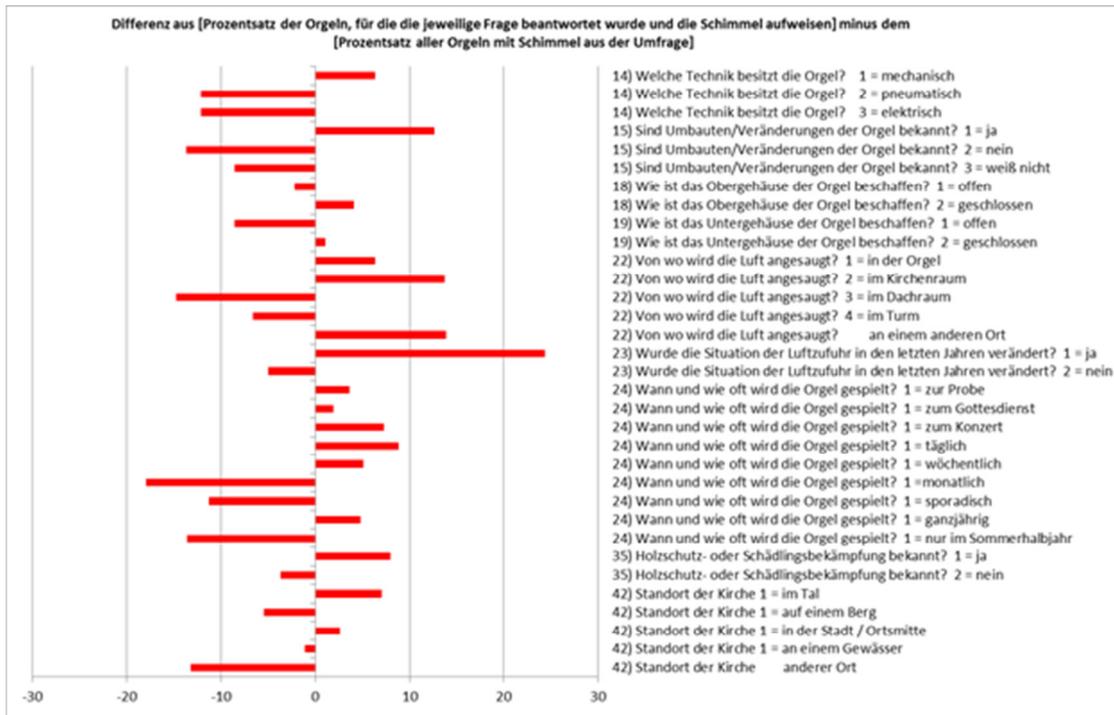


Abb. 13 Darstellung der Abweichung der Häufigkeit bestimmter Antworten von der allgemeinen Häufigkeit des Auftretens von Schimmel: Wenn, gemessen am Durchschnitt (0), weniger häufig Schimmelbefall auftritt, markiert sich dies in der Grafik in der Abweichungen/einem „Ausschlag“ nach links, häufigerer Befall in der Abweichung nach rechts.

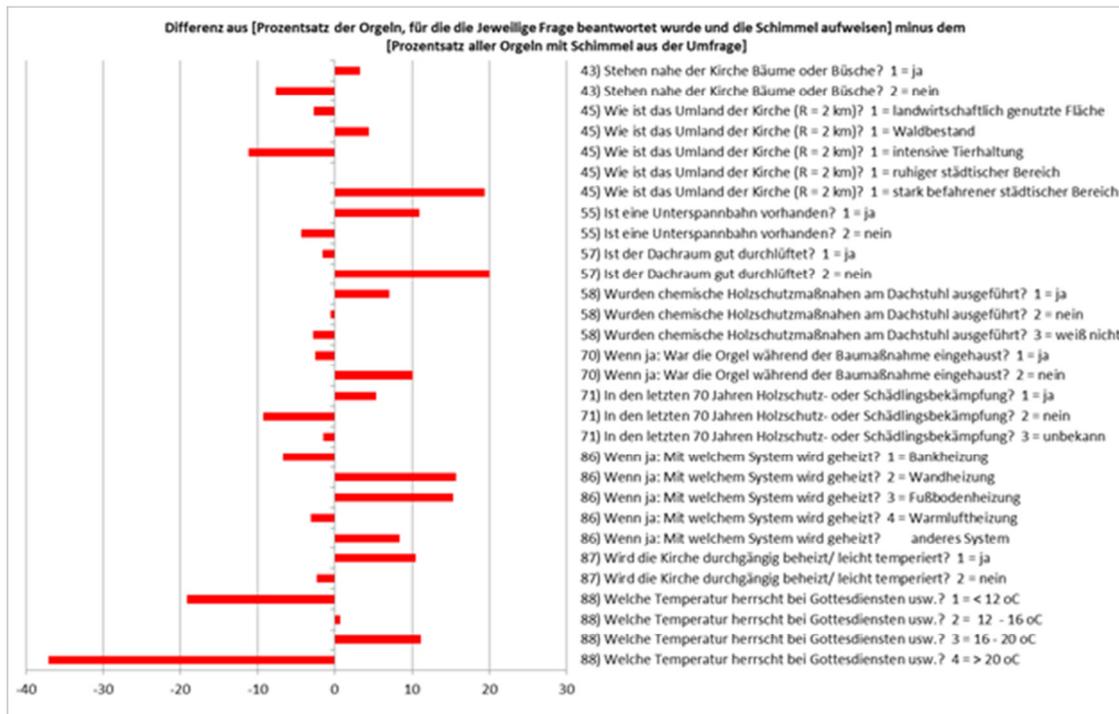


Abb. 14 Darstellung der Abweichung der Häufigkeit bestimmter Antworten von der allgemeinen Häufigkeit des Auftretens von Schimmel

Viele der untersuchten Zusammenhänge waren jedoch nicht eindeutig, einige sogar (scheinbar) widersprüchlich. So zeigen 41 % der regelmäßig gepflegten Orgeln Schimmelbefall, während nur 34 % der seltener gepflegten betroffen waren, obwohl dort von erhöhtem Staubaufkommen, also einem größeren Angebot verwertbarer Stoffe auszugehen ist. Diese Widersprüchlichkeit resultiert einerseits aus der Komplexität des untersuchten Sachverhaltes, d.h. aus der Vielzahl verschiedener Faktoren, die Schimmelwachstum begünstigen oder hemmen und sich u. U. überlagern, andererseits aus der Qualität der erfassten Antworten auf u. U. zu unscharfe Fragestellungen. Die Daten der Umfrage dienten somit neben der Bestandsaufnahme als erste Orientierung auf mögliche Zusammenhänge und als Grundlage für die Auswahl der detailliert zu untersuchenden Objekte.

3.2 Ergebnisse der Recherchen

Die für drei Objekte, die Orgeln in Bad Berka und Crawinkel und jene der Trinitatiskirche in Reichenbach, vorgenommenen Archivrecherchen erbrachten interessante Aufschlüsse bezüglich der teilweise bewegten und komplizierten Geschichte der Instrumente, die in den Pfarrarchiven recht gut dokumentiert ist.² Unter den Bedingungen der Mangelwirtschaft der DDR wurden immer wieder Versuche unternommen, die Orgeln zu pflegen und gegen Schädlingsbefall zu schützen.

Das Vorgängerinstrument der 1987-91 erbauten Orgel in Bad Berka war 1962 mit Hylotox behandelt worden. Das alte, damals ebenfalls betroffene Gehäuse blieb erhalten; es zeigte auf der Nordseite im UV-Lichte deutlichen Befall (siehe S.7, Abb. 1 und S.13, Abb. 4). 1964 wurde wiederum „Wurmtod“ beschafft. Malermäßige Renovierungen des Innenraumes der Kirche fanden 1962 und um 1988/89 herum statt; über die dabei verwendeten Anstrichmaterialien (Dispersionen?) werden in der Akte keine Angaben gemacht.

Die Poppe-Orgel in Crawinkel stand früher in Bad Klosterlausnitz und wurde zwischen 1999 und 2001 nach Crawinkel versetzt. Die Holzpfeifen wurden Mitte der 1980er Jahre ebenfalls mit Hylotox behandelt.³ Der Holzschutzgutachter Bernd Schleder hielt diese Behandlung bereits 2012 für eine mögliche Ursache des 2009 festgestellten Schimmelbefalls. Laut seines Gutachtens war in der untersuchten Charge des Holzschutzmittels außer Lindan und DDT das Lösungsmittel 95% LAVAL 300 („Industriediesel“), 0,5% Isobornylacetat und 0,25% Terpentinöl enthalten.⁴ Seitens der am Projekt „Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln“ Beteiligten wird die Verwertbarkeit von Lindan und DDT durch die Schimmelpilze zwar in Frage gestellt, nach Untersuchungen in anderem Zusammenhang wird auch für die öligen Bestandteile eine eindeutige Substratfunktion nicht angenommen, aber davon ausgegangen, dass durch die Beschichtung der Oberflächen mit diesen Substanzen deren Sorptionsvermögen gemindert wird, was zu einem höheren Feuchteangebot an denselben führen dürfte.

Für das Gehäuse der Orgel der Trinitatiskirche in Reichenbach waren 1970 fünfzehn Liter „Wurmtod“ bestellt worden. Auf die spezielle Fragestellung hinsichtlich eingesetzter Pflege- und Reinigungsmittel enthielten die Archivalien keine Antworten.

² In Bad Berka wurde am 29.11.2016 eine Akte zur Orgel eingesehen, die den Zeitraum von 1962 bis 1994 betrifft. In Crawinkel wurden am 4. und 5.10.2016 drei Akten eingesehen, die die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Orgel spiegeln, die zwischen 1996 und 2012 unternommen wurden und auch Hinweise auf frühere Ereignisse enthalten. Am 29.11.2016 wurde die Akte für die Orgel in der Trinitatiskirche in Reichenbach eingesehen.

³ Dies geht aus einem Schreiben H. Försters, Kreiskirchenamt Gotha, vom 6.10.1999 hervor (Akte I).

⁴ Siehe Akte I.

Die **Online-Recherchen** zu Luftbestandteilen führten zu für die Ausrichtung der Laborversuche relevanten Resultaten. Das Umweltbundesamt (UBA) erhebt selbst seit Jahrzehnten Daten zu Luftschadstoffen bzw. sammelt Daten von Landesumweltämtern und stellt sie auf seiner Internetseite der Allgemeinheit zur Verfügung.

Signifikant ist die Abnahme von Schwefeldioxid wie auch etlicher Schwermetalle in der Luft. (Bezüglich der Einflüsse von Sulfid und Blei siehe die Ergebnisse der Anzuchtversuche auf entsprechend präparierten Nährböden, 3.3).

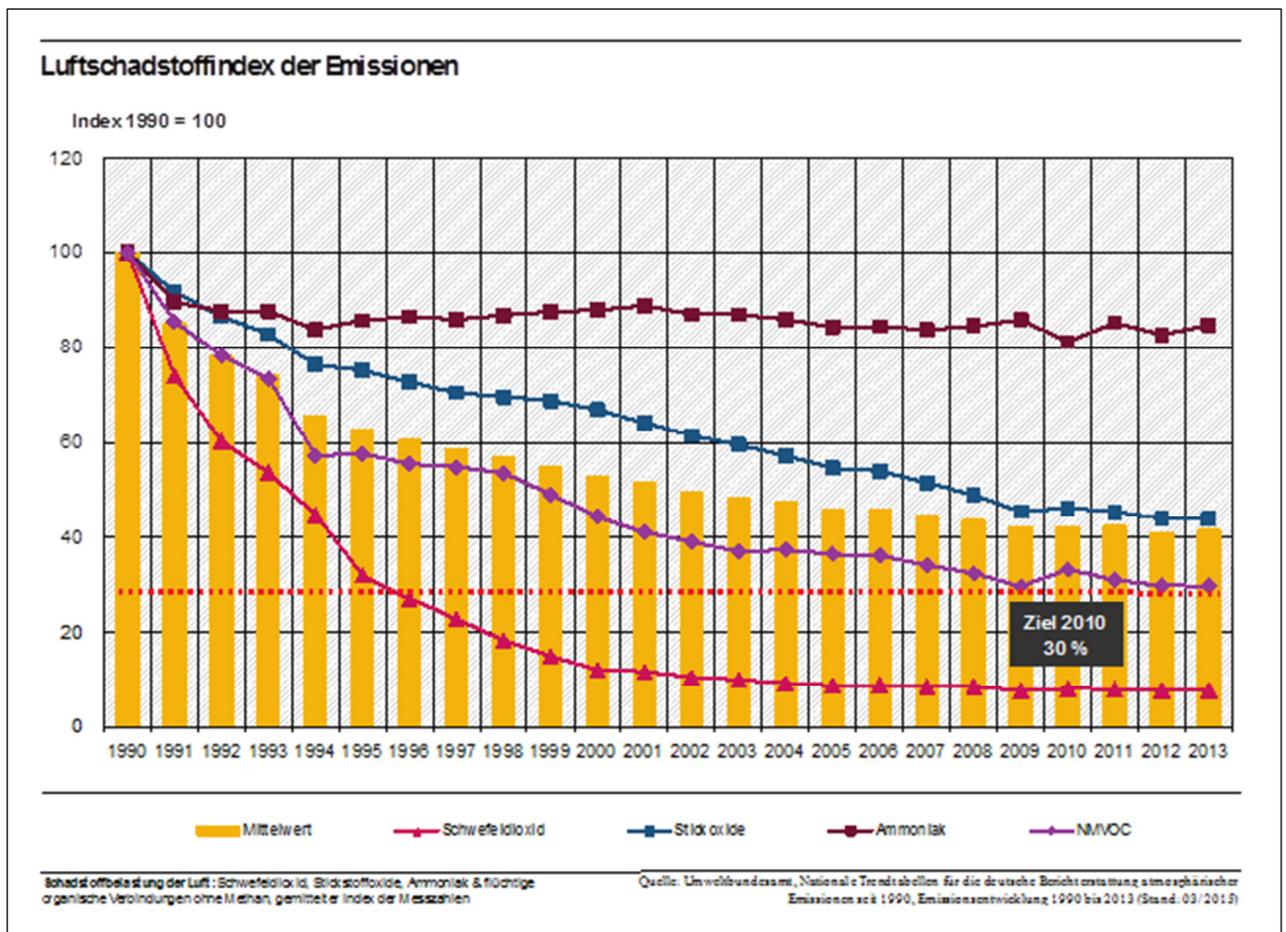


Abb. 15 Luftschadstoffe aus Emissionen 1990-2013 (Quelle: www.umweltbundesamt.de)

SO₂ -Jahresmittelwerte

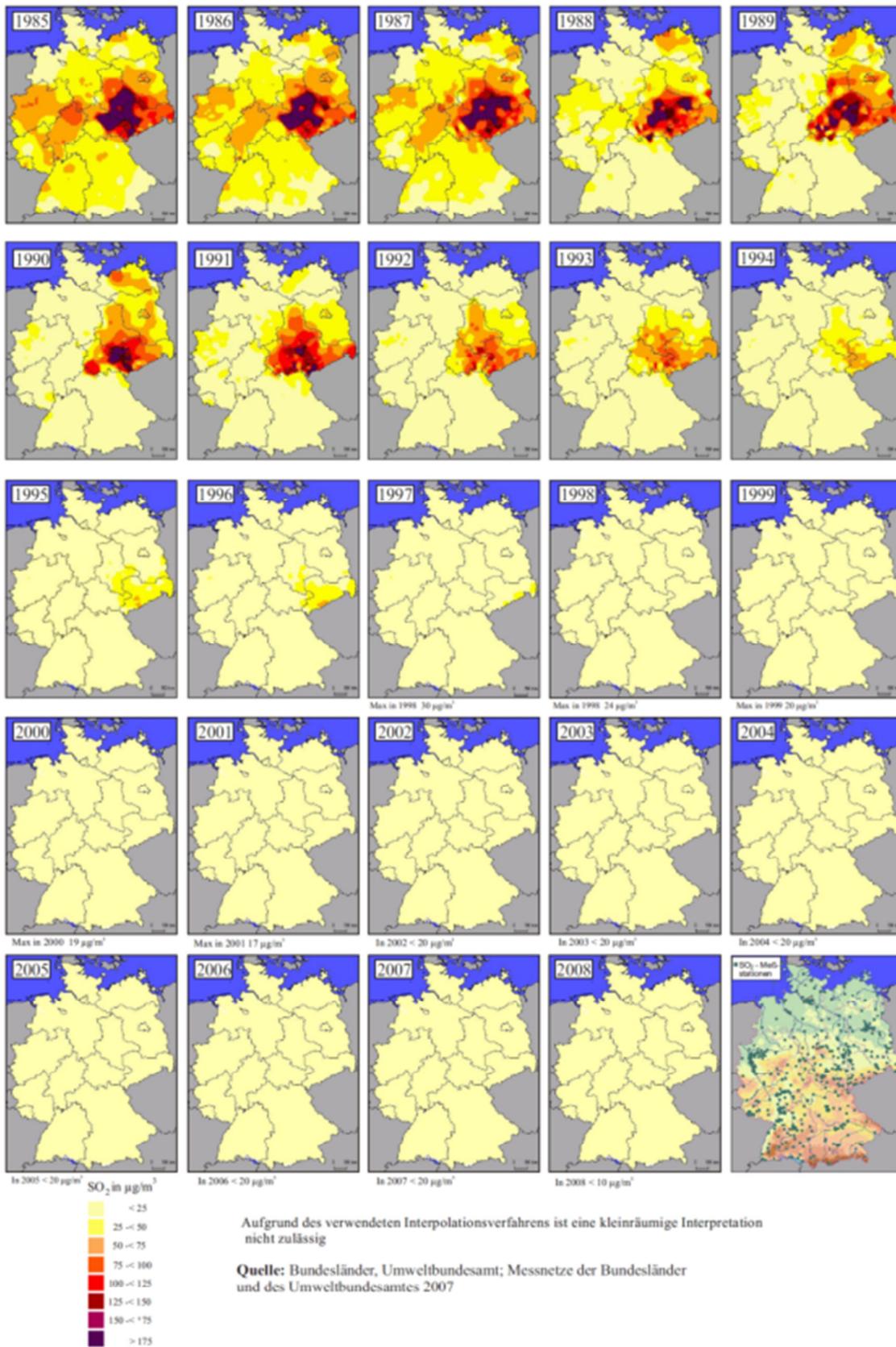


Abb. 16 SO₂ in der Luft, Jahresmittelwerte 1985-2008 (Quelle: www.umweltbundesamt.de)

Die Abnahme von Blei in der Luft ist vor allem mit dem Verbot bleihaltigen Normalbenzins 1988 und anderer bleihaltiger Kraftstoffe im Jahr 2000 zu erklären.

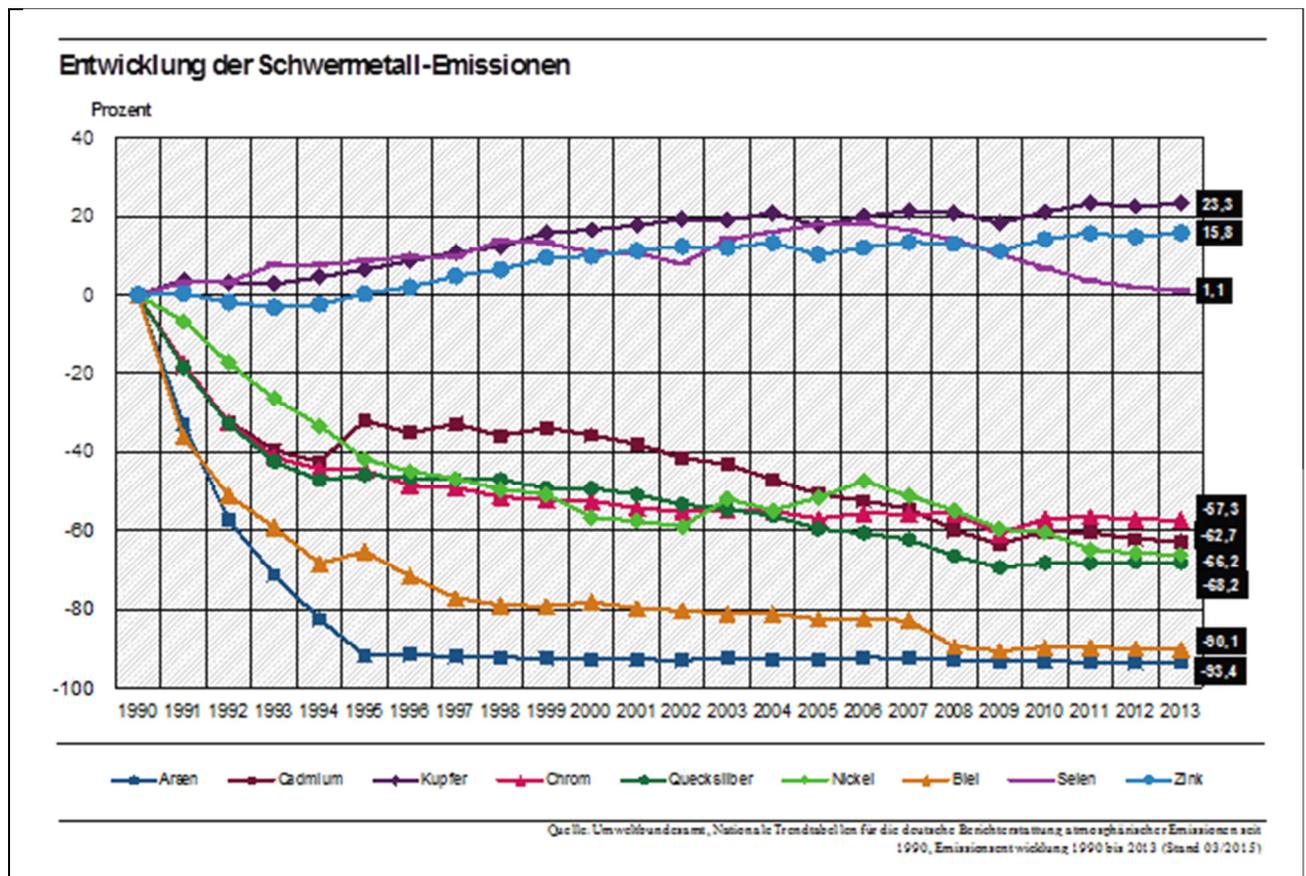


Abb. 17 Schwermetalle in der Luft (Quelle: www.umweltbundesamt.de)

3.3 Mikrobiologische Ergebnisse: Pilzarten, Aktivität, Wachstumsstadien

Die Bewertung aktiver Besiedlung erfolgte durch Auswertung des oberflächlichen Energiegehalts an den Instrumenten, hierbei wurde gleichzeitig mikroskopisch kontrolliert, dass der ATP-Gehalt ausschließlich auf die Besiedlung durch Pilze zurückzuführen war.

Anhand der direkten mikroskopischen Auswertungen konnte belegt werden, dass eine tatsächliche Besiedlung fast ausschließlich durch Schimmelpilze der Gattung *Aspergillus* erfolgte. Hier wurden im Einzelnen *Aspergillus restrictus* und Vertreter der Gruppe *Aspergillus glaucus* nachgewiesen und zwar die Arten *Eurotium amstelodamii*, *Eurotium herbariorum* und *Eurotium rubrum*. Diese Arten werden den sogenannten xerophilen also trockenheitsliebenden Arten zugerechnet, die sich bereits bei geringem Feuchteangebot entwickeln. Nur sehr vereinzelt konnten dagegen Hyphen von *Cladosporium* sp. nachgewiesen werden, obwohl die nicht ausgekeimten Konidien, die häufig im Aeroplankton (mikrobielle Schwebteile in der Luft) vertreten sind, als Anflugkeime auf vielen Instrumenten gefunden wurden. Ganz offensichtlich waren aber die Klimabedingungen, insbesondere das Feuchteangebot, dort nicht ausreichend, um das Wachstum von *Cladosporium*-Arten zu ermöglichen. Die weiterführenden Laboruntersuchungen erfolgten daher mit Isolaten der oben genannten *Aspergillus*-Arten.

Intensive Besiedlung wurde nicht nur an horizontalen Bereichen mit starker Staubauflagerung sondern auch an vertikalen Teilen festgestellt, auch ergaben sich im Einzelfall deutliche Unterschiede bei der Besiedlung neuerer ergänzter Hölzer – hier dürften unterschiedliche Überzüge ursächlich sein –, sowie zwischen Kernholz und Splintanteilen. Unter UV-Anregung zeigte sich in vielen Fällen eine auffällige Fluoreszenz, deren Ursache bisher nicht geklärt werden konnte, die aber teilweise auch das Erkennen eines inzwischen abgereinigten Befalls noch ermöglichte.

In ergänzenden Untersuchungen vor Ort wurde die **Aktivität der Besiedlung** (ATP/cm²) erfasst und bewertet (z. B. starke Aktivität). In anschließenden mikroskopischen Untersuchungen wurde die tatsächlich am Objekt ausgebildete Besiedlung untersucht (Abb. 14). Hier konnten über die Klebefilmproben die Arten belegt werden, die sich unter den realen Objektbedingungen angesiedelt hatten.

Probe Nr.	Kirche, Datum, Uhrzeit, Probestelle / Kommentar	Klebfilm	ATP 4 cm ²	ATP 1 cm ²	Aktivität	Bewuchs, ATP-Fenster				Klima, Ort der Messung	
						0%	1-10%	10-50%	50-100%	rLf. %	°C
	St. Katharinen, Braunschweig, 23.06.16, 16:00 Uhr									73	20,2
BSK 1	Pieta südl. Seitenschiff	Relativ wenig Partikel am Film: Staub, Fasern - flächig liches Mycel ausgebildet, punktuell dichter - in weiten Teilen unfragmentiert und "frisch" - Aspergillus glaucus und wahrscheinlich auch Aspergillus restrictus	167235	41809	■ starke Aktivität			X			Orgel, hinten
BSK 2	Kanzel, Evangelisten	Fasern, leichte Verschmutzungen (Ruß, Feinstaub) - selten Konidien Cladosporium, Alternaria-Typ, Epicoccum, Sternsetenpilz - liches Mycel von Aspergillus glaucus, in Teilen trocken und mäßige Sporulation	124853	31213	■ starke Aktivität		X			72	20,1
BSK 3	Orgelgehäuse, Südseite, 180 cm Höhe, außen einzelne weiße Kolonien	Spinnweben, Fasern, leichte Verschmutzungen - einzelne Konidien Cladosporium, Alternaria-Typ, Fusarium-Typ, Punktuell liches Mycel von Aspergillus glaucus, in weiten Teilen trocken, mäßige Sporulation	45080	11270	■ starke Aktivität			X			im Orgelgehäuse
BSK 4	Orgelgehäuse, Rückseite, 180 cm Höhe, außen weiße Kolonien	Leichte Verschmutzungen (Feinstaub, Ruß) Spinnweben Fasern - Punktuell Mycel von Aspergillus glaucus, gute Sporulation, einige Bereiche überwiegend trocken, andere Bereiche überwiegend "frisch"						X			

Tab. 1 Beispiel für das Schema der Erfassung der Besiedlungssituation in einer Kirche

Eine Unterscheidung zwischen zwar keimfähigen aber in der Objektsituation nicht ausgekeimten Anflugkeimen und den tatsächlich die Besiedlung ausbildenden Arten ist so möglich. Die Dokumentation und die ergänzenden Ergebnisse wurden für jedes Objekt erfasst und tabellarisch zusammengestellt. Diese Daten wurden den betroffenen Gemeinden zur Verfügung gestellt.

Anhand ausgewählter repräsentativer Beispiele sollte der Einfluss des Klimas auf die Entwicklung der Isolate aufgezeigt werden. Sehr deutlich zeigte sich, dass die Ansprüche an die verfügbare Feuchte von der Temperatur abhängig sind und dass bei ungünstigen Temperaturverhältnissen die Feuchtigkeit in einem idealeren Bereich liegen muss, um die Ausbildung einer Besiedlung zu ermöglichen (s.u.).

Abb. 18 zeigt die Abhängigkeit des Wachstums von Aspergillus restrictus von Feuchte (aw-Wert) und Temperatur nach 28 Tagen Versuchsdauer. Der Beginn der Entwicklung, markiert durch das

Quellen der aufgeimpften Konidien, zeigt sich bei geringer Wasseraktivität (0,7485) nur bei 20 und 22 °C. Bei geringfügig höherem Feuchteangebot (0,7804) erfolgt ein Quellen aber bereits im Bereich von 14 bis 26 °C. Bei weiterer Erhöhung der Feuchtigkeit (0,7976) wird im idealen Temperaturbereich bei 24 °C nicht nur die Ausbildung makroskopisch sichtbarer Kolonien sondern im mikroskopischen Bild auch bereits die Anlage von Vesikeln beobachtet, welche die Konidienbildung einleitet. Die weitere Steigerung der Feuchte (0,8032) ermöglicht bei 14 bis 18 °C zudem das Auskeimen der aufgeimpften Konidien.

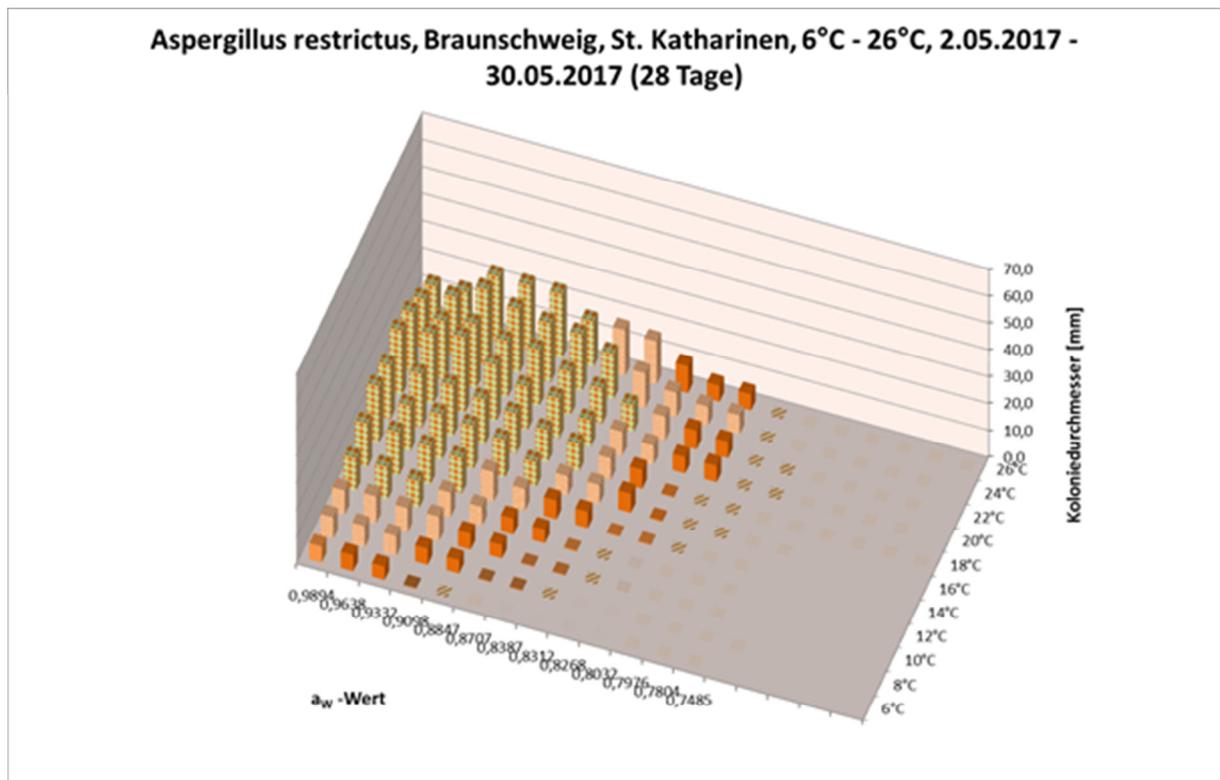


Abb. 18 Wachstumsintensität in Abhängigkeit von der Wasseraktivität

Legende Abb.: 18 – 20

schrattierte Fläche:

einfarbige Fläche ohne Säule:

einfarbige Säule:

fein punktierte Säule:

groß punktierte Säule:

Säule mit gelber Umrandung:

Konidien gequollen

Beginn der Konidienkeimung

Koloniedurchmesser

Beginn der Vesikelbildung

Konidienbildung

Fruchtkörperbildung

Die beiden nachfolgenden Abbildungen (Abb. 19 und Abb. 20) zeigen, dass Konidien der *Eurotium rubrum*-Isolate aus Krevese und aus Crawinkel bereits bei 6°C quellen und sogar wachsen, sofern ein ausreichend großes Feuchteangebot besteht.

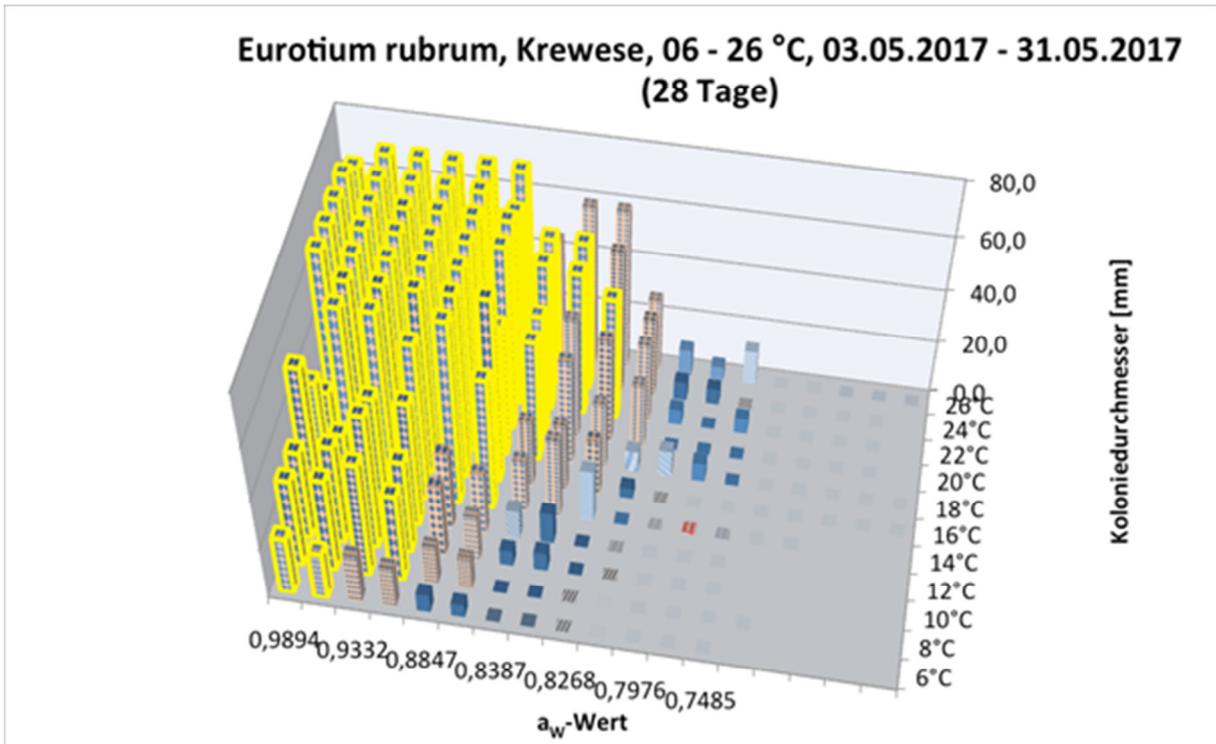


Abb. 19 Wachstumsintensität in Abhängigkeit von der Wasseraktivität

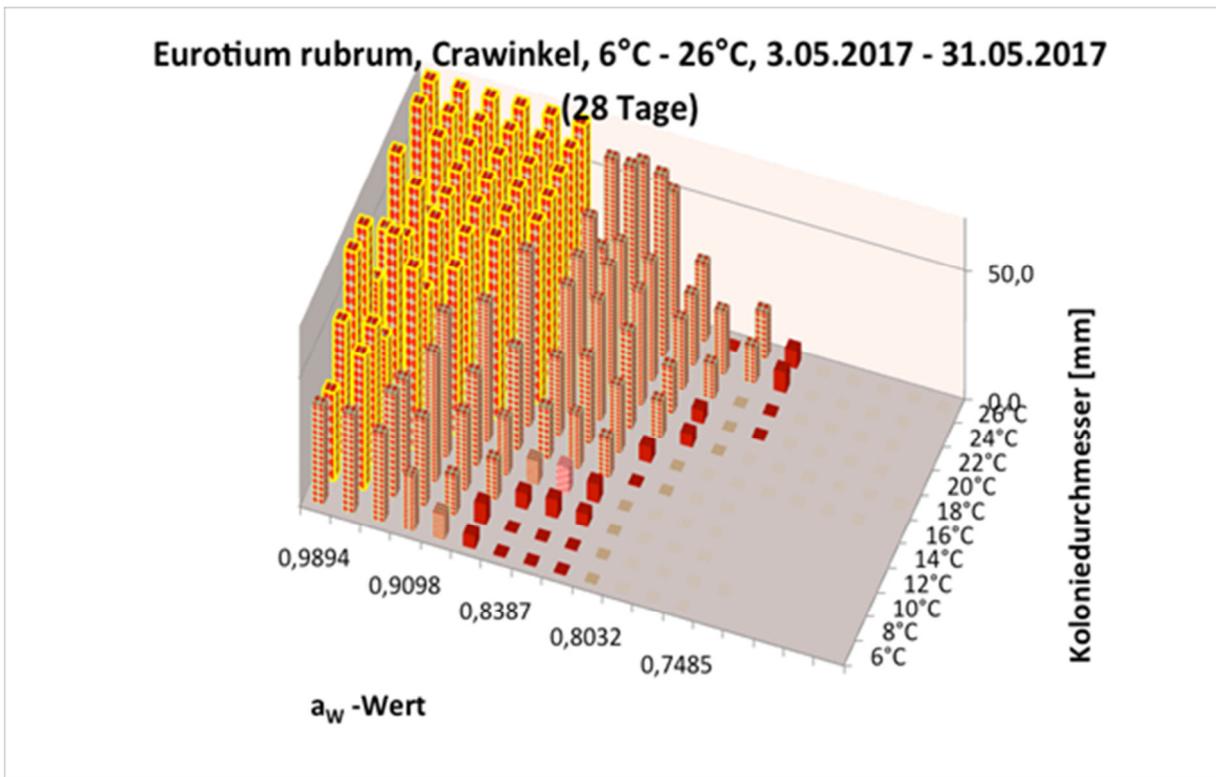


Abb. 20 Wachstumsintensität in Abhängigkeit von der Wasseraktivität

Betrachtet man den Bereich des höchsten Feuchteangebots, so zeigt sich am Beispiel des *Aspergillus restrictus*-Isolats aus Braunschweig (Abb. 21), dass unter diesen Bedingungen die optimale Wachstumstemperatur bei 22 und 24 °C liegt, während sich das Wachstum für dieses Isolat bei 26 °C Kulturtemperatur bereits deutlich vermindert.

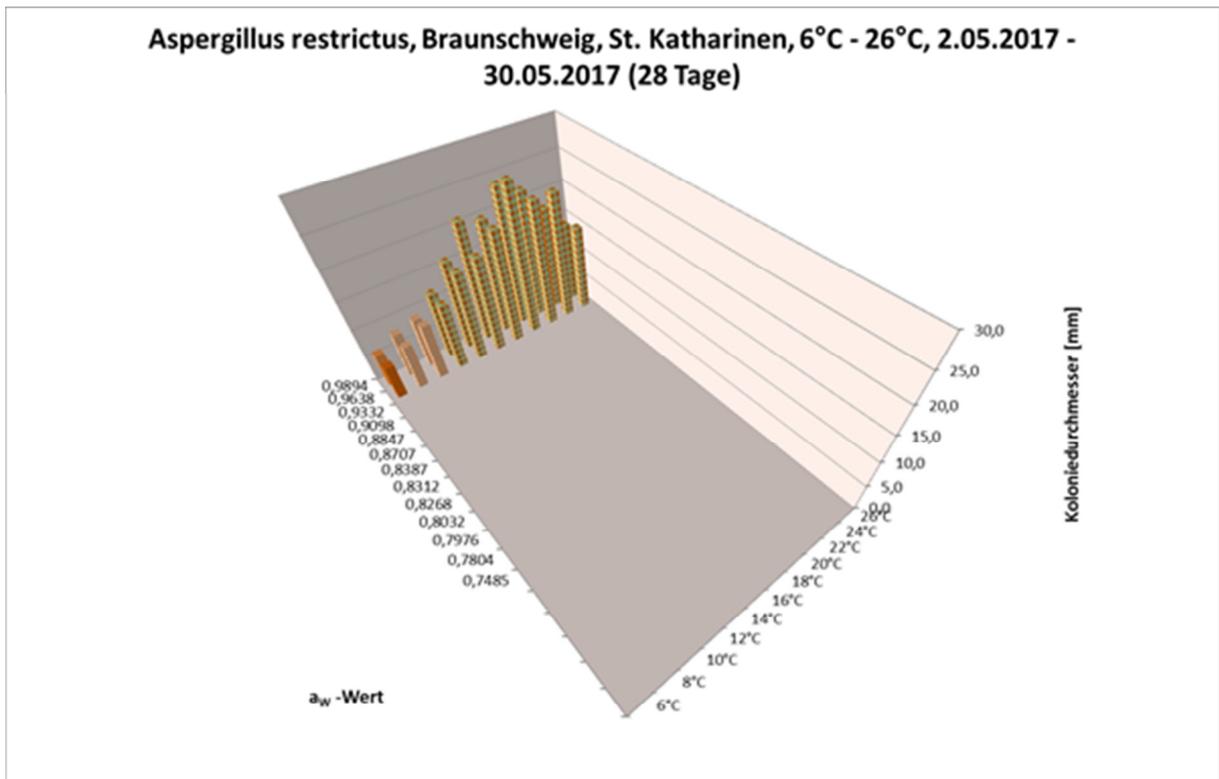


Abb. 21 optimale Wachstumstemperatur bei höheren Wasseraktivität

Für *Aspergillus glaucus*, ein Isolat aus der Lübecker Totentanz-Orgel, Lübeck, konnte ebenfalls nach 28 Tagen Versuchsdauer selbst bei 8 °C Kulturtemperatur die Ausbildung mikroskopisch kleiner Fruchtkörper nachgewiesen werden, die bei geringeren Feuchten an höhere Temperaturen gebunden ist.

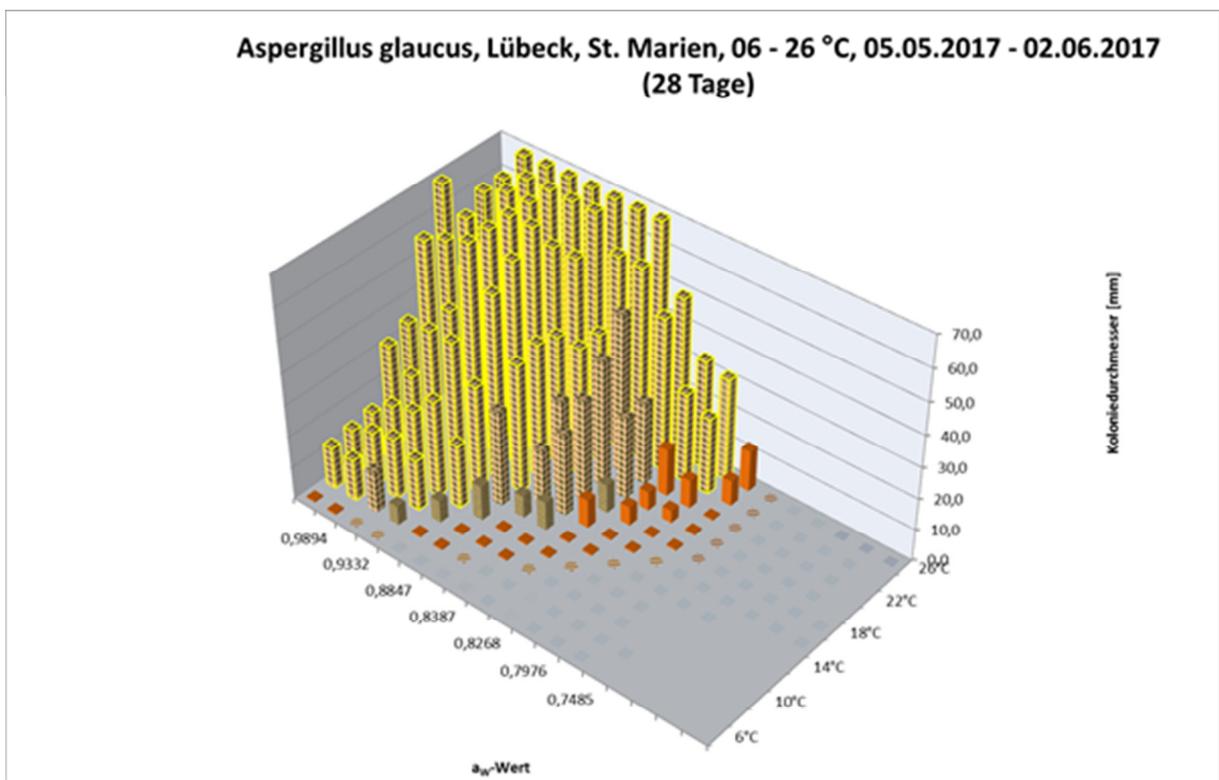


Abb. 22 Ausbildung unterschiedlicher Entwicklungsstadien in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse ist zusammenfassend festzustellen, dass der Versuch, das Wachstum der relevanten Schimmelpilzarten über Eingriffe in das Klima zu beeinflussen, sehr genaue Kenntnisse der Wachstumsvoraussetzungen für das jeweilige Isolat erfordert. Andernfalls können unerwünschte Auswirkungen eintreten, da z. B. die Erhöhung der Grundtemperatur bei gleichbleibender Feuchte u. U. zu einer Intensivierung der Besiedlung führen könnte.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen zeigte sich zudem für alle Isolate selbst bei Temperaturen von 6°C noch Wachstum bei jedoch erhöhten Ansprüchen an die Feuchtigkeit. Es konnte belegt werden, dass die Ausbildung der unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Pilze deutlich durch das Klima beeinflusst wird. Insbesondere die Ausbildung von Konidien oder Sporen als Verbreitungs- und Überdauerungseinheiten trägt natürlich zu einer Ausweitung der Besiedlung in situ bei, unabhängig davon, ob diese über eine – wenn auch geringe – Luftbewegung oder möglicherweise auch eine Verbreitung durch Insekten erfolgt.

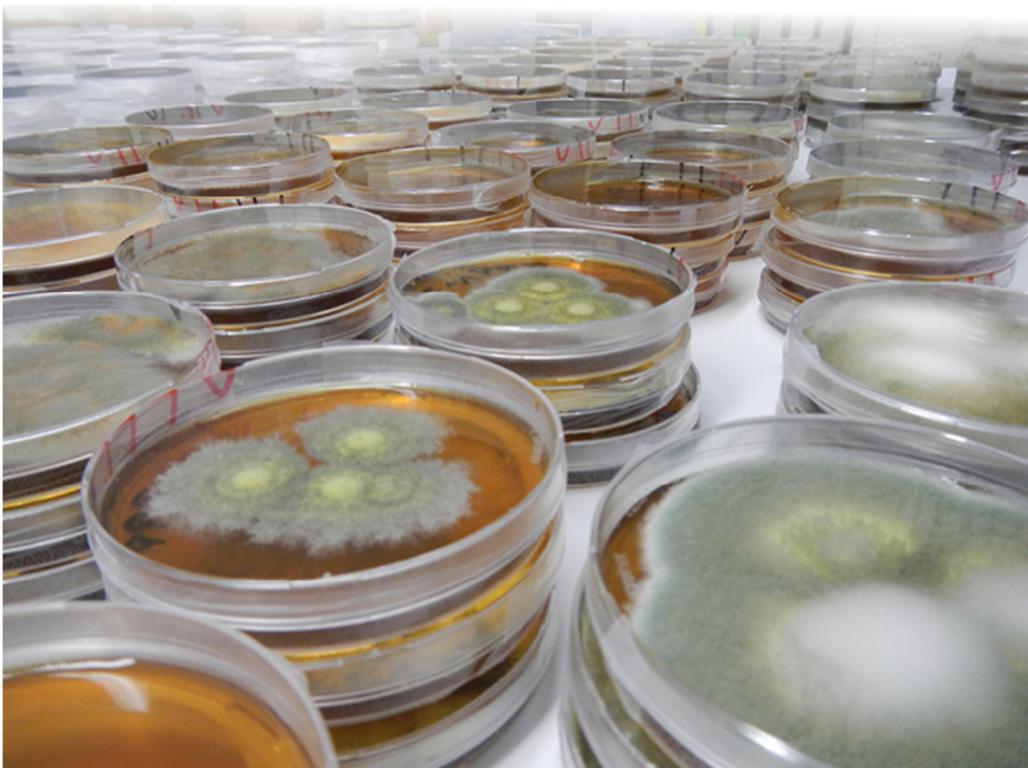


Abb. 23 Nährböden mit unterschiedlichen, jedoch unter konstanten Bedingungen kultivierten Besiedlungen

Spiegelt man die in den Laborversuchen unter Dauerkulturbedingungen erzielten Ergebnisse vor den in den Instrumenten tatsächlich aufgezeigten Klimadaten wider (siehe 3.4), so zeigt sich, dass die zum Wachstum im Laboransatz erforderlichen Bedingungen insbesondere im Hinblick auf die Feuchtigkeit nur sehr kurzfristig, wenn überhaupt in den Orgeln eintreten. In situ müssen daher weitere Faktoren eine Rolle spielen. In einem ergänzenden Versuch wurde deshalb ein langfristig bei 75 % relativer Feuchte konditioniertes Fichtenholz in eine geschlossene Kammer eingebracht und in dieser die Wasseraktivität des Materials über die Messung der relativen Luftfeuchte in der Kammer bestimmt. Bei Erhöhung der Temperatur für den Versuchsansatz von 16 auf 25 °C, zeigte sich ein zunächst nicht erwarteter Anstieg der relativen Feuchte im Versuchsgefäß (Abb. 24), was gleichbedeutend mit einer höheren Wasseraktivität an der Holzoberfläche und damit verbesserten Bedingungen für die Schimmelpilze ist.

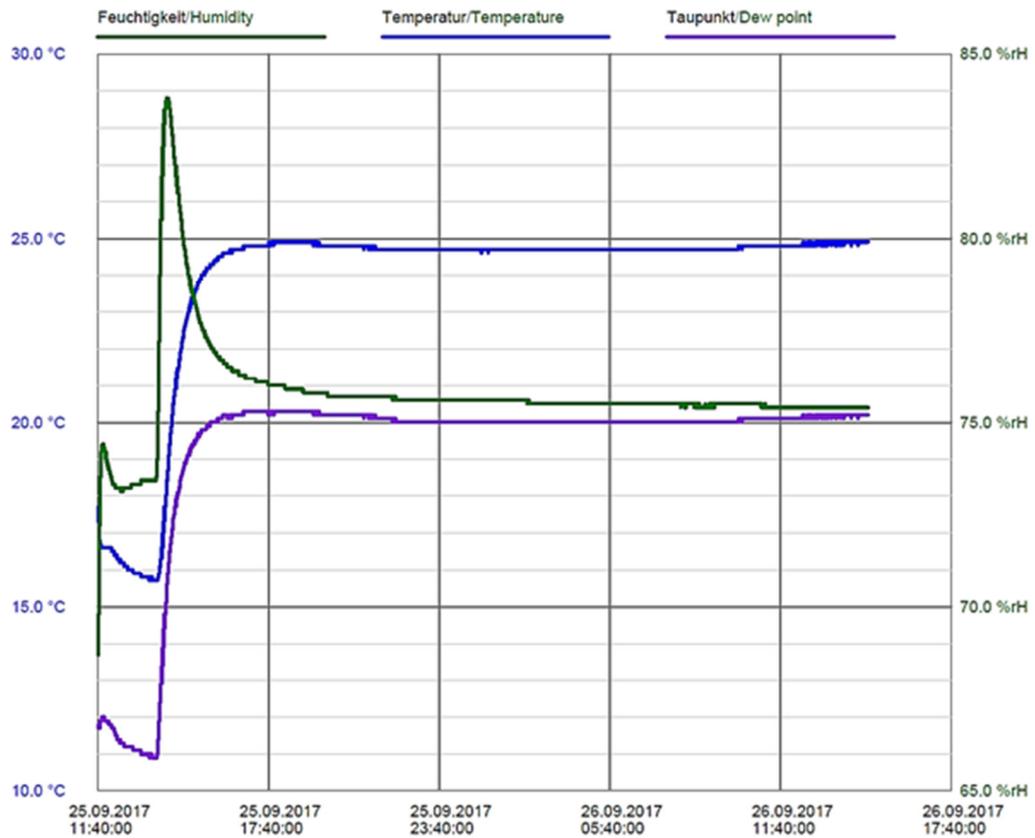


Abb. 24 Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit bei Temperaturerhöhung

Dieser vorübergehende Anstieg der Feuchtigkeit wird unter den gleichbleibenden Bedingungen der Anzuchtversuche im Labor nicht erreicht. Darüber lassen sich die abweichenden Ansprüche, verglichen mit der Situation im realen Objekt, erklären. Einen entsprechenden Anstieg der relativen Luftfeuchte in verhältnismäßig geschlossenen Instrumenten belegen auch eigene Messungen in anderer Situation (Abb. 25).

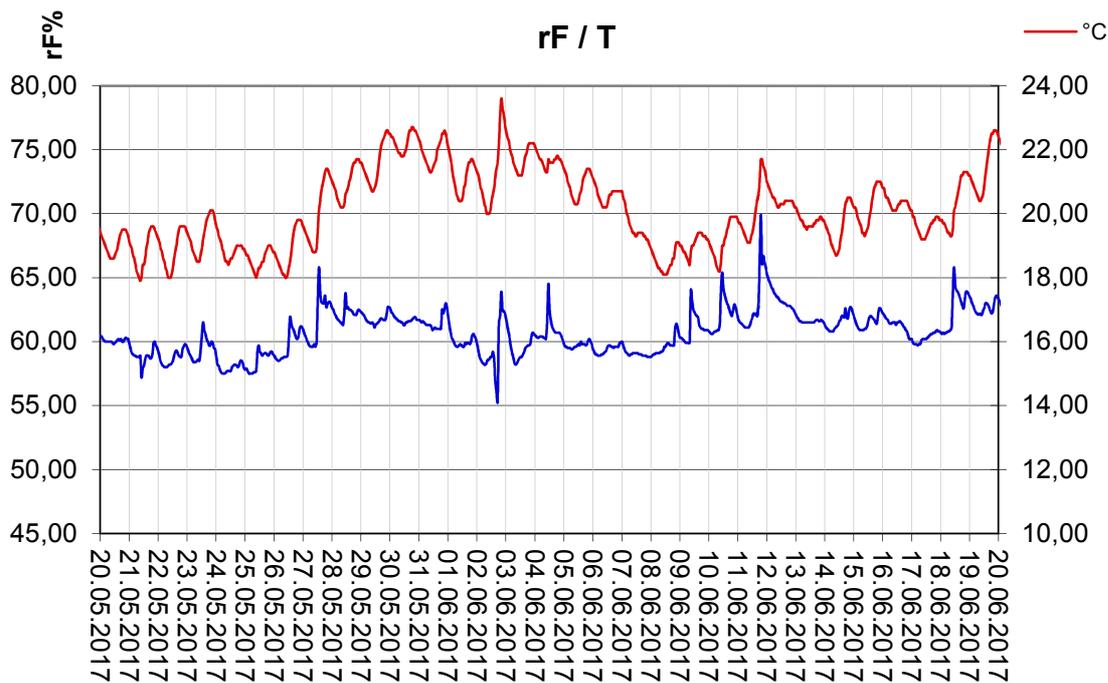


Abb. 25 Der Anstieg der relativen Feuchte (blaue Kurve) bei Temperaturerhöhung im Zeitraum 29.5. bis 4.6., 5.6. bis 11.6. und 12./13.6. ist nicht über die Nutzung/ das Besucheraufkommen zu erklären

Auch Daten, die durch die Mitarbeiter des IDK erhoben wurden, zeigen diesen Effekt. Ebenso werden dort durch die Veränderung des globalen Klimas bedingte Erklärungsmöglichkeiten für die beobachtete verstärkte Besiedlungsintensität an Orgeln in den letzten Jahrzehnten aufgezeigt, die sich aus der höheren Temperatur und höherer Luftfeuchte, basierend auf den real gemessenen Daten, berechnen lassen (siehe 3.4).

Auswirkungen von Lacken, Überzügen und Fassungen

Das Aufbringen verschiedener Überzüge (Beschichtungen) auf die Holzoberflächen der Instrumente kann unterschiedliche Auswirkungen haben. Einerseits sind einige der Materialien in der Lage, aus der Luft Feuchtigkeit einzulagern und diese dann den Mikroben zum Wachstum zur Verfügung zu stellen. Dieser Effekt konnte bereits für Kasein- oder Schellackaufstriche belegt werden (Spiegel, 2008). Für Hylotox wird dagegen diskutiert, dass die öligen Bestandteile dazu führen könnten, die Feuchtigkeit auf den so behandelten Holzoberflächen zu erhöhen, da eine Aufnahme der Feuchtigkeit in das Holz hinein (Pufferwirkung des Holzes) weitgehend verhindert werden könnte. Darüber hinaus können organische Anteile der Überzüge auch als Nahrungsquelle für den Schimmel dienen.

Für die Laborversuche standen die an den jeweiligen Objekten tatsächlich aufgetragenen und in Untersuchungen der FH Potsdam nachgewiesenen Materialien nicht zur Verfügung. Daher wurde in den Ansätzen auf handelsübliche Materialien zurückgegriffen. Für die Ansätze mit diesen Produkten erfolgte parallel auch ein Ansatz auf den Filmen, bei dem auch Nährlösung zugesetzt wurde, die in jedem Fall das Wachstum der Schimmelpilze ermöglichen sollte. Bleibt daher auf den Materialien mit Nährlösungszusatz ein Wachstum aus, so ist dies als deutlicher Hinweis auf ein dem Material zugesetztes (in der Regel nicht auf dem Etikett ausgewiesenes) Biozid anzusehen. Eine derartige Hemmung wird für die Alkydfarbe aufgezeigt.

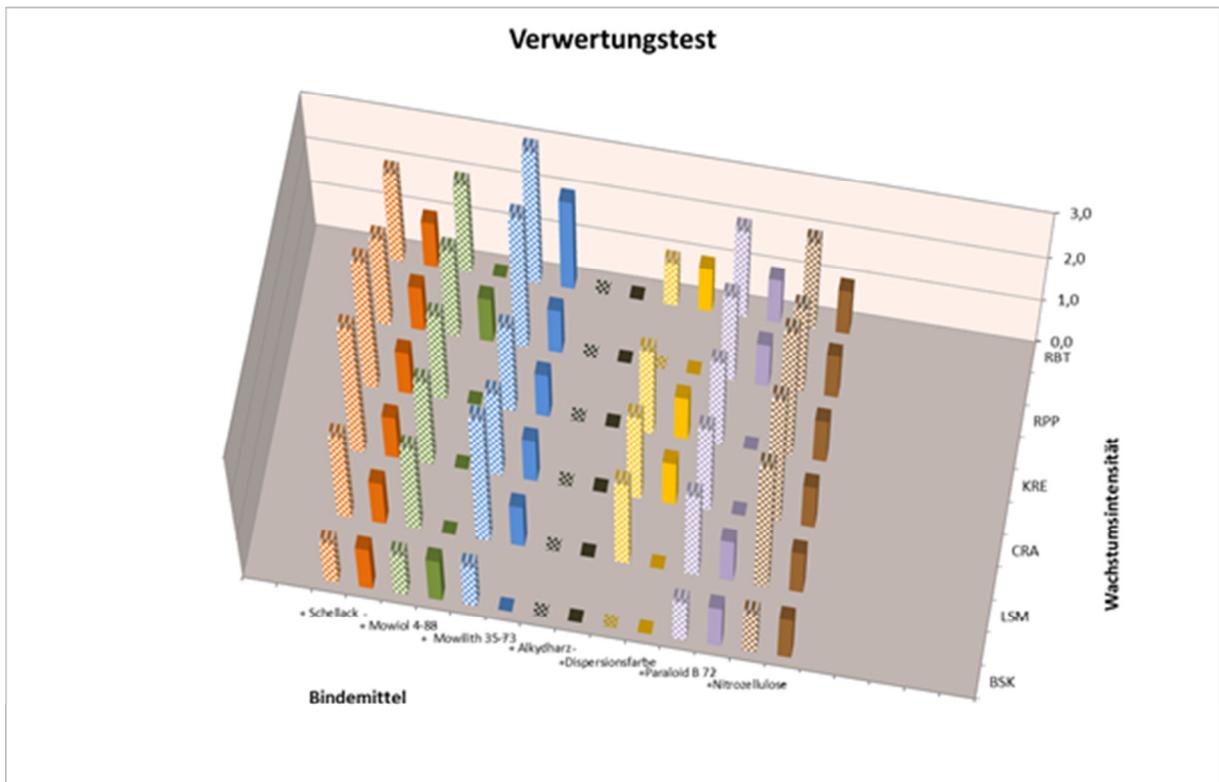


Abb. 26 Verwertungstest mit unterschiedlichen handelsüblichen Beschichtungen

Eine Verwertung von Schellack konnte für alle getesteten Isolate belegt werden, ebenso wurde Nitrozellulose von allen Isolaten eindeutig verwertet. Beide Materialien können an den Instrumenten erwartet werden, wobei Schellack eher im historischen Kontext, Nitrozellulose dagegen eher an moderneren Instrumenten (oder Bauteilen) zu finden sein dürfte. Alle *Eurotium*-Isolate, nicht aber *Aspergillus restrictus* wuchsen auf Polyvinylacetat. Diese Beobachtung wurde bereits von Gatsch (2006) für das Isolat aus St. Peter und Paul in Reichenbach gemacht, das Ergebnis wurde hier bestätigt.

Nicht abschließend bewertet werden konnte nach 28 Tagen Versuchsdauer die Frage nach der Verwertung von Milcheiweiß (Kasein). Auf Kaseinaufstrichen konnte für alle Isolate ein Wachstum erzielt werden, jedoch ist hier nicht auszuschließen, dass dieses auf Milchzucker oder Milchfett beruht. Der Lysehof, der sich durch die Verwertung von Milcheiweiß in Nährmedien zeigen sollte, wurde bisher nur für *Aspergillus restrictus* nachgewiesen. Möglicherweise sind aber die *Eurotium*-Isolate nach vollständiger Verwertung aller weiteren Nährstoffe wie Milchzucker und Milchfett in der Lage, auf die Verwertung von Milcheiweiß umzuschalten, die Untersuchung hierzu wird fortgesetzt. Grundsätzlich lässt sich auch nicht ausschließen, dass aufgebrachte Überzüge eine natürliche Hemmwirkung durch Holzinhaltsstoffe negativ beeinflussen, wie sie für Eiche aber auch Kiefer zumindest für Bakterien nachgewiesen ist (Milling et al., 2005). Hier könnte durch die Überzüge eine Art Absperreffekt erzielt werden.

Bei gefassten Instrumenten muss zumindest im historischen Kontext auch mit Anteilen von Blei oder Zink gerechnet werden. Um diesen Aspekt zu untersuchen, wurde Nährböden Zink und Bleiweiß in unterschiedlichen Konzentrationen (0,001 bis 0,1 mol/l) zugesetzt. Für die Zugabe von Zinkchlorid und Zinksulfat konnte eindeutig eine konzentrationsabhängige Hemmwirkung aufgezeigt werden.

Isolat	ZnCl ₂ 0,01mol/l	ZnCl ₂ 0,005mol/l	ZnCl ₂ 0,001mol/l	ZnSO ₄ 0,01mol/l	ZnSO ₄ 0,005mol/l	ZnSO ₄ 0,001mol/l
BSK	0	54,9	95,4	0	36,8	106,2
KRE	0	0	79,5	0	0	67,9
CRA	0	50,3	82,5	11,4	40,1	97,3
LSM	0	0	83,8	0	0	93,1
RPP	0	0	82,7	0	0	91,5
RBT	0	56,9	97,1	0	0	53,1

Tab. 2 Konzentrationsabhängige Hemmung des Wachstums (%) durch Zinkanteile

Für Bleiweiß war diese konzentrationsabhängige Hemmwirkung nur gegen die Isolate aus St. Marien, Lübeck, und St. Trinitatis, Reichenbach, nachzuweisen.

Auswirkung von Schwefeldioxid und Stickoxiden in der Luft

Auf die Frage nach der möglichen Auswirkung von verringerten Schadstoffbelastungen in der Luft ergaben sich im Hinblick auf die Versuche mit Sulfid- bzw. Nitritzusatz ebenfalls Ergebnisse, die es nahelegen, dieser Verringerung einen Anteil an den wachsenden Problemen einer Schimmelbelastung durch Aspergillus-Arten zuzuweisen.

Isolat	0,01 mol/l NaNO ₂	0,05 mol/l NaNO ₂	0,1 mol/l NaNO ₂	0,01 mol/l Na ₂ SO ₃	0,05 mol/l Na ₂ SO ₃	0,1 mol/l Na ₂ SO ₃
<i>Eurotium herbariorum</i> (RBT)	31,8	25,3	17,1	30,8	22,2	15,8
<i>Eurotium herbariorum</i> (RPP)	19,9	16,3	12,8	31,4	21,3	16,6
<i>Eurotium rubrum</i> (KRE)	25,0	15,1	8,3	38,7	29,1	22,2
<i>Eurotium rubrum</i> (CRA)	26,3	18,4	14,0	28,7	26,1	17,7
<i>Aspergillus restrictus</i> (BSK)	30,3	20,0	17,7	39,0	42,5	41,3
<i>Eurotium amstelodamii</i> (LSM)	20,0	16,4	12,7	27,6	25,6	17,2

Tab. 3 Wachstumshemmung bezogen auf den Koloniedurchmesser (%) bei Zugabe von Nitrit bzw. Sulfid

Um die Auswirkungen von Schwefeldioxid und Stickoxiden auf mikrobielles Wachstum zu untersuchen, wurden Nährböden mit der gelösten Form dieser Gase verwendet. Die Laborversuche zum Wachstum der Isolate auf den Nährmedien mit unterschiedlicher Sulfit- und Nitritkonzentration bestätigten die hemmende Wirkung von Sulfit. Es wurde den Nährböden Sulfit bzw. Nitrit in Konzentrationen von 0,01 bis 0,1 mol/l zugesetzt. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine mögliche Änderung des pH-Wertes konnte in ergänzenden Versuchen ausgeschlossen werden. Die Beurteilung der Wachstumsintensität erfolgte nach 21 Tagen Versuchsdauer über den Koloniedurchmesser.

Gesundheitsgefährdung und Materialschädigung durch die angetroffenen Schimmelpilze?

Auf die Frage der Gesundheitsgefährdung durch die relevanten Schimmelpilze soll an dieser Stelle mit Blick auf die Rezipienten dieses Berichts, die als Kantoren und Orgelbauer regelmäßig mit den Schimmelpilzen in Kontakt kommen, wenigstens kurz eingegangen werden.

Als beruhigend kann herausgestellt werden, dass die tatsächlich in den Orgeln ausgebildete Besiedlung nicht als gesundheitsgefährdend eingestuft werden muss. Die Einstufung der in situ aktiven Pilzarten nach TRBA 460 gemäß der Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen (Biostoffverordnung) Juli 2016, erfolgt ausschließlich in die Risikogruppe 1. Diese Zuordnung ist zulässig, da es bei diesen Arten unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen. Abweichend wäre hier die mögliche Gefährdung von Personen mit geschädigtem Immunsystem zu beurteilen. Auch kann eine allergene Wirkung im Einzelfall nicht ausgeschlossen werden, insbesondere bei Atopikern.

Ferner ist zu sagen, dass einige Arten der *Aspergillus glaucus*-Gruppe Keratin abbauen können. In seltenen Fällen ist von Haut- oder Nagelmykosen berichtet worden, die durch diesen Pilz hervorgerufen wurden. Über invasive Mykosen in inneren Organen liegen nach unserem Kenntnisstand für diese Arten keine Dokumentationen vor. Ebenso können durch *Aspergillus glaucus* Mykotoxine (Pilzgifte) produziert werden, insbesondere Phycion, Echinulin und Ochratoxin A.

Das Vorkommen von Ochratoxin A konnte in anderem Zusammenhang in den Stäuben besiedelter Kirchen nachgewiesen werden (Böer, 2004), lag jedoch um Zehnerpotenzen unter dem für den Verzehr von Lebensmitteln angegebenen Grenzwert. Unsere Untersuchungen in anderem Zusammenhang zeigen, dass die Gefahr der inhalativen Aufnahme dieser Keime als Voraussetzung für eine Infektion im Bereich der Atmungsorgane sowohl im Bereich der Orgel als auch im Kirchenschiff als eher gering einzustufen ist. Obwohl Befall in Orgelpfeifen nachgewiesen werden konnte, war auch nach dem Spielen der Orgel weder keimfähiges lebendes Zellmaterial in der Raumluft vorhanden, noch konnten nicht mehr keimfähige Zellen dieser Arten in der Luft nachgewiesen werden, so dass hier keine Gefährdung der Gemeinde durch Mykosen beim Spielen einer verschimmelten Orgel zu erwarten ist. In nur einer der in anderem Zusammenhang hierauf getesteten Kirchen konnte eine Veränderung der Schimmelbelastung in der Kirche beim Spielen der Orgel gezeigt werden. Hier veränderte sich das Artenspektrum in Richtung der zum selben Zeitpunkt in der Außenluft anzutreffenden Belastung. Zu erklären ist dieser Umstand damit, dass die Luft für die Orgel im beschriebenen Fall direkt aus der Außenluft gezogen wurde.

Auch erfüllen nicht alle der aus den Orgeln isolierten Stämme die Grundvoraussetzung für eine Infektion, da zwei der Isolate (*Aspergillus restrictus*, BSK und *Eurotium rubrum*, KRE) sich als nicht thermotolerant erwiesen, d.h. sie waren nicht in der Lage, bei Körpertemperatur zu wachsen.

Hinsichtlich einer **Materialschädigung** ist hier darauf zu verweisen, dass den Pilzen an den Objekten in aller Regel die Überzüge oder Staubauflagerungen als Nahrungsquelle dienen, nicht jedoch das Holz.

Die Holzzellwände können durch die Pilze nicht als Nahrungsquelle genutzt werden. Die Grundsubstanz ist somit durch den Befall nicht gefährdet. Möglich ist jedoch die Verwertung von Holzinhaltstoffen wie Eiweißen, Fetten oder Kohlenhydraten, diese jedoch nicht in Form lignifizierter Zellulose, wie sie in der Zellwand vorliegt. Bedenklich für den Erhalt wird der mikrobielle Befall allerdings bei organisch gebundenen Malschichten oder Lederteilen.

In keinem der darauf untersuchten Fälle konnte bei Besiedlung durch diese Arten ein Eindringen in tiefere Zelllagen des Holzes beobachtet werden, es handelte sich immer um eine oberflächliche Besiedlung. Daraus ergibt sich aber auch die Situation, dass bei jedem Klimawechsel, der mit einer Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit in das Holz hinein oder aus dem Holz heraus im Zusammenhang steht (Abb. 24), entsprechend feuchte Luft an der Besiedlung vorbeistreicht, so dass den Pilzen in solchen Zeiten deutlich mehr Feuchte zur Verfügung steht, als die Klimadaten für die Raumlufffeuchte dies erwarten lassen (Krüger, 2015). Das heißt, dass jeder Klimawechsel eine Verbesserung der Wachstumsbedingungen für die Pilze bedeuten kann, weil für kurze Zeit zusätzliche Feuchte an den besiedelten Oberflächen vorhanden ist. Es genügt deshalb nicht, lediglich im Kirchenraum und nicht direkt an/in der Orgel das Klima zu erfassen, um die Wachstumsbedingungen zu bewerten und das Risiko abzuschätzen (s.u.).

Arbeitsschutzaspekte

Häufig fand die Forschungsgruppe in früheren mikrobiologischen Untersuchungsprotokollen über Schimmel an Orgeln auch Pilzarten aufgeführt, die für Menschen als gesundheitsschädlich eingestuft sind.

Bei den Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnten diese besonders gesundheitsrelevanten Arten nicht als Befall an Orgeln gefunden werden, sondern nur eine erstaunlich kleine Gruppe von Arten, die sich sehr ähnlich sind und kaum gesundheitliches Gefahrenpotential haben. Generell – unabhängig von einem Schimmelbefall – ist bei der Arbeit an Objekten, bei denen Staub in Bewegung gerät, eine Ausrüstung zum Schutz der Gesundheit zu empfehlen. Dies ist schon wegen der hohen Anzahl an Orgeln der Fall, die in der Vergangenheit mit Holzschutzmitteln behandelt worden sind. Bis auf PCP (Pentachlorphenol) besitzen die häufigsten Holzschutzmittel wie Hylotox, die als Wirkstoffe DDT, Lindan, und Pyrethroide enthalten, einen so niedrigen Dampfdruck, dass sich Bearbeiter vor allem vor Schadstoffen in fester Form, also vorwiegend vor Staub zu schützen haben. Folgende einfache Schutzausrüstung reicht daher in den meisten Fällen bei der Arbeit an den Objekten aus. Es sollte eine gut angepasste Partikelfiltermaske mit der Partikelfilterklasse P2 oder besser noch P3 getragen werden, dazu Einweghandschuhe aus Nitrilkautschuk und Arbeitskleidung, die nach der Arbeit abgelegt wird. Bei starker Belastung kann die Schutzausrüstung weiter angepasst werden.

Da bei der üblichen Kirchennutzung sowie beim Spielen der Orgel keine nennenswerten Mengen an Staub in Bewegung geraten, brauchen sich Organisten, Bedienstete und Kirchenbesucher nicht zu schützen. Für sie geht keine Gefahr von Schimmel und Holzschutzmitteln in der Orgel aus.

3.4 Einfluss klimatischer Umgebungsbedingungen auf das Schimmelwachstum

Die Werteverläufe der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperaturen für die einzelnen Messbereiche in den Orgelgehäusen, in den Räumen der Kirchenschiffe und für das Außenklima wurden kombiniert dargestellt. Die einzelnen Klimadaten aus den Orgelgehäusen wurden mit den Messergebnissen aus den Kirchenschiffen und dem Außenklima verglichen. Gleiches erfolgte für die Berechnungsgröße der absoluten Luftfeuchte aus den Untersuchungsbereichen. Insgesamt ergaben sich aus dieser Auswertung bisher 150 Diagrammdarstellungen. Zur Veranschaulichung der sehr unterschiedlichen raumklimatischen Messergebnisse werden im vorliegenden Abschlussbericht lediglich die Klimadaten aus den Orgelgehäusen der Vertiefungsobjekte präsentiert.

Im Ergebnis der Klimamessungen über ca. einen Jahresverlauf bestätigte sich in der Mehrzahl der Fälle die Annahme, dass in Kirchen mit hoher relativer Luftfeuchte und entsprechenden Temperaturen Schimmelwachstum verstärkt auftrat und in Kirchen mit niedriger relativer Luftfeuchte dies nur eingeschränkt zu beobachten war. Ebenso zeigte sich, dass in den Orgelgehäusen, in denen in verschiedener Höhe eine Klimamessung erfolgte, die Luft im oberen Orgelgehäuse trockener und wärmer war, was wiederum mit einer geringeren Schimmelausbreitung korrelierte. Das exemplarische Gegenbeispiel der Kirche in Krevese mit relativ hoher Luftfeuchte und nur geringem Schimmelbefall belegt aber auch, dass die umgebenden Raumklimabedingungen nicht die allein bestimmenden Faktoren sind, die zwangsläufig zu einer Schimmelbesiedlung führen (siehe Abb. 27).

Bedingt durch unterschiedliche Geräteprogramme für die Klimaaufzeichnung wechseln die Wertachsen für die relative Luftfeuchte [%rF] bzw. die Lufttemperatur [°C] zwischen der linken und der rechten Seite der Diagramme. Die durchgezogenen blauen Gitternetzlinien beziehen sich immer auf die relative Luftfeuchte.

Einheitlich werden alle Werteverläufe der relativen Luftfeuchte als rote Kurven und die der Lufttemperatur als grüne Kurven dargestellt. Die Aufzeichnungszeiträume sind in den Zeitachsen ablesbar. Die Abfolge der Klimadiagramme ordnet sich im Folgenden nach der Eingruppierung der Mikrobiologen in (1.) Orgelgehäuse mit geringem, (2.) mittlerem und (3.) starkem Schimmelbefall (siehe Abb. 27 bis Abb. 44).

1. geringer Schimmelbefall

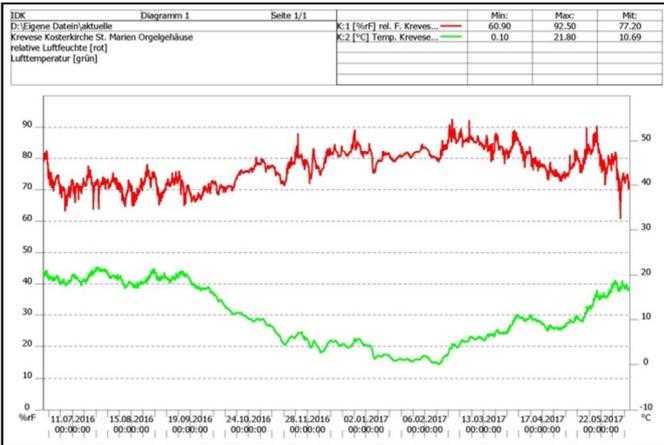


Abb. 27 Orgelgehäuse Krevese, Klosterkirche

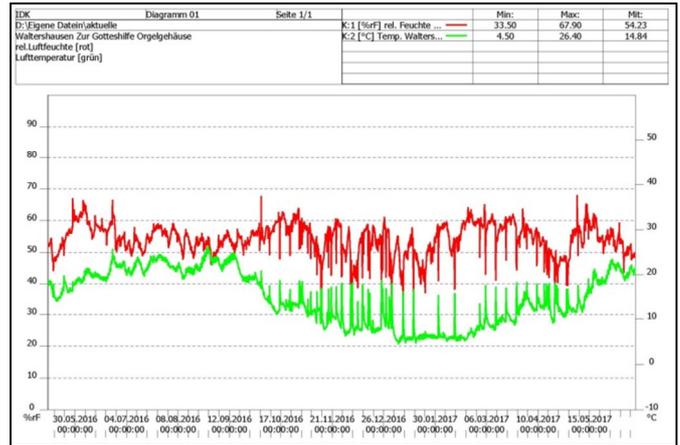


Abb. 28 Orgelgehäuse Waltershausen, Stadtkirche

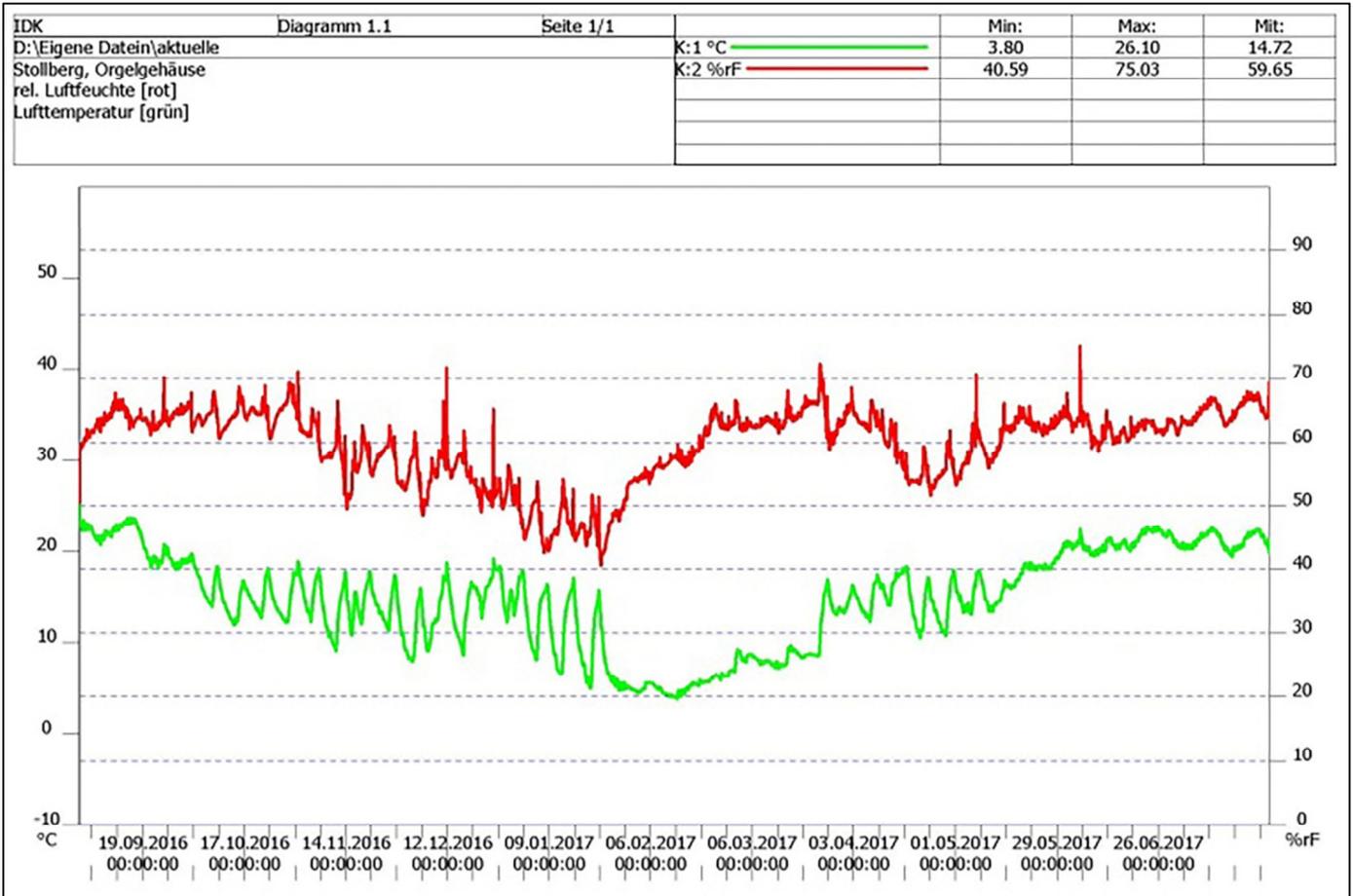


Abb. 29 Orgelgehäuse Stollberg, beispielhaft vergrößert

2. mittlerer Schimmelbefall:

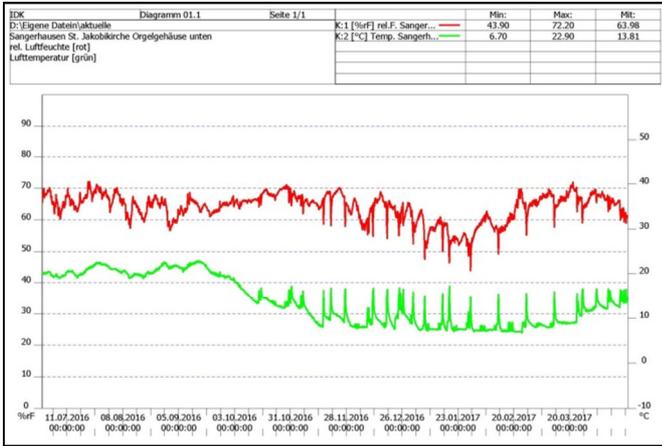


Abb. 30 Orgelgehäuse Sangerhausen St. Jakob

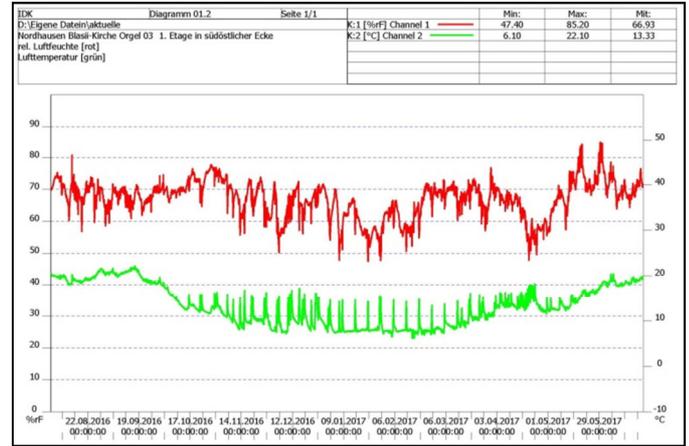


Abb. 31 Orgelgehäuse Nordhausen St. Blasii

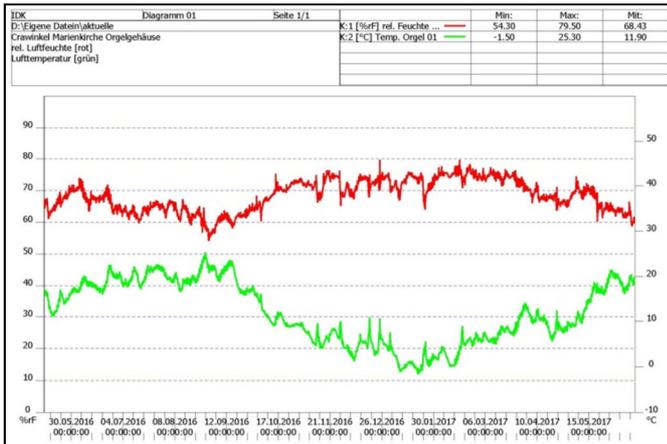


Abb. 32 Orgelgehäuse Crawinkel Marienkirche

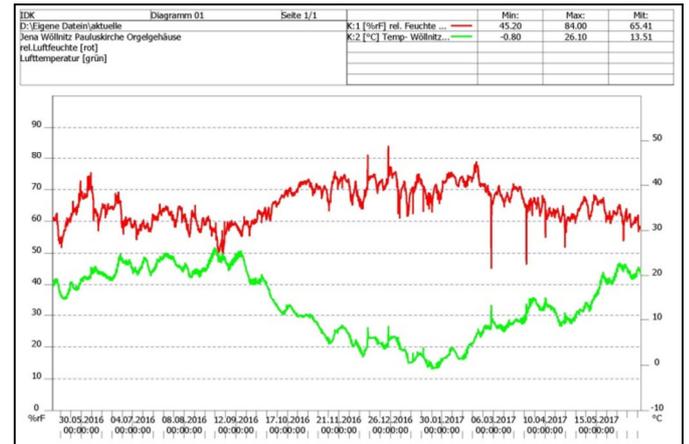


Abb. 33 Orgelgehäuse Jena-Wöllnitz Paulskirche

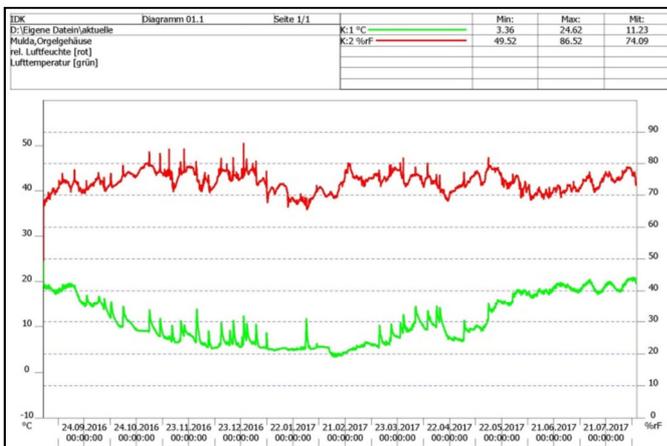


Abb. 34 Orgelgehäuse Mulda

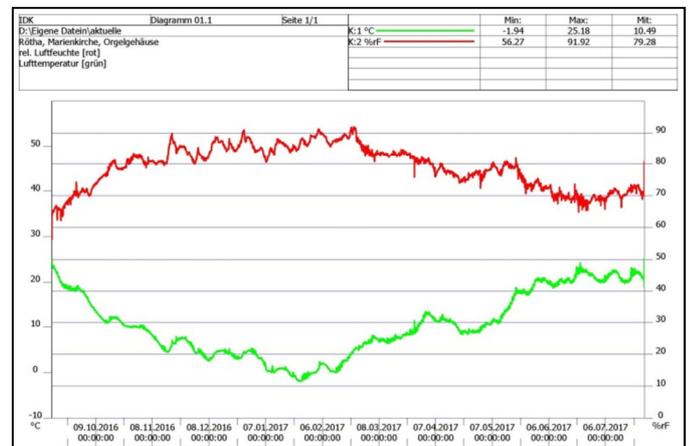


Abb. 35 Orgelgehäuse Rötha Marienkirche

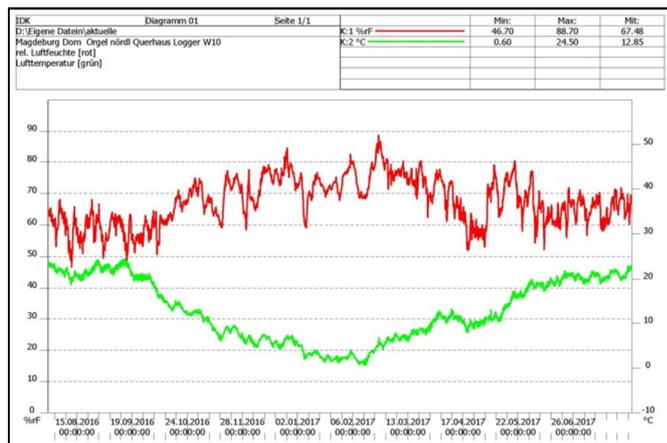


Abb. 36 Orgelgehäuse nördliches Querhaus Magdeburg Dom

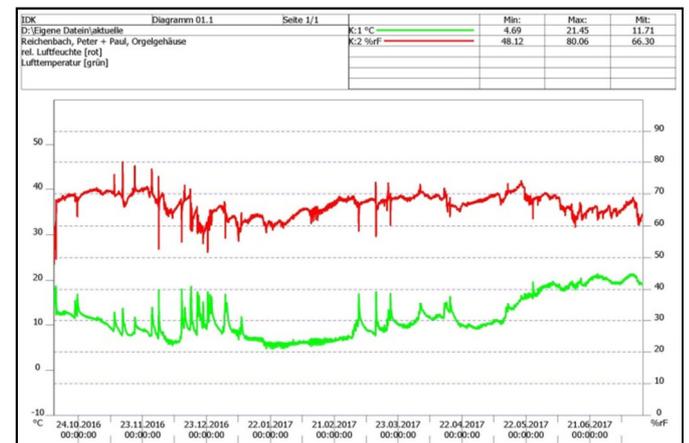


Abb. 37 Orgelgehäuse Reichenbach Peter und Paul Kirche

3. starker Schimmelbefall

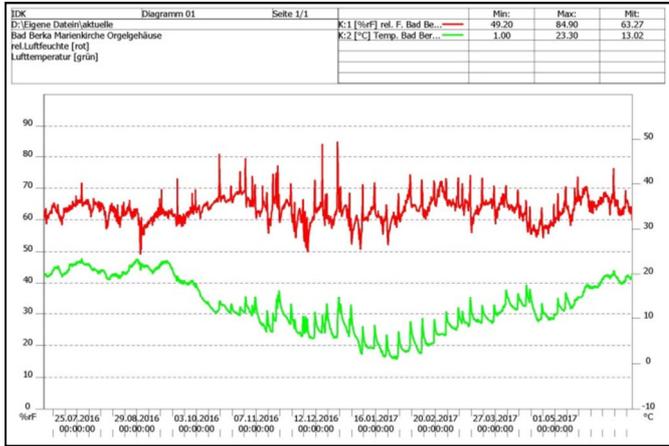


Abb. 38 Orgelgehäuse Bad Berka St. Marien



Abb. 39 Orgelgehäuse Dornburg St. Jacobi



Abb. 40 Orgelgehäuse Braunschweig St. Katharinen

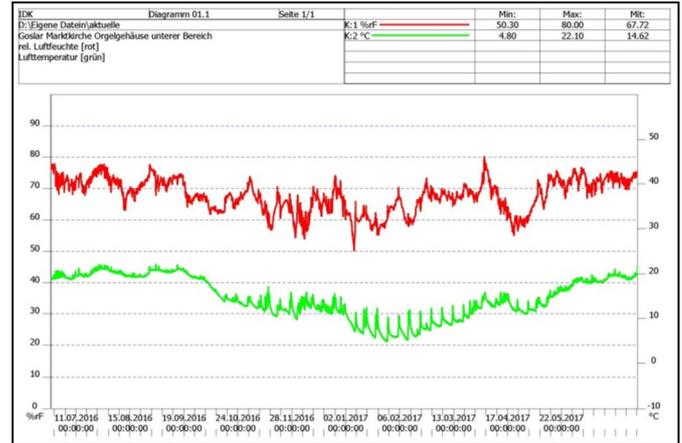


Abb. 41 Orgelgehäuse Goslar Marktkirche

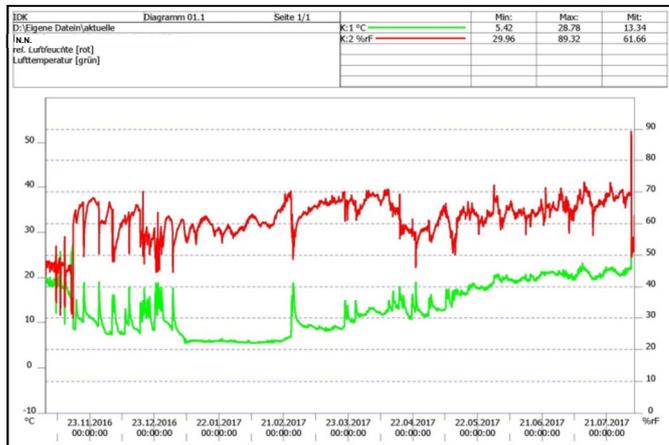


Abb. 42 Orgelgehäuse N.N. Nikolaikirche



Abb. 43 Orgelgehäuse Reichenbach Trinitatiskirche

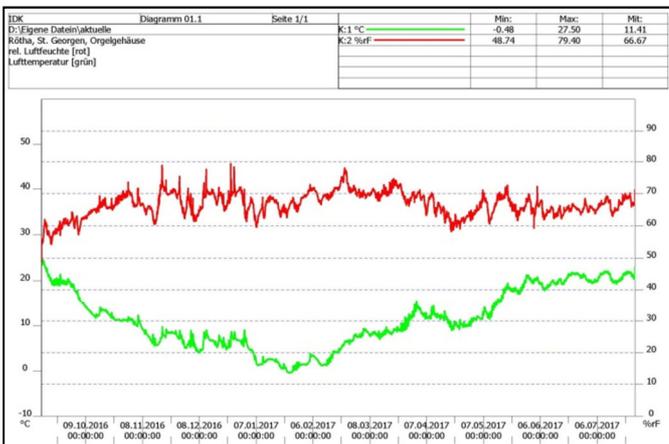


Abb. 44 Orgelgehäuse Rötha St. Georg

Die vorliegenden Vergleichsmessungen zwischen den Kirchenräumen und den Orgelgehäusen zeigen, dass sich nutzungsbedingte Einflüsse auf den Kirchenraum durch größere Personenzahlen oder die Inbetriebnahme von Heizungen zeitversetzt auf die Orgelgehäuse auswirken und Temperaturerhöhungen zu einer anfänglichen Erhöhung der relativen Luftfeuchte im Orgelgehäuse und zum Beispiel auch an der schimmelbefallenen Oberfläche eines Metallträgers in St. Marien in Bad Berka führen (siehe Abb. 45).

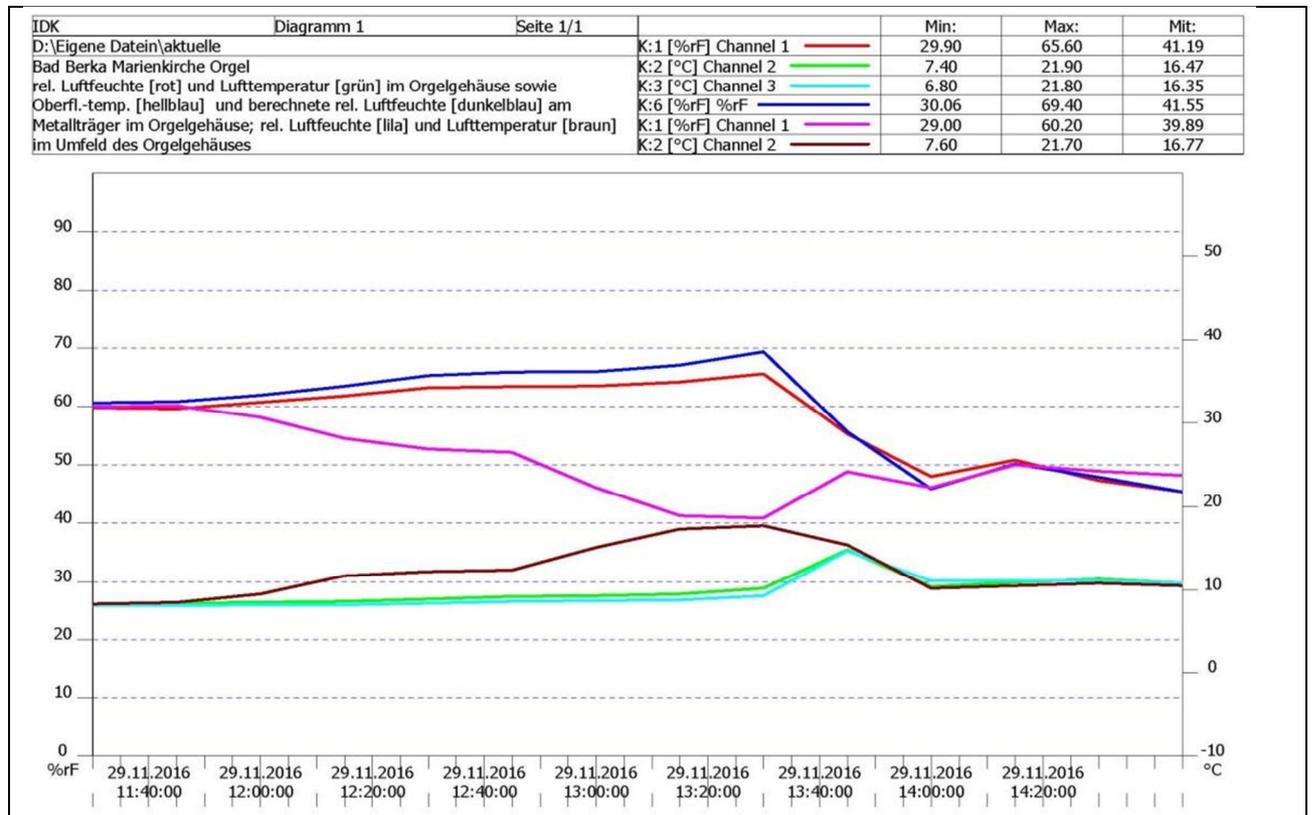


Abb. 45 Orgelgehäuse Bad Berka St. Marien

In der Folge des Ansteigens der Raumlufttemperatur [braun] im Kirchenschiff steigt auch die Lufttemperatur im Orgelgehäuse [grün] langsam an. Auffällig ist aber, dass die relative Luftfeuchte [rot] im Orgelgehäuse nicht wie im Kirchenschiff [lila] absinkt, sondern in einer ersten Phase ansteigt. Bemerkenswert ist außerdem, dass die auf der Grundlage der gemessenen Oberflächentemperatur am Metallträger [hellblau] für den Kontaktbereich der Raumluft zur Metallträgeroberfläche im Orgelgehäuse berechnete relative Luftfeuchte [dunkelblau] noch deutlich über der relativen Luftfeuchte [rot] im Orgelgehäuse liegt. Für die Bewertung des Einflusses der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur auf Orgeln ist daher die Erfassung der raumklimatischen Größen in den Orgelgehäusen unumgänglich. Eine ausschließliche Bewertung klimatischer Einflüsse aus dem Kirchenschiff auf die Orgel, wie zum Beispiel nutzungsbedingter Faktoren sowie als Auswirkung von Beheizung oder Belüftung, auf der Grundlage von Raumklimamessungen allein im Kirchenschiff reicht nach den vorliegenden Erfahrungen nicht aus.

Die separate Auswertung der Klimadaten aus den Orgelgehäusen zeigte aber, dass sich die Eingrenzung der Wachstumsbedingungen und -phasen des Schimmels auch daraus nicht mit der notwendigen Schärfe ableiten lässt. Erst die Korrelation der Klimaaufzeichnungen aus den Orgelgehäusen mit den im Labor in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und Temperatur

bestimmten Wachstumsbedingungen der jeweiligen Organismengruppen (siehe 3.3) ermöglicht sehr konkrete Aussagen über Zeiträume und raumklimatische Situationen, unter denen die Bedingungen für das jeweilige Schimmelwachstum vorliegen (siehe Abb. 46).

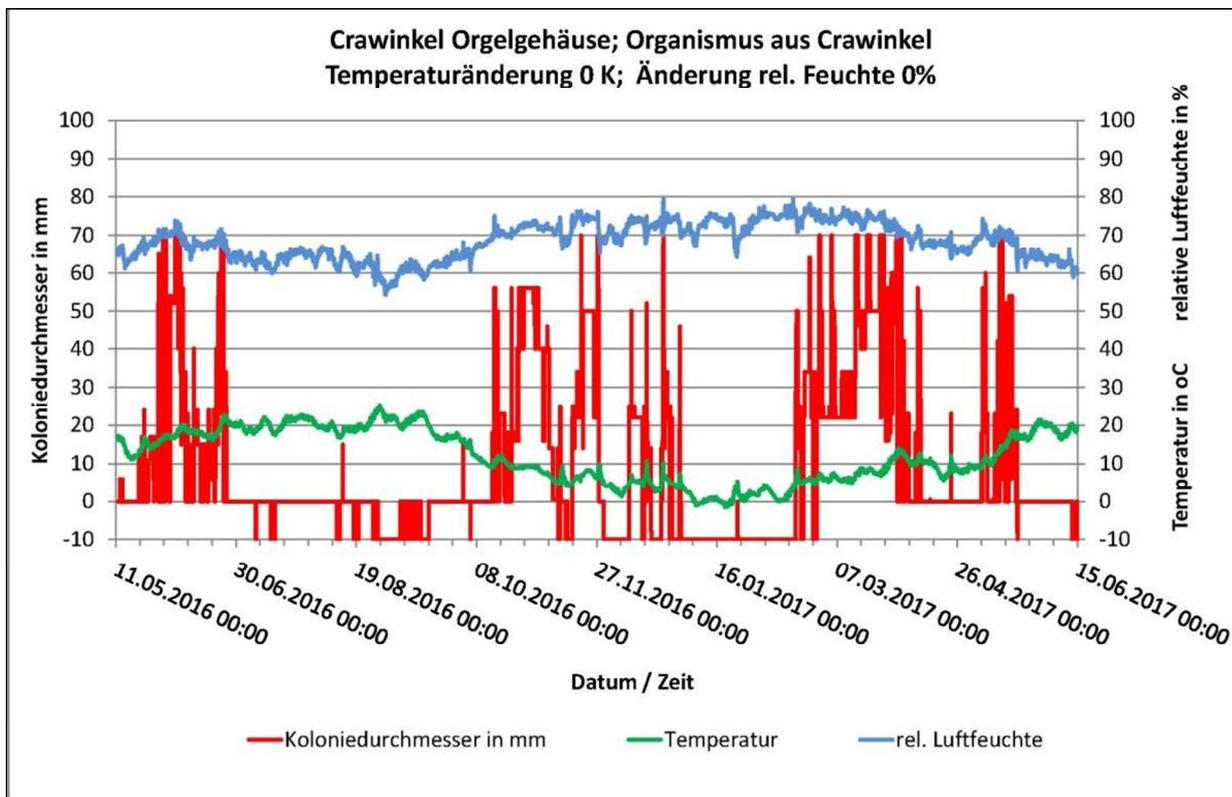


Abb. 46 Gegenüberstellung der Raumklimamesswerte aus dem Orgelgehäuse in Crawinkel mit den im Labor bestimmten Messwerten der klimaabhängigen Wachstumsbedingungen des Schimmelorganismus aus dieser Orgel

Bei der gewählten Darstellungsform werden die Werte der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur in gewohnter Form als Kurvenverläufe angegeben. Für die Darstellung der Wachstumsbedingungen der Schimmelorganismen wird der Durchmesser der Schimmelkolonien angegeben, wie er sich unter den verschiedenen Klimabedingungen der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur auf den Nährböden im Labor entwickelte. Sehr gute Wachstumsbedingungen der Schimmelorganismen markieren sich bei den entsprechenden positiven Kombinationen der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur als Werte mit großem Durchmesser der Schimmelpilzkolonien. Bedingt durch den Durchmesser der Nährbodenschalen sind die Koloniedurchmesser und damit deren maximal mögliche Werte auf 70 mm begrenzt. Im Ergebnis berücksichtigten Korrekturfaktoren, die durch die Mikrobiologen vorgegeben wurden, den Unterschied zwischen den Wachstumsbedingungen auf Nährböden im Labor und den Holzoberflächen in den Orgeln. Zur Unterscheidung zwischen nicht bestimmten bzw. nicht untersuchten Wertebereichen der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur von Untersuchungsergebnissen, die den Koloniedurchmesser von 0 mm aufweisen wurde der Wert -10 für alle nicht bestimmten bzw. nicht untersuchten Wertebereiche des Koloniewachstums vereinbart.

Über die verbesserte Eingrenzung der Wachstumsbedingungen und Zeiträume hinaus ermöglicht das Zusammenführen der Klimadaten und Wachstumsbedingungen ein erstes tieferes Verständnis

der klimatischen Einflussfaktoren, die sich als eine von mehreren verschiedenen Ursachen für die Zunahme der Schimmelbelastung in den Orgeln erweisen. Dieses tiefere Verständnis hat direkten Einfluss auf die Ursachenforschung hinsichtlich der Zunahme der Schimmelbesiedlung in einer Vielzahl von Orgeln. Es offenbart sich nun, dass nur sehr geringfügige Veränderungen der relativen Raumluftfeuchte und Temperatur in den Orgelgehäusen zur drastischen Verbesserung der Wachstumsbedingungen bereits beigetragen haben oder zukünftig beitragen könnten.

Da das entwickelte Bewertungsverfahren eine Simulation niedriger Lufttemperaturen und höherer Werte der relativen Luftfeuchte ermöglicht, bot sich die Betrachtung an, welchen qualitativen und quantitativen Einfluss derartige Veränderungen auf das Schimmelwachstum haben. Dazu war zunächst eine realistische Abschätzung möglicher Veränderungen notwendig. Nach der Einschätzung der Mikrobiologen ist für die Vergangenheit von um 2 K geringeren Temperaturen und 5% geringerer Luftfeuchte in der Schwankungsbreite der Jahre auszugehen. Diese Einschätzung wird gestützt durch die Ergebnisse des Deutschen Wetterdienstes und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, die auf der Tagung „Die Klimaentwicklung in Deutschland und in Thüringen. Auswertungen auf Basis von Daten des Deutschen Wetterdienstes“ durch Klaus-Jürgen Schreiber und Dr. Thomas Deutschländer sowie Frank Reinhardt und Dr. Kai Pfannschmidt 2014 in Erfurt vorgestellt wurden. Darüber hinaus dokumentierte der Vortrag für Deutschland eine im Mittelwert um 1,2 K höhere Jahresmitteltemperatur seit 1881. Diese ist verbunden mit einer deutlichen Abnahme von Eistagen sowie mit einer seit 1882 um 26% höheren Niederschlagsmenge im Winter.

Die nachfolgenden Darstellungen veranschaulichen den Einfluss einer um 2 K reduzierten Temperatur und in der Folge die Auswirkung der Absenkung der relativen Luftfeuchte um 5% rel. F auf der Basis der vorliegenden aktuellen Messwerte für Crawinkel (vergleiche Abb. 47, Abb. 48 und Abb. 49).

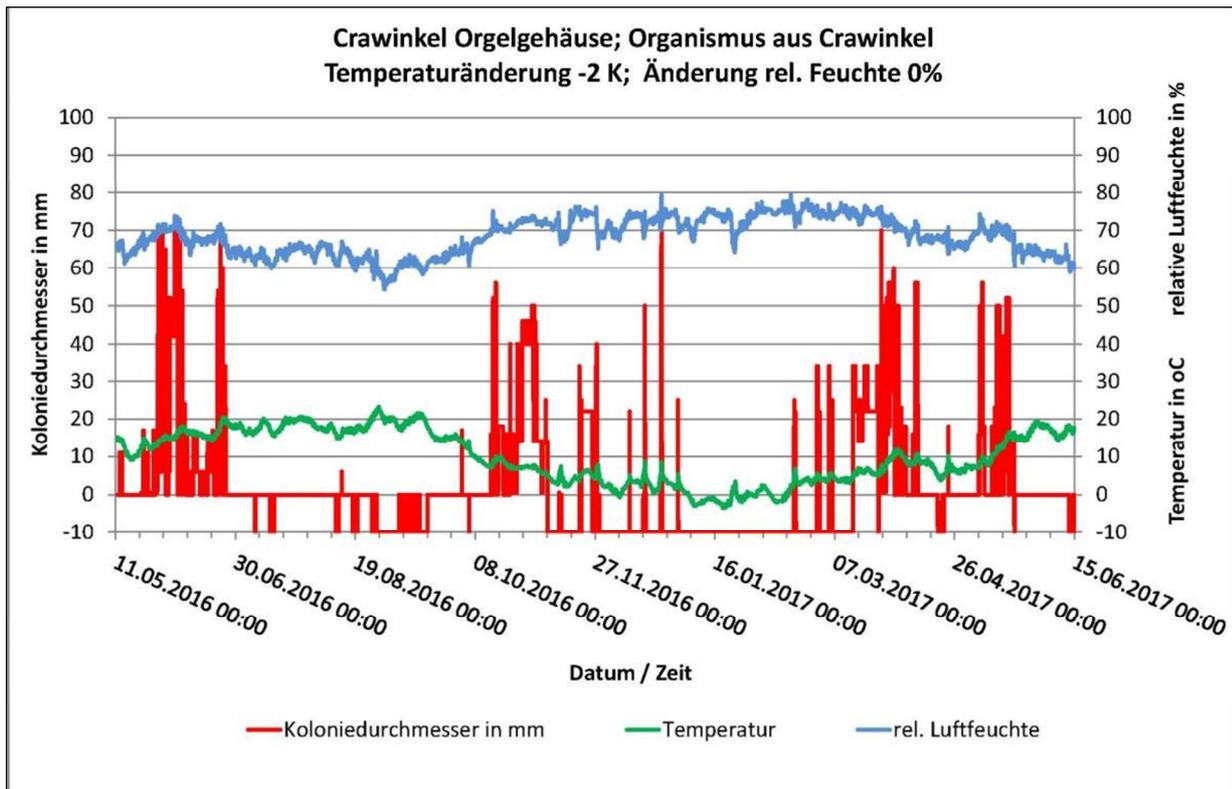


Abb. 47 Vergleich der um 2 K simuliert reduzierten Raumlufttemperatur und unveränderten relativen Raumluftfeuchte im Orgelgehäuse mit den sich daraus ergebenden Wachstumsbedingungen des Schimmelpilzes

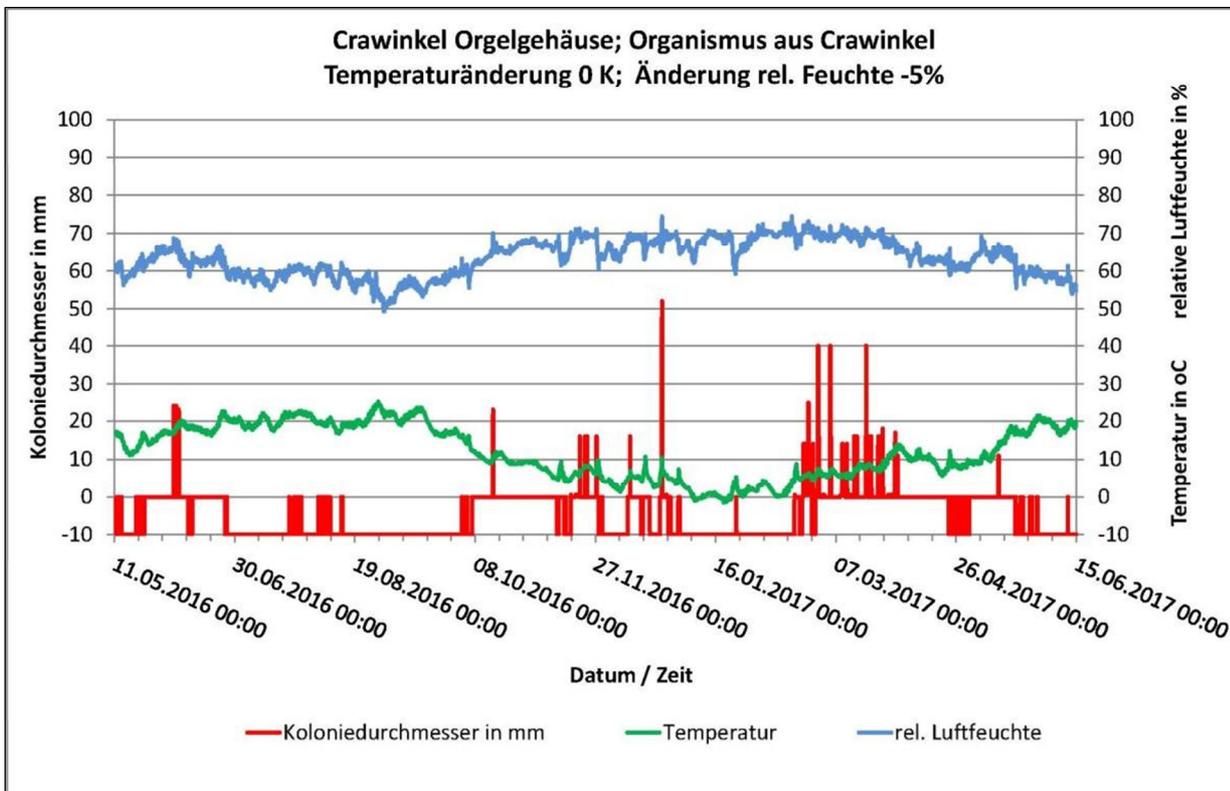


Abb. 48 Vergleich der um 5% rel. F simuliert reduzierten relativen Raumluftfeuchte und bei unveränderter Raumlufttemperatur im Orgelgehäuse mit den sich daraus ergebenden Wachstumsbedingungen des Schimmelpilzes

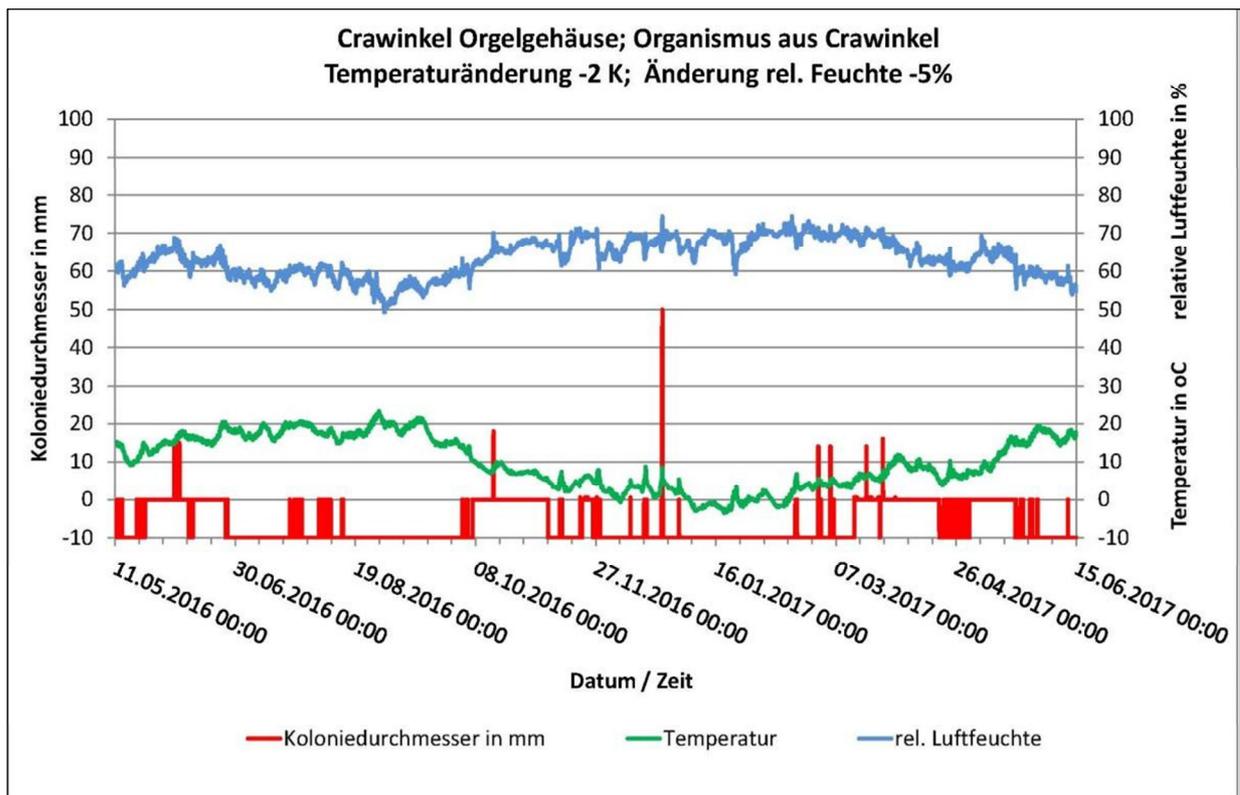


Abb. 49 Vergleich der um 5% rel. F simuliert reduzierten relativen Raumluftfeuchte und der ebenfalls simuliert um 2 K reduzierten Raumlufttemperatur im Orgelgehäuse mit den sich daraus ergebenden Wachstumsbedingungen des Schimmelpilzes

Die Simulation veranschaulicht den starken Einfluss geringer Veränderungen der Temperatur und Luftfeuchte auf das Schimmelwachstum in der Orgel. Im Umkehrschluss ist erkennbar, in welchem Maß sich die Wachstumsbedingungen bei geringfügiger Temperatur- und Luftfeuchteerhöhung verbessern. Die Winterhalbjahre und Übergangszeiten, die früher klimabedingt offenbar kein Schimmelwachstum ermöglichten, entwickeln sich zunehmend zu Zeiträumen, in denen sich die Wachstumsbedingungen für den Schimmel verbessern. Vor dem Hintergrund sich verändernder außenklimatischer aber auch nutzungsbedingter Einflüsse veranschaulicht die Klima- und Wachstumssimulation einen wichtigen Einflussfaktor für die Zunahme der Schimmelausbreitung in den Orgeln.

Die im Projekt entwickelten Bewertungsmethoden ermöglichen somit nicht nur eine rückwirkende Betrachtung der Entwicklung der Wachstumsbedingungen für den Schimmel, sondern auch eine Abschätzung der Auswirkung zukünftiger nutzungs- oder umweltbedingter raumklimatischer Veränderungen, so dass auf diesem Wege auch das Risiko eines künftigen Befalls abgeschätzt werden könnte.

Mit der Ursachenforschung zur zunehmenden Schimmelbesiedlung der Orgeln verbinden sich selbstverständlich auch Recherchen zu Vorgehensweisen und Behandlungsmethoden, die nachweislich zu einer Dämpfung des Schimmelwachstums führen.

Unter raumklimatischem Aspekt wird wiederholt der Verbesserung der Belüftung von schimmelbehafteten Oberflächen eine wachstumsdämpfende Wirkung bescheinigt. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, welche Wirkmechanismen diesem positiven Phänomen zugrunde liegen. Naheliegend sind die verbesserte Abtrocknung der Oberflächen und damit eine Absenkung

der relativen Luftfeuchte im Kontaktbereich der Raumluft zu den mit Schimmel besiedelten Oberflächen. Dieser Effekt tritt auch bei sehr hoher relativer Luftfeuchte und entsprechender Luftbewegung ein. Selbst bei einer relativen Luftfeuchte von 90% rel. F besitzt die Raumluft noch, je nach Lufttemperatur, die Kapazität, absolut Feuchtigkeit aufzunehmen. Bei 5°C sind dies ca. 0,69 g/m³ bei 10°C 0,96 g/m³ und bei 15°C 1,33 g/m³. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch eine gewisse Luftgeschwindigkeit, die an den Oberflächen vorzugsweise nicht nur zu einer laminaren, sondern besser zu einer turbulenten Luftströmung führen sollte. So zeigte sich in einem projektunabhängigen Untersuchungsfall in einem Saal mit 1300 m³ Raumvolumen, dass dieser Effekt bei 90% rel. Luftfeuchte sogar zu einer Austrocknung der mit Schimmelpilzen besiedelten Nährböden und damit zur Unterbindung des Schimmelwachstums führte.⁵ Daraus lässt sich ableiten, dass Luftbewegungen, die zu einer Abtrocknung und einem daraus eventuell entstehenden Feuchtigkeitsmangel beitragen, in jedem Fall einen Stresseinfluss auf das Schimmelwachstum ausüben.

Es lässt sich noch ein zweiter Einflussfaktor aus einer verbesserten Belüftung auf verschimmelte Oberflächen ableiten. So führen Luftbewegungen an den Oberflächen aller Lebewesen je nach Oberflächenbeschaffenheit zur Anregung von Feuchtigkeitsabgabe und Verdunstungsprozessen. Ein weiterer Stresseinfluss könnte dadurch hervorgerufen werden, dass bei dem Verdunstungsprozess durch den Entzug der Verdunstungswärme eine Kühlung der Oberfläche erfolgt. Die jeweilige Temperaturabsenkung ist abhängig von der Differenz zwischen der relativen Luftfeuchte an der feuchten Oberfläche und der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft sowie der Stärke der Luftbewegung. Um dies abschätzend zu berechnen, kann man sich der Psychrometerformel bedienen. Hierbei handelt es sich um ein meteorologisches Messgerät zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit bzw. der Feuchtkugeltemperatur. Durch Umstellung der Psychrometerformel ist es möglich, bei bekannter relativer Luftfeuchte der Umgebungsluft die Temperatur an einer feuchten Oberfläche zu berechnen. Eine wichtige Voraussetzung für eine korrekte Berechnung der Kühlung durch Verdunstung ist eine ausreichende Luftbewegung um die feuchte Oberfläche. Für die Funktion des Psychrometers wird von einem Mindestwert von 2 m/s ausgegangen. Geht man, wie für das Psychrometer vorgesehen, von einer uneingeschränkten Verdunstung an der zu kühlenden Oberfläche sowie einer idealen Luftbewegung um die Verdunstungsfläche aus, so ergibt sich beispielsweise für eine Oberflächen- und Lufttemperatur von 18°C rein rechnerisch eine Abkühlung bei 80% rel. F der Umgebungsluft auf 12°C und bei 70% rel. F auf 9°C. In jedem Fall kann diese Näherungsrechnung für die Schimmelproblematik nur eine sehr grobe Abschätzung oder sogar nur eine Tendenz liefern, denn die realen Temperaturen am Schimmel dürften deutlich abweichen. Dennoch erschien dieser Einfluss so beachtenswert, dass eine Messung mit Hilfe der Infrarottechnik unter praktischen Bedingungen erfolgte.

Ergebnisse der Thermographieuntersuchungen

Bei einem praktischen Versuch an der Orgel im Vertiefungsobjekt Crawinkel wurde diese theoretische Überlegung der Abkühlung einer Oberfläche durch direkt angeströmte Luft modellhaft untersucht. Die Veränderungen an den betroffenen Oberflächen, hier mehrere Holzpfeifen, wurden durch eine hochauflösende IR-Thermographiekamera aufgezeichnet. Der turbulente Luftstrom wurde durch einen herkömmlichen Büroventilator erzeugt. Der Versuch dauerte 30 Minuten. Durch

⁵ Siehe den Bericht zum Projekt „Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung aufgrund anthropogenen Handelns bedingter Schimmelbesiedlungen auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodell-Halle der Moritzburg in Halle“, der 2018 erscheinen soll.

den Charakter eines modellhaften Versuches wurden keine Randparameter, wie die erzeugte Luftgeschwindigkeit, erfasst.

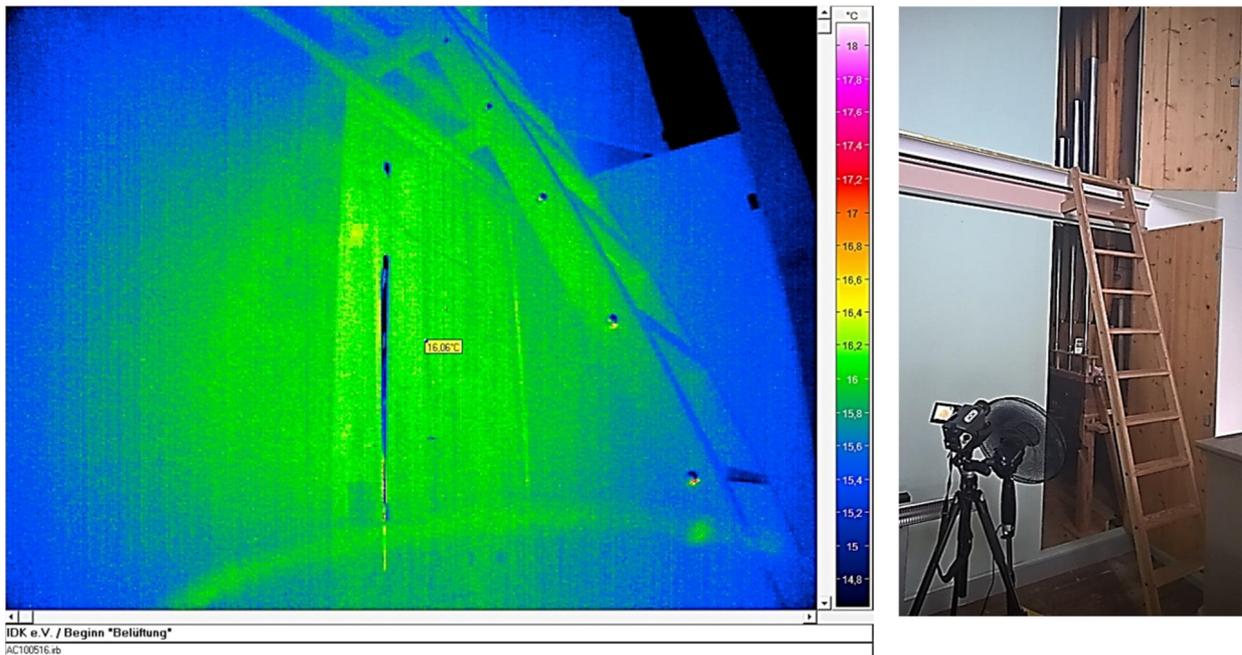


Abb. 50 Thermographiaufnahme und dazugehöriges Lichtbild zu Beginn der Luftzufuhr durch einen Raumlüfter, die Oberflächentemperatur am Messpunkt beträgt 16,06°C

In Abb. 50 und Abb. 51 ist der Verlauf dieses Versuches grafisch dokumentiert. Zu Beginn der aktiven Luftzufuhr hatte der markierte Messpunkt an einer Holzpfefe eine Oberflächentemperatur von 16,06°C. Nach Beendigung der 30-minütigen Luftzufuhr wurde eine Abkühlung des Messpunktes auf 15,93°C festgestellt. Dies entspricht einer Differenz von 0,13 K. Die Oberflächentemperaturen im Umfeld der Orgel veränderten sich nicht.

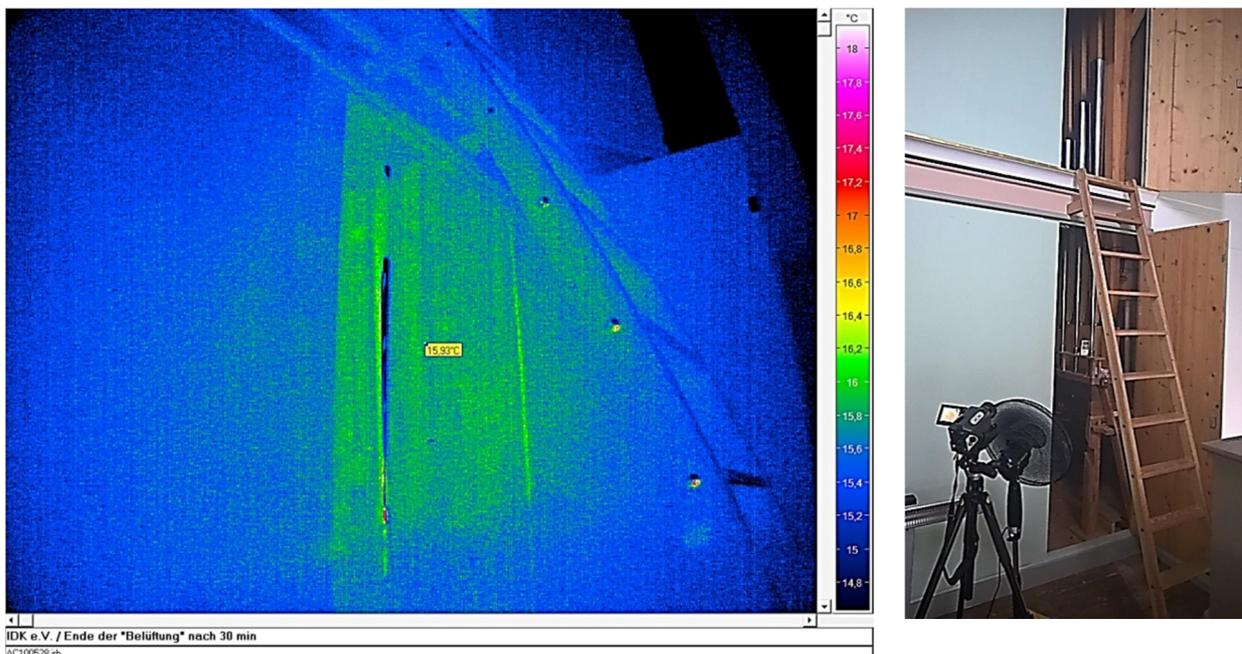


Abb. 51 Thermographiaufnahme und dazugehöriges Lichtbild zum Ende der Luftzufuhr durch einen Raumlüfter, die Oberflächentemperatur am Messpunkt beträgt 15,93°C.

Mit Hilfe von Thermographien konnten auch die Auswirkungen der Aufheizungen auf die Orgelgehäuse in einigen Kirchen erfasst und visualisiert werden.

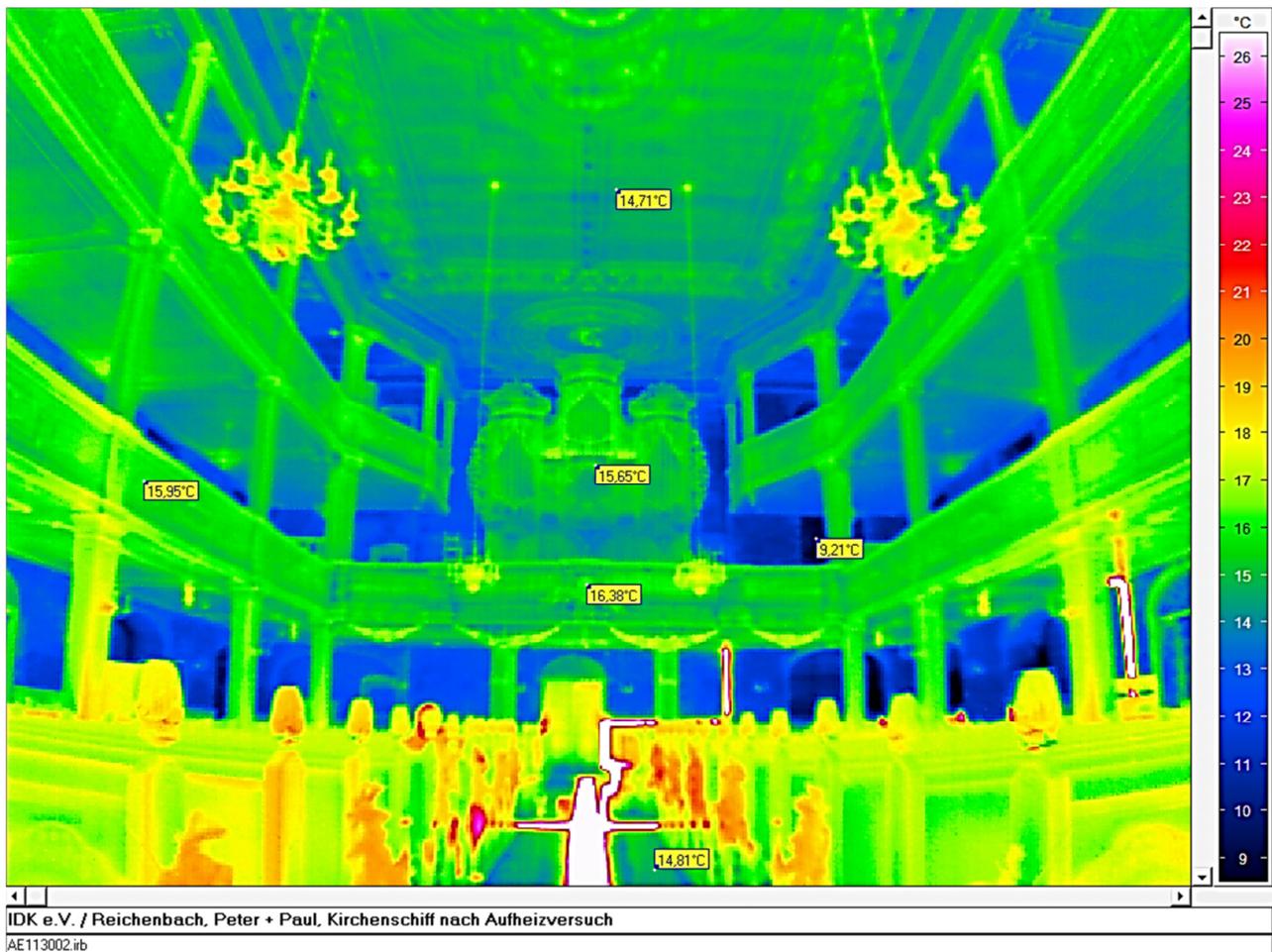


Abb. 52 Thermographieaufnahme des Innenraumes der Kirche St. Peter und Paul in Reichenbach nach einem Aufheizereignis von ca. 6 Stunden

Im Ergebnis dieser Aufnahmen konnte erkannt werden, dass die Außenseiten der Orgelgehäuse sehr zügig auf Temperaturänderungen, die im Rahmen der allgemein geforderten Temperaturerhöhung von 1K / h lagen, reagierten und diese Temperaturen annahmen (Abb. 52).

Anders verhält sich das Innere eines geschlossenen Orgelgehäuses. In der Kirche Peter und Paul, Reichenbach, wurden bei einem Aufheizversuch mit geschlossenen Seitentüren am Orgelgehäuse deutlich geringere Oberflächentemperaturen im Inneren der Orgel gemessen als an den bereits erwärmten Außenoberflächen der Orgel. Der obere Orgelbereich mit den durchlässigeren Prospekt Pfeifen zeigte hier jedoch ebenfalls einen erwärmten Zustand. In Abb. 53 und Abb. 54 wird dieser Zustand mittels einer Thermographie dargestellt. Zur besseren Orientierung erfolgt auch die Darstellung als Lichtbild.

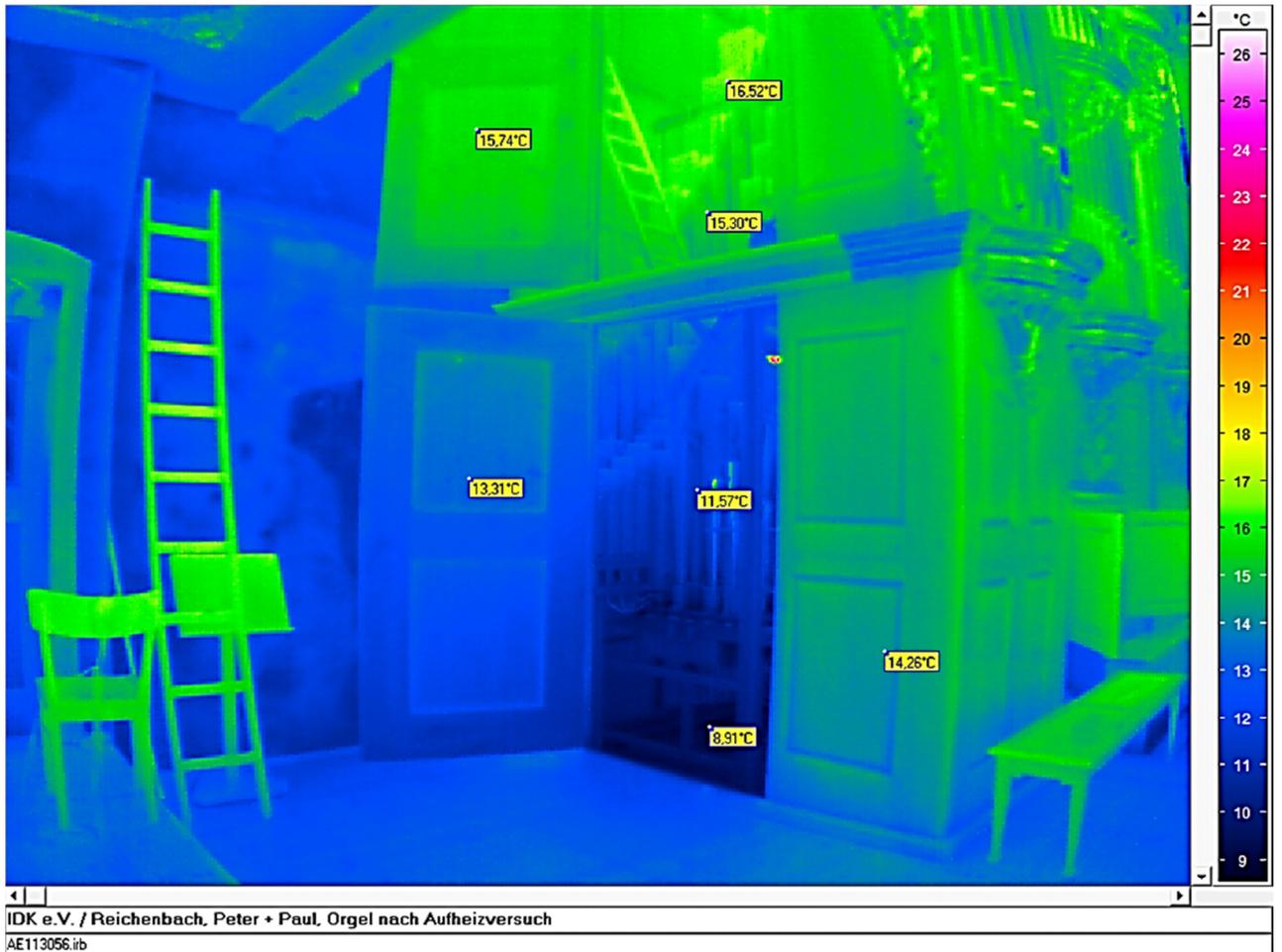


Abb. 53 Thermographiaufnahme (Abb. 53) und Lichtbild (Abb. 54) des Orgelgehäuses in Peter und Paul, Reichenbach, nach einem Aufheizereignis. Erkennbar sind die deutlich geringeren Oberflächentemperaturen im unteren Bereich

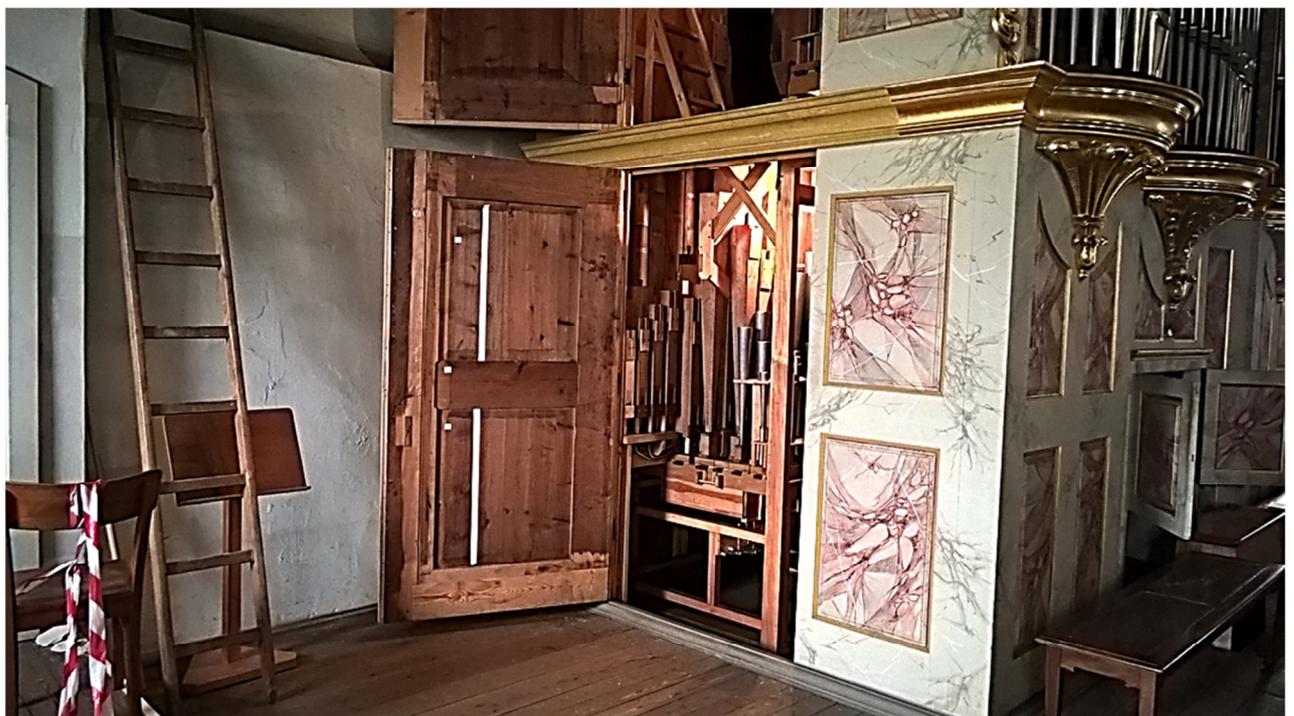


Abb. 54 Reichenbach, Peter und Paul, Orgelgehäuse

Ergebnisse der Nebelversuche

Unterschiedliche raumklimatische Zustände bzw. raumklimatische Beeinflussungen wurden beobachtet und beurteilt. Einerseits wurden Luftbewegungen im unbeheizten/nicht temperierten Kirchenraum beobachtet. Hier waren erwartungsgemäß die geringsten Luftbewegungen zu verzeichnen. Eine negative Auswirkung auf den Orgelbereich konnte in den drei erfassten Kirchenräumen nicht festgestellt werden.



Abb. 55 Nebelversuch nur Visualisierung von Luftbewegungen links: ca. 10 sec. nach Nebelaustritt, rechts: ca. 30 sec. nach Nebelaustritt

Sehr aufschlussreich waren jedoch die Visualisierungen der Luftbewegungen nach einer initiierten Raumlüfterwärmung der Kirchenräume. Hier sind erhebliche Luftbewegungen feststellbar, die ihren Anfang naturgemäß über den Warmluftquellen haben. Dabei spielte die Form der Raumlüfterwärmung (Wandheizkörper, Bodenkonvektor, Bodenöffnungen einer Dampfheizung) keine entscheidende Rolle.

Aufgrund der Beobachtungen im Forschungsprojekt wie auch bei Untersuchungen anderer Kirchenräume kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich in den meisten Kirchenräumen eine größere Längswalze im Kirchenraum einstellt, die seitlich durch kleine Luftbewegungen beeinflusst wird. Die warme Luft steigt auf, kühlt unterhalb der Decke (Gewölbe oder Holzdecke) und an den kühleren Außenwänden und Fenstern wieder ab und „fällt“ dann nach unten. Diese Form der Raumlüfterbewegung beginnt kurz nach einer initiierten Lüfterwärmung. Auch durch Sonneneinstrahlung erwärmte Oberflächen und größere Besuchermengen dienen als Motor für aufsteigende Warmluft mit der Folge einer Luftbewegung im Kirchenraum.

Abb. 56 zeigt eine vereinfachte Darstellung der in der Kirche St. Peter und Paul in Reichenbach/Vogtland ermittelten Luftströmungen während eines im Projekt initiierten Aufheizereignisses. Neben vielen kleineren Luftbewegungen über den an den Wänden verteilten Heizkörpern, konnte eine „Hauptluftwalze“ im mittleren Kirchenschiffbereich erkannt werden. Diese wurde durch einen im Fußboden befindlichen Luftauslass der Heizung im Chorbereich „angeschoben“. Die nach oben geworfene erwärmte Luft bewegte sich unterhalb der Kirchendecke Richtung Orgel, kühlte dabei wieder ab und fiel zum größten Teil vor der Orgelempore wieder in das Kirchenschiff. Eine gewisse Menge erwärmter Raumluft erreichte jedoch das Orgelgehäuse und drang durch den oberen offenen Bereich des Prospektes in das Orgelgehäuse ein.

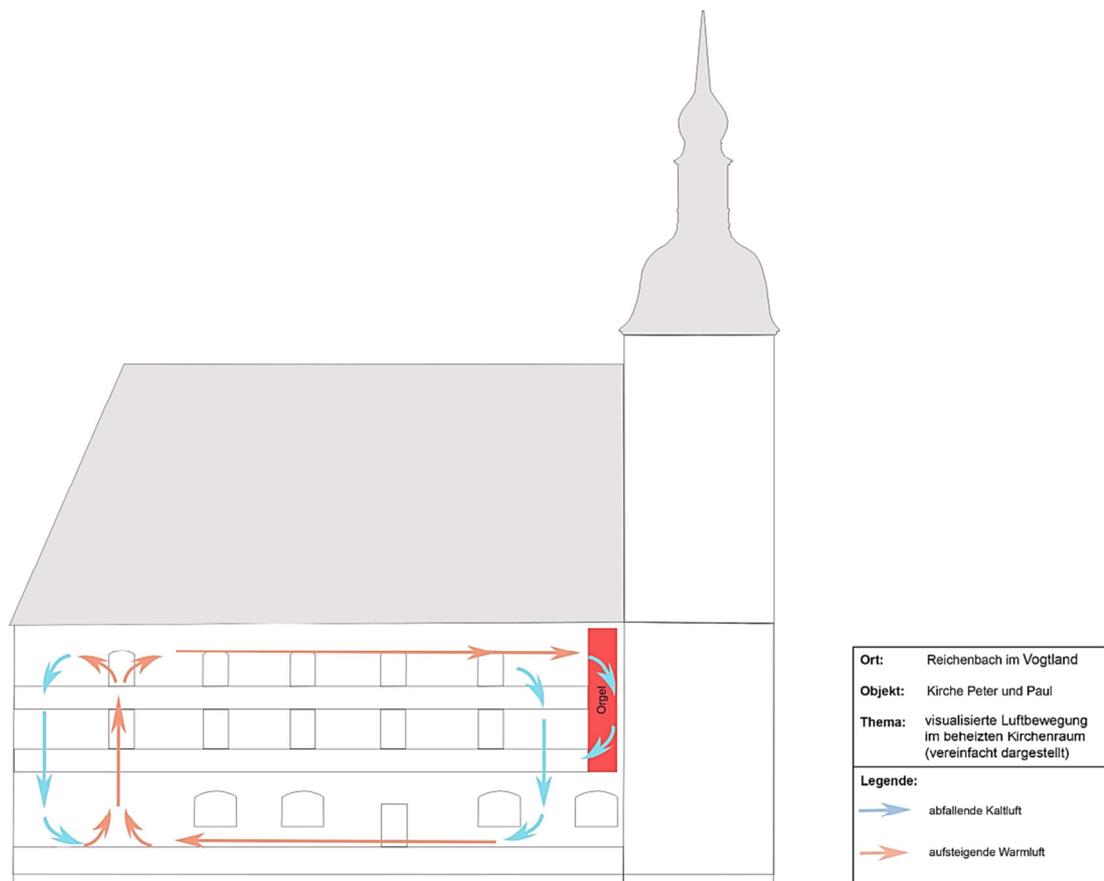


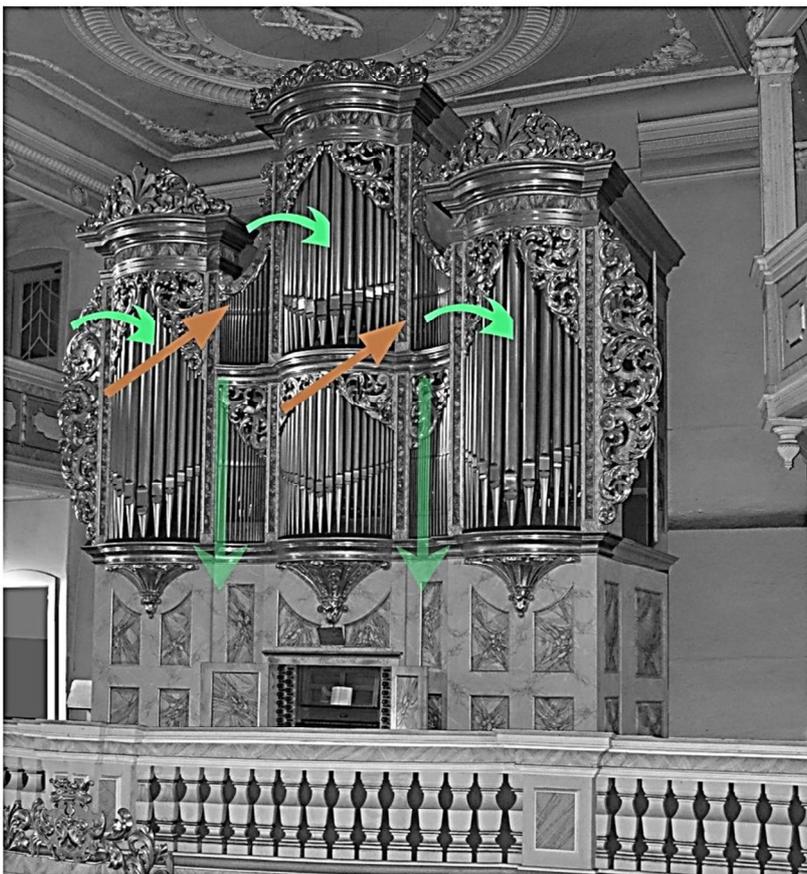
Abb. 56 Visualisierte Luftbewegung in einem Kirchenraum bei einem Heizereignis

Durch einen Versuch vor Ort konnten zwei unterschiedliche Szenarien beobachtet werden. Im 1. Teil des Versuches waren alle Gehäusetüren geschlossen. Die Warmluft drang, aus dem Kirchenraum kommend, in das Orgelgehäuse ein, kühlte ab und sank langsam innerhalb des Gehäuses nach unten. Durch verschiedene kleinteilige Nebelversuche konnte ermittelt werden, dass eine gewisse Menge an Luft aus dem Orgelgehäuse aus Undichtigkeiten im Bereich der Türen und des Spieltisches herausgedrückt wurde. Dies wird in Abb. 57 deutlich an einer seitlichen Tür dargestellt.



Abb. 57 Luftaustritt aus dem Orgelgehäuse im Bereich eines Türspaltes

In Abb. 58 werden die Ergebnisse für diesen 1. Teil des Versuches grafisch dargestellt. Erkennbar ist, dass die im oberen Orgelbereich eindringende wärmere Raumluft nur zwischen den Prospekt Pfeifen wieder aus dem Orgelgehäuse herausgelangen kann. Nur ein sehr geringer Teil erreicht den unteren Orgelbereich und sorgt für Luftverdrängungen aus Ritzen und Spalten (Türen, Spieltisch).



Ort:	Reichenbach im Vogtland
Objekt:	Kirche Peter und Paul
Thema:	visualisierte Luftbewegung im beheizten Kirchenraum; Detailbetrachtung der Orgel (vereinfacht dargestellt)
Legende:	
	abfallende Kaltluft
	abfallende Kaltluft (in Orgel)
	aufsteigende Warmluft

Abb. 58 Luftbewegung in das Orgelgehäuse und geringe Luftentweichungen aus dem Gehäuse

Im 2. Teil des Versuches wurden die unteren seitlichen Türen geöffnet, um eine Durchmischung der im Orgelgehäuse befindlichen Luft anzuregen. Durch die Nebelversuche konnte dieser Effekt bestätigt werden. Es kam zu einer deutlich verbesserten Luftbewegung innerhalb des Orgelgehäuses. Aus den offenen Seitentüren strömte sichtbar die oben eingebrachte Raumluft wieder aus dem Orgelgehäuse (Abb. 59).

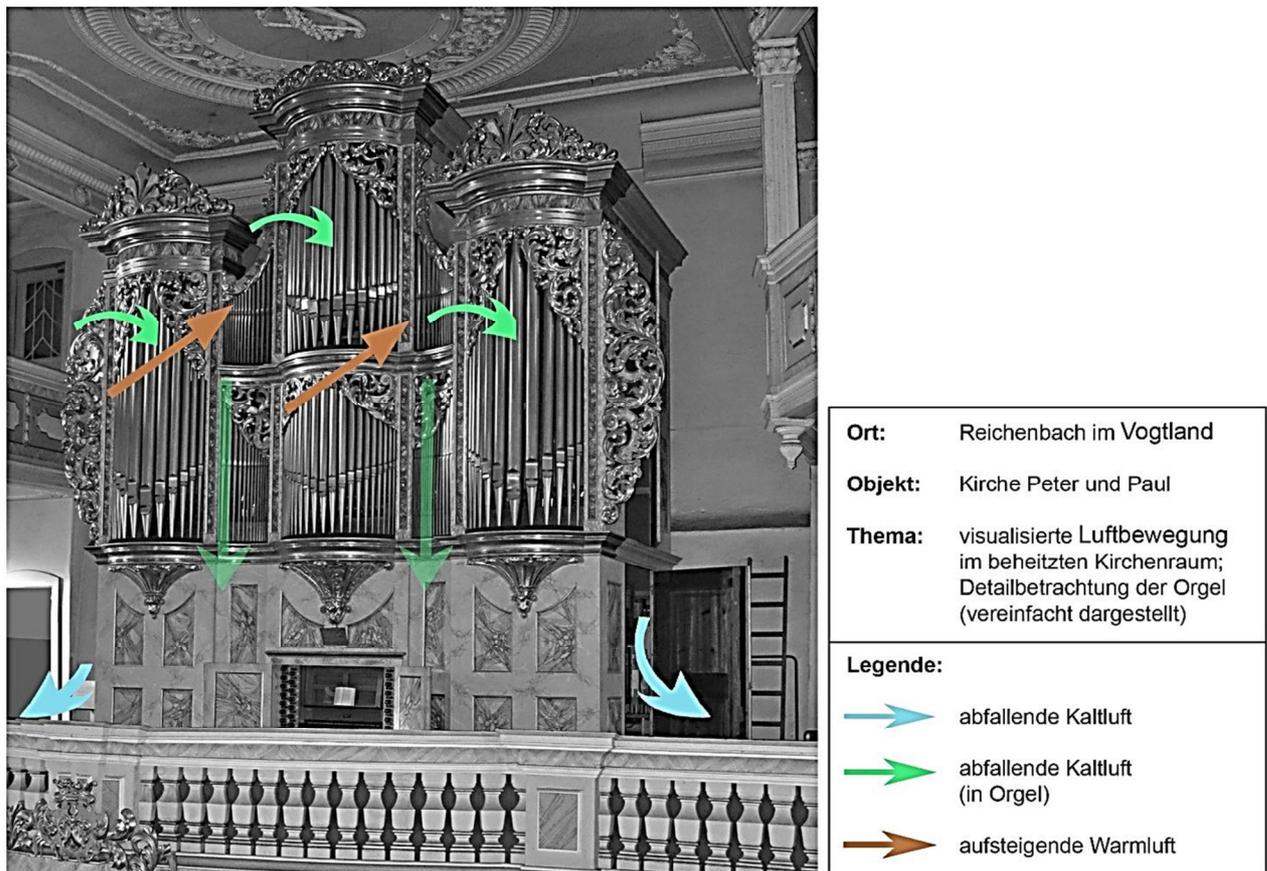


Abb. 59 Luftbewegung in das Orgelgehäuse und verstärkte Luftentweichungen aus dem Gehäuse durch die offenen Seitentüre

Anhand der unternommenen Nebelversuche zur Visualisierung der Luftbewegungen in ungeheizten und geheizten Kirchen konnten somit interessante Erkenntnisse über den Zusammenhang von Raumluftwärmerung und Auswirkung auf das Innere des Orgelgehäuses gewonnen werden. Schon kleinste Lufttemperaturerhebungen reichen aus, um in einem Kirchenraum Luftbewegungen anzuregen, die zeitnah auch einen direkten Einfluss auf das Orgelgehäuse und sein Inneres haben.

Fraglich bleibt noch, ob das Öffnen der Seitentüren einen positiven Effekt für die Orgel zeitigt, oder ob damit nicht eher eine weitere Durchmischung des kühleren Innenraumes des Gehäuses mit wärmerer Raumluft aus dem Kirchenraum angeregt wird. Dies könnte zu einer weiteren Feuchtezunahme an kühleren Oberflächen führen („Luftentfeuchter Orgel“).

Diskutiert wurde auch der Einfluss direkter **Sonneneinstrahlung** und damit einhergehender Erwärmung der Oberflächen auf den Feuchtetransport, da beobachtet wurde, dass hin und wieder

sonnenbeschienene Oberflächen weniger Schimmel aufweisen als Oberflächen im Schatten (vgl. z.B. Reichenbach, Peter und Paul, Emporen Pfeiler, auch Wöllnitz, Orgelgehäuse).

3.5 Ergebnisse der chemischen und physikalischen Untersuchungen

Die Bindemittelanalysen ergaben, dass bestimmte Lacke (Beschichtungen) mikrobiell verwertbare Bestandteile enthalten.

An einigen Beschichtungsproben von anderen Instrumenten wurden Polyvinylacetat (PVAC oder PVA), außerdem Kasein und Alkyd als Bestandteile der Beschichtungen/Einlassungen nachgewiesen. *Aspergillus glaucus* verwertet die in PVAC-Dispersionen (evtl. mit Kasein-Anteil) gebundenen Proteine, entsprechende Beschichtungen sind also substratfähig. Die neuen, bisher nicht befallenen Pfeifen der Poppe-Orgel in Crawinkel weisen einen deutlich sichtbaren Lack auf, während die alten Pfeifen keine sichtbaren Beschichtungen zeigen. Materialproben aus Oberflächen der Orgel in Crawinkel haben jedoch ergeben, dass die (alten) Holzpfeifen mit Hylotox behandelt wurden. Bei den neuen Beschichtungen handelt es sich um Lacke auf Alkydharz-Basis, denen möglicherweise seitens der Hersteller Biozide zugesetzt wurden (siehe 3.3 Verwertungstest).

Durch den Alterungsprozess und durch den Eintrag von salzhaltigen Holz- oder Flammschutzmitteln, wie auch durch ölige Beschichtungen/Anstriche können die Sorptionseigenschaften der Hölzer beeinflusst werden, so dass der Pilz auch deshalb auf manchen Oberflächen bessere Bedingungen (mehr Feuchtigkeit) vorfindet als auf anderen. Im Projekt MATEKUR wurde vergeblich versucht, auf alten (salzbehandelten) Holzoberflächen einen Wassertropfen abzusetzen; auf neuen, unbehandelten Hölzern gelang der Versuch.⁶ Manche Oberflächen-Beschichtungen (u. U. mit Staubanhaftungen) können Wasser binden und Feuchtigkeit vom Holz fernhalten, offene Oberflächen von Hölzern mit hohem Sorptionsvermögen nehmen demgegenüber mehr Wasser auf. Zu dieser Überlegung passt die Beobachtung aus Crawinkel, wo der Wert der rel.F. auf neuem, mit Alkydharz lackiertem Holz unter dem auf den alten (mit Hylotox behandelten) Oberflächen lag. In Crawinkel lag die Oberflächen-Feuchte auf der alten Pfeife stets um 2-3 %-Punkte über der, die auf der neuen ermittelt wurde. Innerhalb von 36 Stunden stieg die Holzfeuchte der alten Pfeife von 14% auf 15%, die der neuen Pfeife von 12% auf knapp 13%. Sofern die Beschichtung permeabel (wasserdampfdurchlässig) ist, dürfte es im Laufe der Jahre zu einer Auffeuchtung des Holzes kommen. Oberflächen, die mehr Wasser aufnehmen/abgeben, sind eher durch Schimmel gefährdet als solche mit geringerer Sorptivität. Andererseits können bestimmte sperrende Oberflächenbeschichtung selbst Wasser anlagern (s. 3.3).

Wiederum stellte sich die Frage: Warum sind die alten Holzpfeifen in der feuchten Kirche in Krevese nicht von Schimmelbefall betroffen? Die Analysen von Holzproben aus Krevese ergaben erhöhte Schwefel- und Chlorwerte, woraus laut Untersuchungsbericht der FH Potsdam zu schließen ist, dass in der Vergangenheit eine Behandlung mit schwefel- und chlorhaltigen Holzschutzmitteln stattgefunden hat. Entsprechende Analysen von Proben aus Sangerhausen (schwacher Befall) erbrachten ähnliche Resultate. Zu diskutieren und ggf. durch Experimente zu prüfen wäre, ob auch über lange Zeit hohe Schwefelgehalte in der Luft diese hohen Schwefelkonzentrationen (in Krevese bis zu 7,9%) hervorgerufen haben könnten. Als Wert für

⁶ Vgl. den Forschungsbericht F 2939 „Mazeration historischer Dachkonstruktionen. Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Schadesminderung und –bekämpfung (MATEKUR), Fraunhofer IRB-Verlag 2015.

unbelastete und unbehandelte Holzoberflächen werden im Untersuchungsbericht bis zu 2% angegeben. Andererseits konnten in Krusten, die an einigen Objekten am Außenbau genommen wurden, hemmende Bestandteile gefunden werden, die mutmaßlich früher über die Luft oder/und Niederschläge eingetragen wurden.

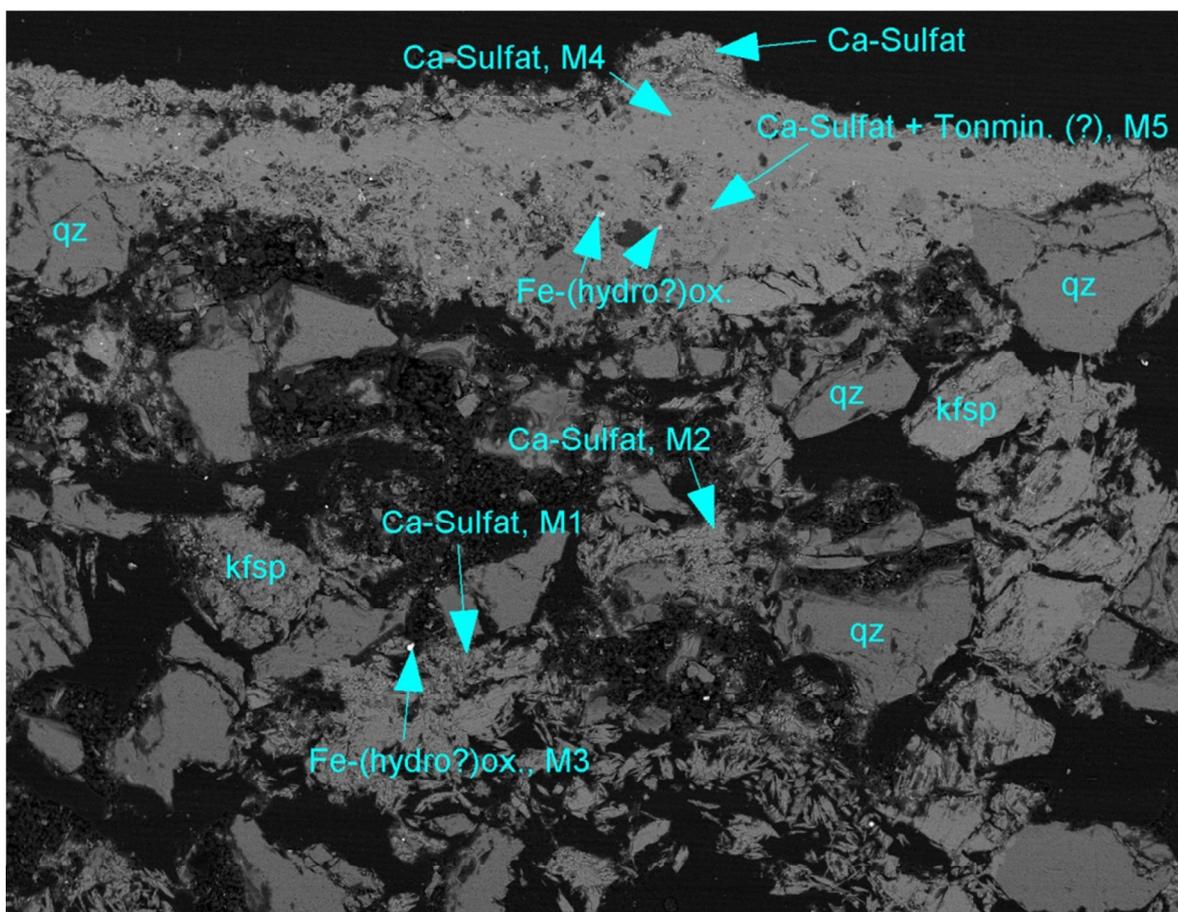
Lokalität/Probe	Hauptbestandteile	Nebenbestandteile	Akzessorien
Crawinkel, Westportal / CraK1	Ca-Sulfat (Gips) Fe-Hydroxid Quarz Kalifeldspat	Tonminerale	P, Mg, Ti
Crawinkel, Nordfassade CraK2	Calcit	Dolomit Kalifeldspat Tonminerale Ca-Sulfat (Gips) Plagioklas Ca-Al-Silikat Biotit	P, Mn, Ti, Ba, Cl
Dornburg, SE- Anbau, S-Seite DorK1	Quarz Ca-Sulfat (Gips) Calcit	Dolomit Ca-Fe-Al-Oxid Fe-Mg-Al-Oxid	P, Mn, Ti
Dornburg, SE- Anbau, E-Seite / DorK2	Ca-Sulfat (Gips) Tonminerale	Calcit Quarz Fe-Hydroxid Apatit	P, Mg, Mn, Ti
Waltershausen, SE / WalK1	Ca-Sulfat (Gips) Quarz	Dolomit Strontianit Tonminerale Biotit Fe-Ti-Oxid Fe-Mg-Silikat	P, Ba, Sr, Mn, Cl
Waltershausen, NE / WalK2	Quarz Calcit	Tonminerale Kalifeldspat Plagioklas Ca-Sulfat (Gips) Apatit Fe-Hydroxid Ti-Oxid Mg-Phosphat	P, Ba, Sr, Mn, Cl
Jena-Woellnitz / WoelK1	Ca-Sulfat (Gips) Calcit	Quarz Tonminerale Dolomit Fe-Hydroxid Ti-Oxid Apatit Biotit	P, Mn, Pb, Cl
Jena-Woellnitz / WoelK2	Ca-Sulfat (Gips) Quarz	Kalifeldspat Tonminerale Plagioklas Fe-Hydroxid	P, Mg, Mn, Ti, Pb, Cl

Tab. 4 Übersicht über die Proben und deren Mineralinhalt bzw. akzessorisch auftretende Elemente

Die jeweils am Außenbau genommenen Proben wurden rasterelektronenmikroskopisch abgebildet und in Kombination dazu mittels EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) analysiert. Die mineralischen Hauptbestandteile der Proben konnten ebenso ermittelt werden wie begleitend auftretende Minerale bzw. weitere Elemente. Die Berechnung der Mineralzusammensetzungen erfolgte aus den Verhältnissen der normierten Atomprozente an einem bestimmten Messpunkt.

Neben primären, d.h. im Setzmörtel bzw. Putz auftretenden Bestandteilen wie Quarz, Calcit oder Feldspat, weisen alle Proben eine starke Vergipsung auf. Die Bildung von Gips ist als Folge einer Reaktion SO₂-haltiger Abgase mit kalkhaltigen Oberflächen unter Anwesenheit von H₂O zu interpretieren. Der hohe Gipsanteil dieser Krusten weist auf eine intensive, lang anhaltende SO₂-Belastung hin, die eher durch ihre Toxizität als die Absenkung des pH-Wertes, als hemmender Faktor für Schimmelwachstum wirkte. Der starke Rückgang der SO₂-Emissionen steht somit im direkten Zusammenhang mit vermehrt auftretender Schimmelbelastung. Der in allen Proben vorhandene Phosphor kann ebenfalls mit lang anhaltender Rauchgasbelastung in Verbindung gebracht werden. Für Schimmelpilze könnten sich aus der geringeren Luftverschmutzung verbesserte Wachstumsbedingungen ergeben.

Weiterhin wird am Beispiel der Proben aus Jena-Wöllnitz deutlich, dass die Verwendung bleihaltiger Kraftstoffe bis 1990 im Bereich stark befahrener Straßen zu einer nachweislichen Belastung der Oberflächen mit Blei führte.



Crawinkel, Westportal, BSE, 80 x, 20 keV

300 µm

Abb. 60 REM Aufnahme einer Verwitterungskruste vom Westportal der Kirche St. Marien in Crawinkel; im oberen Bereich ist deutlich die massive Gipskruste erkennbar; Institute of Geoscience and Geography Martin-Luther-University Halle-Wittenberg

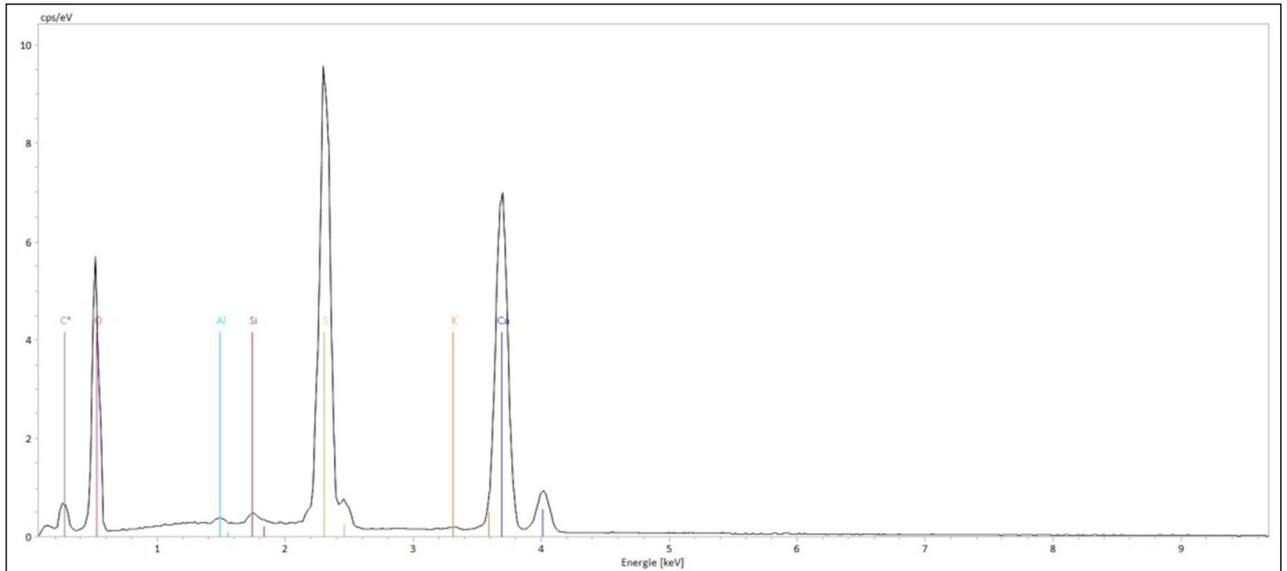


Abb. 61 Spektrum der EDX-Analyse an Punkt M2 (siehe Abb. 1); hier sind fast ausschließlich die Bestandteile von Gips vorhanden; Institute of Geoscience and Geography Martin-Luther-University Halle-Wittenberg

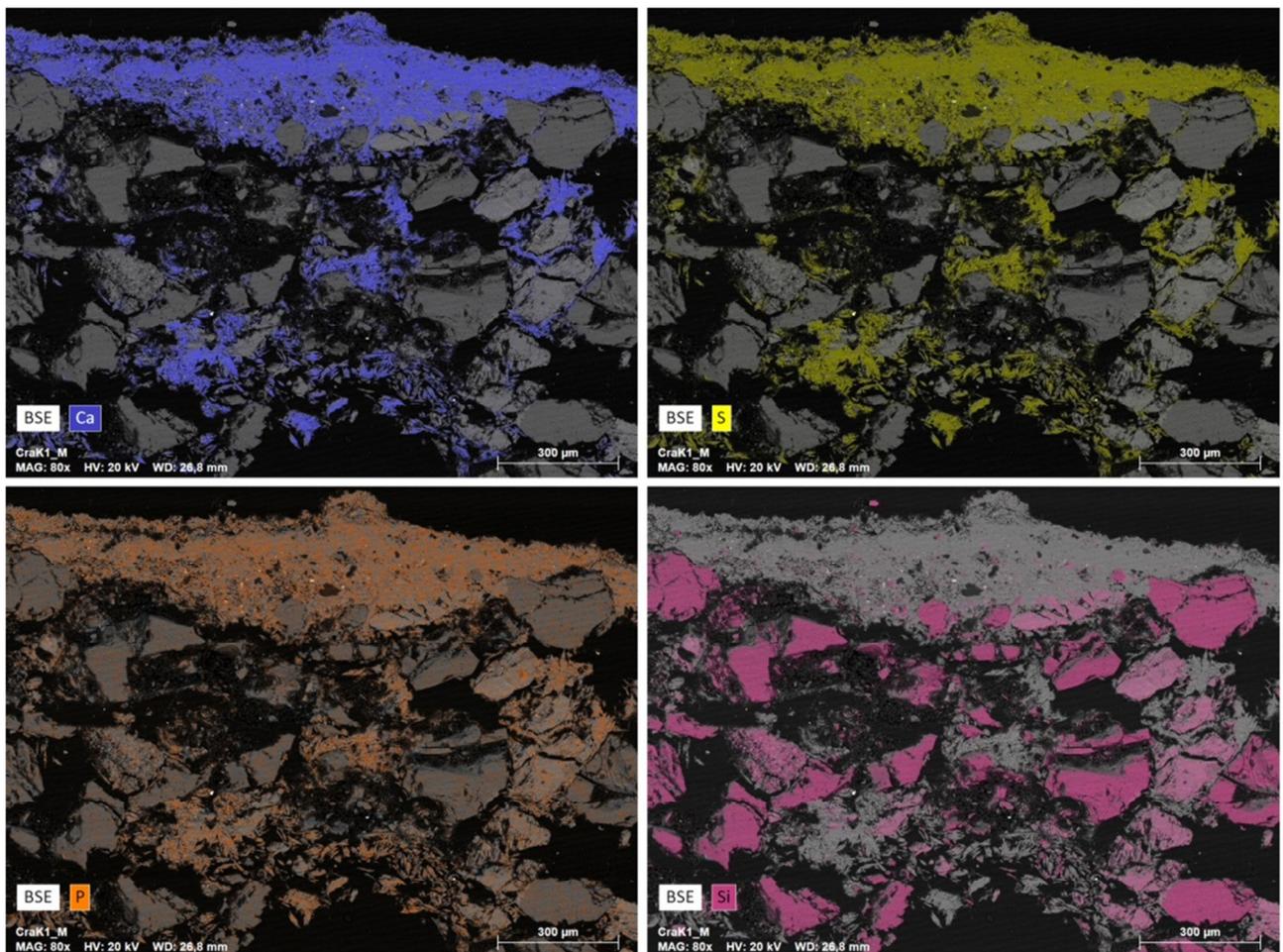


Abb. 62 EDX-Analyse, Element-Mapping: die Verteilung von Calcium (oben links), Schwefel (oben rechts), Phosphor (unten links) und Silicium (unten rechts) in der Probe aus Crawinkel; Institute of Geoscience and Geography Martin-Luther-University Halle-Wittenberg



Abb. 63 (links) Jena-Wöllnitz: unmittelbar an der Kirche vorbei verläuft eine stark befahrene Straße; im Hintergrund ist der Schornstein eines Kraftwerks zu sehen.



Abb. 64 (rechts) schwarze Verfärbungen in Folge von Luftschadstoffen am Portal der Kirche in Crawinkel

4 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde festgestellt, dass nur eine sehr kleine Gruppe von Schimmelpilzarten den Befall in Orgeln und an Kirchengeschäften bildet. Frühere Untersuchungen, die den Schluss nahelegten, dass ein breites Artenspektrum am Befall von Orgeln beteiligt sei, werden dadurch widerlegt. Die gesundheitliche Relevanz des Befalls tritt durch die Identifikation der beteiligten Arten mehr in den Hintergrund.

Die verschiedenen Untersuchungen im Labor und an den Objekten zielten darauf ab, die sehr speziellen Lebensbedingungen der Pilze erkennbar zu machen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden während der Projektlaufzeit regelmäßig zusammengeführt und in der Forschergruppe diskutiert. Dabei wurden die Beobachtungen an den Objekten grob klassifiziert und Gruppen analog des Befallgrades gebildet, also die an schwach, mittel oder stark befallenen Objekten gewonnenen Resultate untereinander bzw. mit nicht befallenen Objekten, die ähnliche Randbedingungen aufweisen, verglichen. Mehrere Ursachen für die verstärkte Schimmelpilzentwicklung an Orgeln konnten erkannt und durch Untersuchungen nachgewiesen werden. So spielen die klimatischen Bedingungen vor Ort, aber auch Beschichtungen und Bestandteile der Luft eine Rolle. Verschiedene Ursachen überlagern sich und beeinflussen sich wechselseitig.



Abb. 65 Diskussion von Zwischenergebnissen bei einem Arbeitstreffen in Halle

4.1 Klimaeinflüsse

Die im Labor bestimmten Anforderungen der Schimmelpilze an das Klima wurden mit den Ergebnissen der Klimamessungen in den Kirchen und den Auswirkungen von allgemeinen klimatischen Veränderungen der letzten Dekaden verrechnet. Durchschnittlich ist von einer außenklimabedingten Erwärmung von ein bis zwei Kelvin (K) sowie einem Anstieg der relativen Luftfeuchte auszugehen. Es zeigte sich, dass in manchen Kirchen die regionale klimatische Veränderung der letzten Jahrzehnte die Lebensbedingungen für einen Schimmelbefall verbessert hat oder erst ermöglichte.

In vielen Gemeinden haben sich die Nutzungsgewohnheiten der Kirchen verändert. In Folge sporadischen Aufheizens kommt es zu stärkeren Temperatur- und Feuchteschwankungen in den

Kirchenräumen und den Orgeln. Gleichzeitig dürften dichtere Fenster den Luftaustausch mit der Umgebung mindern und sperrende Beschichtungen das Diffusionsvermögen der Gebäudeteile herabsetzen (siehe 4.2). Den genauen Wirkmechanismen wurde im Projekt nachgegangen, so dass ein Grund für die besondere Auffeuchtung der Orgeln in einem Kirchenraum und daraus entstehenden Schimmelbefall darin erkannt werden konnte, dass bei Erwärmung des Kirchenraumes, sei sie besonders stark durch Heizintervalle oder weniger stark durch die natürlichen Intervalle der Sonneneinstrahlung am Tage, Feuchtigkeit durch die erwärmte Raumluft aufgenommen und mit der Luftbewegung im Raum in die Orgel abgegeben wird. Da die Orgel in der Kirche meist der Ort/das Objekt mit der größten Materialdichte an organischem Material ist, zudem eine sehr große Oberfläche besitzt, die von der Luft aus dem Kirchenraum frei durchströmt werden kann, bleibt sie bei einer kurzzeitigen Lufterwärmung im Verhältnis zu anderen Bau- oder Ausstattungsteilen noch länger kühl. In dieser Situation steigen die Werte der relativen Luftfeuchte im Kontaktbereich der feuchten Luft zu den kalten Holzoberflächen an. Durch Sorptionsprozesse kommt es hierbei zur Feuchtigkeitseinlagerung in die Holzoberflächen aber auch in Ledermaterialien oder Staubauflagen. Im Extremfall der Feuchtigkeitskondensation wird die Feuchtigkeit in flüssiger Form als Wasser an den Oberflächen abgeschieden und von den Holzoberflächen je nach Vorbehandlung unterschiedlich tief aufgenommen. Bei hydrophob wirkenden Holzbehandlungen kommt es dabei zum Feuchtigkeitsstau und damit zu einer zusätzlichen Feuchtigkeitsanreicherung an den Oberflächen. In dieser Situation der kurzzeitigen Erwärmung der Raumluft verhält sich die Orgel wie ein Luftentfeuchter. In der Folge wird die abgeschiedene Feuchtigkeit vom organischen Material in der Orgel (Holz, Leder, Staub) gespeichert. Bei längerer Erwärmung des Kirchenraumes und einer effektiven Erwärmung auch der Orgelmaterialien sinkt die relative Luftfeuchte an den Materialoberflächen in der Orgel. In dieser Situation treten Desorptionsprozesse auf, die mit der Feuchtigkeitsabgabe zum Beispiel aus den Holzmaterialien aber auch allen anderen Materialien verbunden ist. Bei der verzögerten Erwärmung der Orgel wird somit oberflächennah gespeichertes, adsorbiertes Wasser aus den oberen Schichten des Holzes nach außen, zur Holzoberfläche hin abgegeben. Durch diese Effekte, beide verursacht durch unterschiedliche Beheizungszyklen der Kirche, kommt es zu einem zweifachen, zeitlich versetzten Feuchtigkeitstransport über die Holzoberflächen und damit auch zu einem zweifachen Feuchtigkeitsangebot für den Schimmel.

4.2 Einflüsse von Beschichtungen

Eine weitere Ursache für ein intensiveres Wachstum konnte in Überzügen, nicht nur mit „modernen Materialien“, erkannt werden, wobei die Auswirkungen hier allerdings unterschiedlich sind. Neben einer möglichen Funktion der Überzüge als Nährboden (besonders Schellack, Nitrozellulose und Polyvinylacetat) beeinflussen Lacke, Beschichtungen und Fassungsaufbauten ebenso wie Staubauflagerungen die Feuchtigkeit auf den Orgeloberflächen und verbessern damit u. U. die Wachstumsbedingungen für den Schimmel.

In anderen Fällen dürften die z. T. zugesetzten Biozide allerdings zumindest für einen Übergangszeitraum den Aufbau einer Besiedlung eher verhindern oder zumindest verlangsamen. Die Wirksamkeit dieser Biozide baut sich in der Regel im Laufe einiger Jahre ab.

Eine gegenteilige Wirkung könnte von Überzügen auf Eiche oder auch Kiefer ausgehen, da die in diesen Hölzern enthaltenen natürlichen Hemmstoffe u. U. ihre Wirkung, die zumindest gegen

Bakterien belegt ist, nicht entfalten können, sofern der Überzug eine abschirmende Schicht ausbildet.

Früher aufgebrauchte Holzschutzmittel (wie z. B. Hylotox), die nachweislich viele Orgeln gegen Insekten schützen sollten, jedoch nicht gegen Mikroorganismen wirken und Bestandteile wie DDT, PCP, Lindan und Pyrethroide enthalten, bestanden oft anteilig aus öligen, nicht verdunstenden Lösemitteln, die noch heute, Jahrzehnte nach der Aufbringung, einige Eigenschaften der Holzoberflächen in der Orgel beeinflussen. Einerseits wird die Wasseraufnahme der oberflächennahen Holzbereiche dadurch herabgesetzt, andererseits sammelt sich anfallende Feuchtigkeit dadurch nun direkt auf der Holzoberfläche an und im Staub, der von den öligen Substanzen an die Oberfläche gebunden wird („Klebeffekt“). Auf diesem Wege begünstigt eine frühere Holzschutzmittelbehandlung in der Orgel einen Schimmelbefall.



Abb. 66 Mutmaßlich zur Holzschutzmitteltränkung von langen Holzteilen (Orgelpfeifen?) benutzte Wanne

Wenn erwärmte Luft aus dem Kirchenraum an noch kühleren Bauteilen der Orgel vorbeistreicht, wird Feuchtigkeit aus der Luft an die Orgelbauteile abgegeben. Wasserundurchlässige Anstriche, wie ölige Reste von früheren Holzschutzmittelbehandlungen verhindern, dass der hölzerne Untergrund diese Feuchtigkeit annimmt und in seiner porösen Oberfläche aus Zellwänden bis einige Millimeter tief verteilt, was als eine Pufferwirkung bezeichnet werden könnte. Stattdessen bleibt die anfallende Feuchtigkeit konzentriert auf der äußersten Oberfläche dieser quasi abgesperrten Bauteile, dort, wo der Befall und auch Nährstoffe wie Staub haften können. Dieser Lebensraum erreicht dadurch höhere Feuchtekonzentrationen. Das darunterliegende Holz dient hier nicht mehr als Feuchtepuffer.

4.3 Wirkungen von Luftbestandteilen

Als mögliche Ursache für verbesserte Lebensbedingungen für den Schimmel wurde außerdem die anthropogen beeinflusste Veränderung der Luft erkannt, die sich in geringerer Belastung mit Schwefeldioxid, in einigen Bereichen aber auch zunehmender Belastung mit Stickoxiden zeigt. Hier ist allerdings zu fragen, ob (und auf welchem Wege) sich diese Änderungen der Belastung der Außenluft auch im Innern von Kirchen auswirken. Ein möglicher Weg der früher hemmenden Wirkung von Schwefeldioxid aus der Luft bestünde darin, dass sich das Gas in der Feuchtigkeit löst, die sich in der Orgel abscheidet, analog zur historischen Technik der Desinfektion des Inneren von Weinfässern („Schwefeln“).



Abb. 67 Häuser nahe der Kirche von Dorndorf/Saale. Die Dächer zeigen starken Bewuchs mit Flechten und Moosen, was auf einen geringeren Schwefeldioxid-Gehalt der Luft gegenüber früher zurückgehen könnte.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt genoss von Anfang an große öffentliche Aufmerksamkeit. Zahlreiche Medien berichteten über das Vorhaben, so das Zweite Deutsche Fernsehen (ZDF), der Mitteldeutsche Rundfunk (mdr) mit mehreren Film- und Rundfunkbeiträgen, außerdem regionale, überregionale und bundesweit verbreitete Zeitungen.

Das große Interesse der Kirchengemeinden schlug sich in den rund 400 Fragebögen nieder, die eine wertvolle Datenbasis bildeten.

Seitens der Projektbeteiligten wurde bei diversen Veranstaltungen für Orgelsachverständige und Baureferenten über das Projekt informiert, was auf großes Interesse stieß. Auf Wunsch des Bundes deutscher Orgelbaumeister (BDO) wurde eine vorläufige Empfehlung für den Umgang mit von Schimmelbefall betroffenen Instrumenten herausgegeben (2016). Zweimal wurden Zwischenergebnisse bei den Projekttagen der Forschungsinitiative Zukunft Bau präsentiert. Auch beim Archivpflegertag der EKM (2017) wurde über das Projekt berichtet.

Am Abschlusskolloquium in Erfurt am 20./21. November 2017 nahmen 150 Interessierte teil. Der Abschlussbericht soll als Bauforschungsbericht im IRB-Verlag erscheinen.

6 Fazit

Im Projekt gelang es, wesentliche Ursachen des Schimmelbefalls zu erkennen. Zunächst konnten die für den Schimmelbefall an Orgeln verantwortlichen Pilzarten und ihre Wachstumsbedingungen in den untersuchten Kirchenräumen und Orgeln bestimmt werden. Dadurch war es möglich, als sich teilweise überlagernde Ursachen des Schimmelbefalls angestiegene Lufttemperaturen und eine höhere Luftfeuchte zu erkennen, außerdem Einflüsse von Beschichtungen und einer veränderten Belastung der Luft mit Schadstoffen wie Schwefeldioxid und Stickoxiden. Unterschiedliche Formen des Zusammenwirkens dieser Faktoren konnten nachgewiesen oder zumindest modellhaft erklärt werden. Welche der genannten Einflussfaktoren von größerer Bedeutung für den zunehmenden Schimmelbefall in Orgeln und Kirchenräumen sind, welche von eher geringerer, lässt sich noch nicht abschließend entscheiden. Zukünftige Versuche zielen auf die kontrollierte Veränderung einzelner oder mehrerer der identifizierten Faktoren, um einen Schimmelbefall künftig zu verhindern. Dabei wird sich zeigen, ob die Modifikation einzelner Einflussfaktoren ausreicht, um das Problem zu lösen, oder ob mehrere Faktoren gleichzeitig verändert werden müssen. Die im Projekt entwickelten Methoden zur Bewertung der örtlichen Klimabedingungen vor dem Hintergrund der Ansprüche der an Ort und Stelle aktiven Schimmelpilzarten ermöglichen nicht nur eine rückwirkende Betrachtung der Entwicklung der Wachstumsbedingungen für den Schimmel, sondern auch eine Abschätzung der Auswirkung zukünftiger nutzungs- oder umweltbedingter raumklimatischer Veränderungen im Sinne einer Risikoabschätzung.

Aus den Ergebnissen dieses Projektes ist zu folgern, dass vor jeglichen Maßnahmen eine solide Grundlagenermittlung notwendig ist. Dazu gehören die sorgfältige Identifikation der aktiven (!) Pilze, Klimamessungen an geeigneten Stellen in den Orgeln und im Kirchenraum, eventuell auch Analysen der in Beschichtungen vorliegenden Bestandteile. Dass als substratfähig erkannte Überzugmaterialien – Schellack, Nitrozellulose, Polvinylacetat – in Zukunft nicht mehr aufgebracht werden sollten, dürfte sich von selbst verstehen. Jedoch erscheint es unrealistisch zu versuchen, bereits auf den Hölzern befindliche Materialien vollständig wieder zu entfernen.

Eingriffsmöglichkeiten, die sich aus den unter 4. zusammengefassten Resultaten ergeben, sollen in einem Folgeprojekt untersucht werden. Bereits geringfügige Veränderungen der Klimabedingungen in den Kirchenräumen und/oder in den Orgeln, die Vermeidung von Beschichtungen, die das Wachstum begünstigen, wie auch das gezielte Einbringen von schimmelhemmenden Substanzen könnten den Befall verhindern oder zumindest mindern. Eher nicht favorisiert wird die Möglichkeit, eine Besiedlung durch das Aufbringen persistierender Gifte zu verhindern. Im geplanten Anschlussprojekt sollen verschiedene Möglichkeiten erforscht und in situ an ausgewählten Orgeln erprobt werden. Hier wäre neben dem Einsatz von LED-Beleuchtungen mit Wellenlängen, die die Schimmelbesiedlung hemmen (Krutzger, 2016) und die in der Obstlagerung bereits seit Längerem eingesetzt werden, auch eine in regelmäßigen Abständen zu wiederholende Behandlung mit ionisierter Luft zu erproben (Birresborn, 2016), ein Verfahren, das als materialverträglicher eingeschätzt wird, als die von einigen Orgelbauern bereits praktizierte Ozonbehandlung der Orgeln. Für neue oder zu ersetzende Holzteile käme auch eine enzymatische Vorbehandlung der Hölzer in Frage, wie sie u. a. aus hygienischen Gründen für Türgriffe erfolgreich erprobt wurde (Schubert et al., 2012). Auch die Ausrüstung der Holzoberflächen mit nach Plasmavorbehandlung (Avramidis et al., 2009) aufgetragenen Metallteilchen (Zink und Kupfer) sollen erprobt werden.

Eingriffe in das Nahfeldklima sind ebenfalls zu erproben, diese müssen jedoch an Hand der für das jeweilige Objekt vorliegenden Daten sehr gut überlegt und präzise ausgeführt werden, was auch eine engmaschige Kontrolle der Auswirkungen einschließen muss. Gesteuerte Lüftung oder auch nur die Erzeugung einer Luftbewegung oder eine gezielte, leichte Erwärmung, abhängig von gemessener Temperatur und Luftfeuchtesituation im Kirchenraum und/oder in der Orgel, könnten helfen, Zeiten der Auffeuchtung und der Abtrocknung zugunsten der Orgeln zu regulieren.

Ziel des Folgeprojektes ist ein „Werkzeugkasten“, der verschiedene Instrumente zur Schimmelprävention und -bekämpfung an Orgeln enthält, die in der jeweiligen örtlichen Konstellation möglichst praxistauglich und kostengünstig eingesetzt werden können.

7 Literaturverzeichnis

AVRAMIDIS, G./HAUSWALD, E./LYAPIN, A./MILITZ, H./VIÖL, W./WOLKENHAUER, A.: Plasma treatment of wood and wood-based materials to generate hydrophilic or hydrophobic surface characteristics. Wood Material Science and Engineering, pp. 1-9, 2009

BIRRESBORN, Lilli: Ionisierte Luft - Untersuchungen zur Wirkung auf Mikroorganismen, Pigmente und Bindemittel der Wandmalerei. Masterthesis, FH Potsdam, 2016

BDO Arbeitskreis Schimmel: Schimmelpilz-Sanierung im Orgelbau, 2017 hrsg. vom Bund Deutscher Orgelbaumeister e.V. (BDO)

BINKER, Gerhard: Schimmelpilze in Kirchen und Orgeln (www.schimmel-soforthilfe.de/schimmelpilze-an-kulturguetern/schimmelpilze-in-kirchenorgeln.html, 5.2.2015)

BÖER, Simone: Untersuchung der Mykotoxinfreisetzung aus ausgewählten Schimmelpilzen unter besonderer Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte.– Diplomarbeit FB7 Dipl.-Biol., Universität Oldenburg, 2004

BROCK, Thomas: Diskussion zu Ulrich Schmelz, Pilzbefall in Orgeln, Ars Organi 51. Jahrgang, Heft 3, Sept. 2003, S. 182

CONTRAT-PROJEKT.DE: Grenzwerte für Schimmel (www.schimmel-schimmelpilze.de/grenzwerte-schimmelpilze.html, 5.2.2015)

CONTRAT-PROJEKT.DE: Risikoeinstufung von Schimmelpilzen(www.schimmel-schimmelpilze.de/risikoeinstufung-schimmelpilze.html, 5.2.2015)

EV.-LUTH. KIRCHE IN BAYERN, Hrsg.: Schimmelpilze in Orgeln(www.arbeitssicherheit-elkb.de/system/files/downloads/OrgelundSchimmel.pdf, 5.2.2015)

FANGMEYER, Thomas/KÖHLER, Michael/WEIS, Norbert/ZORN, Christian: Schimmel an der Wand - Mücke oder Elefant?, hrsg. vom Bremer Umweltinstitut e.V., Bremen 2003

FLORIAN, Mary-Lou E.: Fungal Facts, 2007 (=Archetype Books, ISBN-13: 978-1873132630)

FRÖSSEL, Frank: Schimmelpilze und andere Innenraumbelastungen, Stuttgart 2003

GATSCH, Lydia: Die Ausstattung der evangelischen Pfarrkirche Peter und Paul in Reichenbach/ Vgtl. - Technologische Untersuchung der Fassung hinsichtlich ihres Einflusses auf das Schimmelpilzvorkommen und die Schimmelpilzverteilung – Diplomarbeit FBR Konservierung und Restaurierung, HAWK Hildesheim, Sommer 2006

Gebrauchsanweisung und techn. Datenblatt Fungo-EX-Forte (www.weiblen.de/uploads/media/Funge-Ex-Forte_Datenblatt.pdf, 5.2.2015)

GÖGGEL, Manfred: Bauphysik für Baupraktiker, Schall-, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz, Wiesbaden/Berlin 1987

GOETHE, Burkhard: Schimmel an Pfeifenorgeln. Wissensstand 2014, (www.weiblen.de/top/kundenservice/fachberichte/, 20.02.2018)

INSTITUT FÜR DIAGNOSTIK UND KONSERVIERUNG an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK): Modellhafte Beseitigung von Umweltschäden und denkmalgerechte, nachhaltige Sanierung einer Carl Eduard Jehmlich–Orgel von 1878 im Raumkontext, Abschlussbericht des DBU-Projektes 30200-45, 2013.

KRUTZGER, Ragna: Untersuchungen zur Entwicklung von *Aspergillus glaucus* bei Bestrahlung mit ausgewählten Wellenlängen, M.A. Theis, HAWK-Hildesheim, 2016

LINDEMANN, Ralf, Hrsg.: Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung aufgrund anthropogenen Handelns bedingter Schimmelbesiedlungen auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodel-Halle der Moritzburg in Halle, Abschlussbericht des DBU-Projekts 31440-45 (ersch. 2018)

MEIER, Christina: Schimmelpilze auf Papier
(www.microconservation.de/fileadmin/data/Download/Artikel_IADA.pdf, 5.2.2015)

MILLING, A./KEHR, R./WULF, A./SMALLA, K.: Survival of bacteria on wood and plastic particles: Dependence on wood species and environmental conditions. *Holzforschung*, Vol. 59, pp. 72-81, 2005

PETERSEN, Karin /FRITZ, Ulrich-Markus./KRÜGER, Gabriele: Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung in St. Joseph, Osnabrück unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung von Sanierungsmaßnahmen. In: Klimaethisches Architekturkonzept zur nachhaltigen Fortentwicklung historischer Kirchenbauwerke. Fraunhofer IRB Verlag, 2016, S. 81-97

PETERSEN, Karin/KLOCKE, Jens: Understanding the deterioration of paintings by microorganisms and insects. In: *Conservation of Easel Paintings*, eds. Stoner, Joyce Hill/Rushfield, Rebecca, Routledge Series in Conservation and Museology, London, New York, 2012, P. 693-709

PETERSEN, Karin /TOEPFER, Ilka: Biomonitoring an Kunstobjekten - Zerstörungsfreie Methoden des Messens vor Ort, in: *Restauro* 107 , Heft 5, 2001, S. 364-372.

PETERSEN, Karin: Peter–und–Paul–Kirche Reichenbach i. V., Untersuchungsbericht Schimmel (unveröff.)

REIß, Jürgen: Schimmelpilze – Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung, 2. Auflage, Berlin 1998

ROTH, Lutz/FRANK, Hanns/KORMANN, Kurt: Giftpilze Pilzgifte- Schimmelpilze- Mycotoxine-Vorkommen, Inhaltsstoffe, Pilzallergien, Nahrungsmittelvergiftungen, Hamburg 1990

SCHMELZ, Ulrich: Pilzbefall in Orgeln, *Ars Organi* 51. Jahrgang, Heft 2, Juni 2003, S. 88–91

SCHMELZ, Ulrich: Vortrag Schimmelpilze (www.weiblen.de/top/kundenservice/fachberichte/ 20.02.2018)

SCHMELZ, Ulrich: Pilzbefall im Orgelbau (www.weiblen.de/top/kundenservice/fachberichte/, 04.02.2015)

SCHUBERT, M./ENGEL, J./THÖNY-MEYER, L./SCHWARZE, F.W.M.R./IHSEN, J.: Protection of Wood from Microorganisms by Laccase-Catalyzed Iodination, *appl Environ Microbiol*, 78 (20), pp. 7267-7275, 2012

SEDLBAUER, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Diss. Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2001

SEIDEL, Heiko u. a.: Modellhafte Entwicklung von haustechnischer Ausrüstung zur Temperierung denkmalgeschützter Steinkirchen mit dem Ziel der CO₂-Minderung, Absenkung der Betriebskosten sowie Vermeidung von Kondensat, hrsg. von OKR Jan Simonsen, Evangelisch-Lutherische Kirche in Norddeutschland Landeskirchenamt, Kiel 2013 (DBU Abschlussbericht 29185)

Sicherheitsdatenblatt Fungo-EX-Forte (www.weiblen.de/uploads/media/Fungo-EX-forte_Sicherheitsdatenblatt.pdf, 5.2.2015)

SPIEGEL, Claudia: Staub als Wachstumsfaktor und Nährmedium für Mikroorganismen. Bachelor Thesis, HAWK Hildesheim, 2007

STAPPEL, Matthias: Schellack – Eigenschaften, Verwendung, Untersuchungsmethoden, in: Restauo – Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, Jahrgang 107, Heft 8, München 2001, , S. 596-603

TÖPFER, Ilka: Untersuchungen zur Anwendbarkeit ausgewählter Schnelltests zur Beurteilung der mikrobiellen Besiedlung von Kunst und Kulturgut. – Diplomarbeit FB7 Dipl.-Biol., Universität Oldenburg, 1998

TOEPFER, Ilka/PETERSEN, Karin: Hochgedämmte Häuser - baubiologische Aspekte, in: Fachzeitschrift gi - Gesundheits - Ingenieur, Jg. 127, Nr. 1, 2006, S. 35-42.

TOEPFER, Ilka/PETERSEN, Karin: Mykotoxine in Innenräumen - Nachweis im Staub, Proceedings 26. Mykotoxin - Workshop, Herrsching 2004, S.97.

UMWELTBUNDESAMT, Hrsg.: Schimmel im Haus (www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ratgeber_schimmel_im_haus_0.pdf, 5.2.2015)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen (www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-zur-vorbeugung-untersuchung-bewertung, 5.2.2015)

WARSCHEID, Thomas: Orgel und Raumklima – Schimmelpilzbefall, in: Orgellandschaft Schleswig-Holstein, Kiel 2012, S. 139–144

WEIß, Björn/PLASCHKIES, Katharina/SCHEIDING, Wolfram: Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut. Ein Projekt zur Untersuchung der Ursachen, in: Restauo Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, Jahrgang 111, Heft 2, München 2005, S. 135-140

WEIß, Björn/PLASCHKIES, Katharina/SCHEIDING, Wolfram: Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut. Ein Projekt zur Untersuchung der Ursachen, Teil 2, in: Restauo Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, Jahrgang 112, Heft 6, München 2006, S. 376-383

8 Abbildungsverzeichnis

Titel (links, rechts), 4, 23: Jens Klocke

Titel (Mitte), 1, 2, 65 (rechts): Christoph Zimmermann

3, 5, 57, 63-64, 66-67: Insa Christiane Hennen

6 Screenshot Online-Umfrage, Forschungsgruppe Schimmelbefall an Orgeln in Mitteldeutschland

7: Ulrich-Markus Fritz

8-11, 50-55, 57: Thomas Löther

12: Henning Kersten

13-14, 27-49, 65 (links): Uwe Kalisch

15-17: Umweltbundesamt

18-22, 26: Gabriele Krüger

24-25: Karin Petersen

56, 58-59: Kristin Hiemann

60-62: Sabine Walther

9 Anhang

9.1 Befahrungsprotokolle: Übersicht Schimmelarten – Befallsgrade:

Befahrung	Datum	Seitenzahl
1. Befahrung	01.07. – 02.07.2015	75
2. Befahrung	06.10. – 08.10.2015	76
3. Befahrung	08.12. – 10.12.2015	77
4. Befahrung	01.03. – 03.03.2016	78
5. Befahrung	10.05. – 11.05.2016	79
6. Befahrung	23.06. – 24.06.2016	79
7. Befahrung	23.02.2017	79

1. Befahrung 01.07. - 02.07.2015											
Legende:											
ATP-Test:											
										Schwache Aktivität	
										deutliche Aktivität	
										starke Aktivität	
Schimmelarten:											
										Mycel (hell=evtl.)	
										Sporencluster	
										Sporen/Kondien	
										Mycelfragmente	
ATP - Test:											
											MKGO 1 Halle Prospekttraster
											MKGO 2 Halle Windkasten Hauptwerk
											MKGO 3 Halle Leiste hinter Abstrakten
											MKGO 4 Halle Schwellwerk C-Seite
											MKGO 5 Halle Register-Offenbass 16', Holzpfeife E1
										n.d.	MKE 2.6 Halle Empore 2, Nordseite vordere Bank unter Pultbrett
										n.d.	MKTR 7 Halle Nord-Westtreppe
											MKTR 8 Halle steinerne Treppenwendel
											MKOE 9 Halle Wandvorsprung hinter Reichel-Orgel
											LO 1 Liebertwolkwitz Prospektstock
											LO 2 Liebertwolkwitz Trakturrechen
											LO 3 Liebertwolkwitz Holzpfeife hinter Prospekt links
											LO 4 Liebertwolkwitz Hirnholzteil Innenraum rechts
											LO 5 Liebertwolkwitz Rundholzstab, innen
										n.d.	RÖ 1 Rötha, St. Georgen Tür nördlich der Vierung erdgeschoss
											RÖ 2 Rötha, St. Georgen Gehäuse linke Seite, innen
											RÖ 3 Rötha, St. Georgen Holzplatte hinter Trakturrechen
											RÖ 4 Rötha, St. Georgen Stangen hinter Trakturrechen
											RÖ 5 Rötha, St. Georgen Stangen hinter Trakturrechen
											RÖ 6 Rötha, St. Georgen Posaunenbecher
											RÖ 7 Rötha, St. Georgen Bilderrahmen, Raum hinter der Orgel
											RÖ 2.1 Rötha, St. Marien Schltbalkenpedalkoppel, C-Seite
											RÖ 2.2 Rötha, St. Marien 3. Subbaßpfeife
											LIO 1 N.N. Orgelgehäuse rechte Seite innen
											LIO 2 N.N. Prospektstock rechter Turm
											LIO 3 N.N. Trittbrett im Orgelgehäuse
											LIO 4 N.N. Trittbrett im Orgelgehäuse
											LIO 5 N.N. Wellenbrett
											LIO 6 N.N. Wand Südwestecke auf Empore
											LIO 7 N.N. wie LIO 6
											LIO 8 N.N. Schwellwerkgehäuse
											LIO 9 N.N. Gehäusevorderkante rechts
											LIO 10 N.N. Posaunenbecher
											LIO 11 N.N. Spieltisch unter Tasten
											GRÄ 1 Gräfendorf Holzpfeife hinter Gang in der Orgel
										n.d.	GRÄ 2 Gräfendorf Orgelkasten innen rechts
											GRÄ 3 Gräfendorf Nordwand
											GRÄ 4 Gräfendorf Stelle neben GRÄ 3
											2 Lebusa Pedalwindlade D-Seite
											3 Lebusa Pedalwindlade C-Seite
											4 Lebusa Registerzug
											5 Lebusa Blasebalg

										2. Befahrung 06.10. - 08.10.2015		<u>Legende:</u>	
												ATP-Test:	
												Schwache Aktivität	
												deutliche Aktivität	
												starke Aktivität	
												Schimmelarten:	
												Mycel (hell=evtl.)	
												Sporencluster	
												Sporen/Kondien	
												Mycelfragmente	
										ATP - Test:			
										TAB 1	Tabarz Altar Predella		
										TAB 2	Tabarz Assistenzfigur		
										TAB 3	Tabarz Orgelgehäuse Innenseite		
										TAB 4	Tabarz Orgelgehäuse links		
										TAB 5	Tabarz Südwand Orgelepore		
										TAB 6	Tabarz Rasterstütze C-Seite		
										TAB 7	Tabarz Raster Orgelgehäuse C-Seite		
										TAB 8	Tabarz Spieltisch innen hinten		
										nd			
										WAL 1	Waltershausen Subbaßpfeife		
										BBK 1	Bad Berka Klappe Gangbrett		
										BBK 2	Bad Berka Windkasten Cis-Seite		
										BBK 3	Bad Berka Raster Cis-Seite		
										BBK 4	Bad Berka Balg in Orgelgehäuse		
										BBK 5	Bad Berka außen Nordseite		
										BBK 6	Bad Berka Orgel Rückwand Verkleidung		
										BBK 7	Bad Berka Rückwand Orgel Balken		
										nd			
											Hetschburg		
											Zeit		
										nd			
										WÖL 1	Wöllnitz Holzpfeife Innenkante		
										WÖL 2	Wöllnitz Holzpfeife innen tiefer		
										WÖL 3	Wöllnitz Windkasten, C-Seite		
										WÖL 4	Wöllnitz Gangbrett unterseite		
										WÖL 5	Wöllnitz Außenseite Gehäuse		
										WÖL 6	Wöllnitz Orgelepore Füllung zum Kirchenraum		
										OBE 1	Oberndorf Rahmenholz neben Laufbrett		
										OBE 2	Oberndorf Register-Schiebestange		
										OBE 3	Oberndorf Leiter an Orgel		
										OBE 4	Oberndorf Oberseite innen an Orgelgehäuse		
										OBE 5	Oberndorf Labium große Holzpfeife		
										OBE 6	Oberndorf Tastatur weiße Tastenberseite		
										OBE 7	Oberndorf Spieltisch innen rechts		
										OBE 8	Oberndorf Spieltisch Schiebetür		
										OBE 9	Oberndorf Laufbrett		
										OBE 10	Oberndorf Windkasten Pedallade		
										EIS 1	Eisenberg Trakturrechen		
										EIS 2	Eisenberg Unterseiten Subbaßpfeifen		
										EIS 3	Eisenberg Subbaß Ton G verleimte Fuge		
										EIS 4	Eisenberg Subbaß Ton G Oberseite Verschluss		
										EIS 5	Eisenberg Subbaß Ton G Deckel Oberseite		
										EIS 6	Eisenberg Luftansaugkanal vor dem Moto, Turmstube		
										EUT 1	Kleineutersdorf Holzpfeife C-Seite		
										EUT 2	Kleineutersdorf Orgelgehäuse innen rechts		
										EUT 3	Kleineutersdorf Registerzugstangen Cis-Seite		
										EUT 4	Kleineutersdorf Balgkasten Verkleidung aus altem Balg		
										EUT 5	Kleineutersdorf Kiefersplintholz		
										EUT 6	Kleineutersdorf Dach Balken		
										EUT 7	Kleineutersdorf Orgelmotor		
										nd			
										EUT 8	Kleineutersdorf Dachfenstergiebel innen Glas		
										EUT 9	Kleineutersdorf Windkanal Oberwerk C-Seite		
										KRÖ 1	Krölpa unter oberem Gangbrett		
										KRÖ 2	Krölpa Orgelgehäuse innen Kiefembrett		
										KRÖ 3	Krölpa obres Gangbrett		
										KRÖ 4	Krölpa Oberkante Windkanal		
										KRÖ 5	Krölpa Notenhalter Blendrahmen		
										ZIE 1	Ziegenrück Holzpfeife kleines H, Subbaß 16', Cis-Seite		
										ZIE 2	Ziegenrück Spieltisch unter Notenhalteplatte		
										ZIE 3	Ziegenrück Orgelgehäuse, C-Seite		
										ZIE 4	Ziegenrück Spanplattenschrank, rechts hinter Orgel		

										4. Befahrung 01.03. - 03.03.2016		Legende:		
										ATP - Test:		Schimmelarten:		
												Myzel (hell=evtl.)		
												Sporencluster		
												Sporen/Kondien		
												Mycelfragmente		
Schimmelarten:														
Cladosporium species														
Aspergillus glaucus														
Aspergillus restrictus														
Trichothecium roseum														
Epicoccum -Typ														
Panicleum/Aspergillus -Typ														
Alternaria -Typ														
Botrytis -Typ														
Stemselepipiz														
Chaetorium														
Scopulariopsis -Typ														
Cladosporium cladosporioides														
Fusarium -Typ														
Ulocladium species														
										ATP - Test:	STJ 1	Stollberg Traktur innen		
											STJ 2	Stollberg Trakturrechen, Mitte auf der Oberseite		
											REI 1	Reichenbach Nordweststütze auf 1.Empore, 1. OG		
											REI 2	Reichenbach, Trinitatis, Sockelleiste Orgel vorn Cis-Seite (Nord)		
											REI 3	Reichenbach, Trinitatis, 1.Pfeife, Holz 1m Höhe		
											REI 4	Reichenbach, Trinitatis, Leimfuge unter Labium, 1.Pfeife 40cm Höhe		
											REI 5	Reichenbach, Trinitatis, Konduktenschlauch Cis-Seite		
											REI 6	Reichenbach, Trinitatis, C-Seite Holzpfefe (kein Klebefilm)		
											REI 7	Reichenbach, Trinitatis, Windlade hinten, C-Seite		
											REI 8	Reichenbach, Trinitatis, Chor, Nordseite neben Kanzeltreppe an Wand		
											REI 9	Reichenbach, Trinitatis, anderer Probeort an Stelle REI 8		
											REI 10	Reichenbach, Trinitatis, Pedalwindlade, Windkasten, C-Seite		
											OEL1	Oelsnitz Gehäuse Innenseite, vertikales Sperrholz		
											OEL 2	Oelsnitz Spundgriff Quinte 10 2/3'		
											OEL 3	Oelsnitz Balg-Falten oben		
											OEL 4	Oelsnitz Lederabdichtung Holzpfefe		
											OEL 5	Oelsnitz Holzpfefe		
											OEL 6	Oelsnitz Astlochdübel		
											DOR 1	Domburg Registertraktur C-Seite		
											DOR 2	Domburg Gehäuse Innen, Südseite		
											DOR 3	Domburg Registertrakturhalter		
											DOR 4	Domburg Oberlabium Holzpfefe C-Seite		
											DOR 5	Domburg Windkasten Spund Innenseite, Cis-Seite Hauptwerk		
											DOR 6	Domburg Klaviaturrahmen innen		
											DOR 7	Domburg Windkasten Spund Abdichtleder		
											DOR 8	Domburg Elektrokasten neben Tür C-Seite		
											DOR 9	Domburg Tastatur Seite von Halbtaste		
											DOD 1	Domdorf Welle der Tremulantschaltung		
											DOD 2	Domdorf Wellenbrett Manualtraktur		
											DOD 3	Domdorf Wellenbrett Manualtraktur		
											DOD 4	Domdorf Kanzelle Pedalwindlade A		
											KIR 1	Kirchscheidungen 1.Holzpfefe Cis-Seite "Cis"		
											KIR 2	Kirchscheidungen 2. Zwischengehäuse und Ständer		
											KIR 3	Kirchscheidungen Rückseite Wellenbrett im Orgelgehäuse		
											KIR 4	Kirchscheidungen anderer Probeort an Stelle KIR 3		
											SAN 1	Sangerhausen Stiefel Posaune C1		
											SAN 2	Sangerhausen Abstrakte C-Seite zur Spiellade am Prospekt		
											SAN 3	Sangerhausen Pfeifenstock Oberseite		
											SAN 4	Sangerhausen Gangbrett Unterseite		
											SAN 5	Sangerhausen Registertraktur Cis-Seite		
											SAN 6	Sangerhausen Gehäuse-Tür Nordseite innen		
											SAN 7	Sangerhausen Holzpfefe Cis-Seite über Labium, Subbaß Pfeife, großes C		
											SAN 8	Sangerhausen Gewölberippe unter Empore Oberseite		
											STO 1	Stollberg Registertraktur Cis-Seite		
											STO 2	Stollberg Orgelgehäuse Prospektseite innen		
											STO 3	Stollberg Brustwerk, Cis-Seite Eichenstock		
											STO 4	Stollberg Kabelkanal rund PVC		
											STO 5	Stollberg Windkanal Cis-Seite außen		
											STO 6	Stollberg Empore Galerieecke Südwest Wand		
											NOR 1	Nordhausen Konstruktionsholz C-Seite innen		
											NOR 2	Nordhausen Spiellade der Prospektpfeifen, C-Seite außen		
											NOR 3	Nordhausen Spiellade der Prospektpfeifen C-Seite innen Rückseite		
											NOR 4	Nordhausen Spielladenverschluss		
											NOR 5	Nordhausen Unterseite Gangbrett Hauptwerk		
											NOR 6	Nordhausen Unterseite Gangbrett zum Hauptwerk		
											ELE 1	Elend Rasterbrett, C-Seite, 2. von rechts, rechte vordere Ecke		
											ELE 2	Elend obere Tür, C-Seite innen		
											ELE 3	Elend untere Tür, C-seite innen		
											ELE 4	Elend oberer Balg, angeschraubte Halteleiste		
											ELE 5	Elend Gehäuse, Türausschnitt unten, C-Seite, Tür unten		
											ELE 6	Elend außen Fassade, Nordseite, vertikale Bretter		

5. Befahrung 10.05. - 11.05.2016		Legende:
		ATP-Test:
		Schwache Aktivität
		deutliche Aktivität
		starke Aktivität
		Schimmelarten:
		Mycel (hell=evtl.)
		Sporencluster
		Sporen/Kondien
		Mycelfragmente
ATP - Test:		
DOR 10a	Dornburg Windkasten-Verschlussbrett, innen	
WOL 7	Wöllnitz Orgelgehäuse, Nordseite, innen	
WOL 7a	Wöllnitz parallel-Probe zu WOL 7	
CRA 1	Crawinkel Unterste Registertraktur, Südseite=C-Seite, links zur Orgelmitte	
CRA 2	Crawinkel wie Cra 1, Mitte der untersten Registertraktur	
CRA 3	Crawinkel wie CRA 1 und 2, rechte Seite der Registratur	
CRA 4	Crawinkel oberste Registratur, Südseite=C-Seite	
CRA 5	Crawinkel Registerzugstange innen, C-Seite	
CRA 6	Crawinkel wie CRA 5	
CRA 7	Crawinkel Südseite=C-Seite, letzte große alte Holzpfeife	
CRA 8	Crawinkel Südseite=C-Seite, letzte große neue Holzpfeife, mit Beschichtung	
CRA 9	Crawinkel Pfeifenstock, C-Seite	
CRA 10	Crawinkel Pfeifenstockunterteil, C-Seite	
CRA 11	Crawinkel Brüstung Orgelepore, Innenseite	
CRA 12	Crawinkel Holzpfeife (Eiche), ausgebaut	
CRA 13	Crawinkel Holzpfeife wie CRA 12	
WAL 2	Waltershausen 16' Violon, 1.Holzpfeife, C-Seite	
WAL M1	Waltershausen 16' Subbass, C-Seite, 1. Pfeife oberer Rand innen	

6. Befahrung 23.06 - 24.06.2016		Legende:
		ATP-Test:
		Schwache Aktivität
		deutliche Aktivität
		starke Aktivität
		Schimmelarten:
		Mycel (hell=evtl.)
		Sporencluster
		Sporen/Kondien
		Mycelfragmente
ATP - Test:		
KRE 1	Krevese horizontaler Pfeifenhalter (Raster), südliches Pedalgehäuse	
KRE 2	Krevese Rückseite Orgel, Wellenbrett Süd	
KRE 3	Krevese Rückseite Orgel, Oberseite eines Trägers	
BSK 1	Braunschweig Pieta südl. Seitenschiff	
BSK 2	Braunschweig Kanzel Evangelisten	
BSK 3	Braunschweig Orgelgehäuse, Südseite, außen	
BSK 4	Braunschweig Orgelgehäuse, Rückseite, außen	
BSK 5	Braunschweig Orgelgehäuse Südseite, außen	
BSK 6	Braunschweig in Orgel, flacher Kabelstrang	
BSK 7	Braunschweig in Orgel Stahlträger	
BSK 8	Braunschweig Orgelgehäuse, Rückseite	
BSK 9	Braunschweig Pedal ausgebaut Unterseite	
BSK 10	Braunschweig Epitaph Pastorenbildnis Christopherus	
GOS 1	Goslar 1. Ebene in Orgel, Leiste unter Pfeifenstock	
GOS 2	Goslar Orgelgehäuse innen, Nordseite	
GOS 2	Goslar Doublette von GOS 1	
GOS 3	Goslar Rückseite Orgel, Holzleiter	
GOS 4	Goslar 1. Ebene in Orgel, Gangbrett Hauptwerk, Ostkante	
GOS 5	Goslar graue Säule, Nordseite Hauptschiff, 3. Joch	
GOS 6	Goslar, wie GOS 4, Westkante	
GOS 7	Goslar, rote Säule, Nordseite Hauptschiff, 3. Joch	
GOS 8	Goslar Verbindungsbrett zwischen Hauptwerks-Windladen	

7. Befahrung 23.02.2017		Legende:
		ATP-Test:
		Schwache Aktivität
		deutliche Aktivität
		starke Aktivität
		Schimmelarten:
		Mycel (hell=evtl.)
		Sporencluster
		Sporen/Kondien
		Mycelfragmente
ATP - Test:		
MAD 1	Magdeburg, Dom, Orgelgehäuse, Cis-Seite, Klappe, Trakturstangen, Eiche	
MAD 2	Magdeburg, Dom, Orgelgehäuse, C-Seite, Wellenrahmen, Registertraktur, Sperrholz	

9.2 Adressen der Autoren (Email)

Evangelische Kirche in Mitteldeutschland (EKM)

Christoph Zimmermann (christoph.zimmermann@ekmd.de)

Bauforschung – Denkmalpflege

Dr. Insa Christiane Hennen (hennen.hennen@t-online.de)

Dipl. Rest. Jens Klocke (j.klocke@freenet.de)

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

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch (kalisch@idk-denkmal.de)

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther (loether@idk-denkmal.de)

Dipl.-Geol. Henning Kersten (kersten@idk-denkmal.de)

INTOX GmbH

Prof. Karin Petersen (petersen-jever@t-online.de)