

Band 52

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

Schimmelbefall an Orgeln in Kirchen: Prävention und Bekämpfung

**Schimmelbefall an Orgeln in Kirchen:
Prävention und Bekämpfung (SCHIK)
ABSCHLUSSBERICHT**

DBU AZ 34554/01-45

Antragstellerin: Evangelische Kirche in Mitteldeutschland (EKM)

Laufzeit: 30 Monate, Projektbeginn: 15.10.2018, Fertigstellung Bericht April 2022



Verfasser

Dr. Insa Christiane Hennen, Bauforschung – Denkmalpflege, Wittenberg

Prof. Dr. Karin Petersen, INTOX GmbH, Jever

Dipl. Ing. Uwe Kalisch, Thomas Löther, Institut für Diagnostik und Konservierung an
Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt (IDK), Halle/ Saale, Dresden

Dipl. Rest. Jens Klocke, Hildesheim

Christoph Zimmermann, EKM



Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© by Fraunhofer IRB Verlag 2022

BoD – Books on Demand, Norderstedt

ISBN (Print): 978-3-7388-0755-4

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0756-1

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

Fraunhofer IRB | Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

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

Inhalt

0	Kurzfassung	4
1	Einleitung zum Projekt	5
	1.1 Ausgangslage	5
	1.2 Ziele	7
	1.3 Arbeitsschritte	8
2	Ergebnisse	13
	2.1 Ergebnisse der Laborversuche	13
	2.1.1 Versuche zur bioziden Ausstattung von Oberflächen	13
	2.1.2 Auswirkungen von Beschichtungen	17
	2.1.3 Versuche zum Einsatz von UV-C-Bestrahlung zur Hemmung von mikrobiologischer Aktivität	18
	2.1.4 Versuche zum Einsatz von Ozon zur Hemmung von mikrobiologischer Aktivität	21
	2.1.5 Anzuchtversuche weiterer Mikroorganismen in Abhängigkeit von raumklimatischen Umgebungsbedingungen	22
	2.1.6 Simulationsberechnungen zu den Ursachen und Behandlungsmöglichkeiten von Schimmel in Orgeln	28
	2.1.7 Ergebnisse der mikrobiologischen und raumklimatischen Untersuchungen an Referenzobjekten in Verbindung mit einer Bewertung der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen: Interpretation der Klimawerte und simulierten Wachstumsbedingungen	35
	2.1.8 Untersuchung des Einflusses von Luftbewegungen auf das Schimmelwachstum	50
	2.1.9 Untersuchung der Einsatzmöglichkeit von Heizteppichen und Infrarot-Heizfolien als Flächenheizungen	51
	2.2 Praxisversuche zur Erprobung von Technologien zur Hemmung mikrobiologischer Aktivität	56
	2.2.1 Versuche mit einer luftfeuchtegesteuerten Raumlufttemperierung zur Konditionierung der Raumluft im Gehäuse der Kapellenorgel im Kloster Michaelstein	56
	2.2.2 Anwendungsbeispiel für Heizteppiche: die Orgel in Geseke	61
	2.2.3 Temperierung der Wand hinter der Orgel: die Orgel in der Christuskirche Karlsruhe	61
	2.2.4 Auswirkung einer Raumlufttemperierung auf die Stimmung einer Orgel am Praxisbeispiel der Orgel im Kloster Michaelstein	64
	2.2.5 Erprobung einer technischen Luftentfeuchtung zur Hemmung des mikrobiologischen Wachstums am Praxisbeispiel Hünhan und Wöllnitz	65
	2.2.6 Bewertung des Energieverbrauchs: Entfeuchter versus Temperierung versus Erhöhung der Grundtemperatur	72
	2.2.7 Erprobung der Auswirkung einer Dämmplatte auf die Raumklimasituation in der Orgel in Freiberg	74

2.2.8	Reinigungsmethoden	79
2.2.9	Ergebnisse der Entfernung/Ausdünnung von das Schimmelwachstum begünstigenden Beschichtungen	82
2.2.10	Praxisversuche zum Einsatz von Ozon zur Schimmelbehandlung in Orgeln	87
2.2.11	Bewertung der Praxis der Schwefelbegasung von Orgelgehäusen am Beispiel von Schwarzenberg	88
2.2.12	Beispiele guter Praxis: Berge (Heizung, Lüftung), Wöllnitz (Entfeuchter), Schöppenstedt (Heizung, Lüftung), Scharfenberg (Heizung), Karlsruhe (Heizung), Michaelstein (Temperierung)	90
2.2.13	Leitfaden (Werkzeugkasten): Empfehlung zum Umgang mit von Schimmelbefall betroffenen Orgeln	95
3	Fazit, Ausblick auf offene Fragestellungen	101
4	Öffentlichkeitsarbeit	102
5	Literaturverzeichnis	103
6	Abbildungsverzeichnis	106
7	Kontaktadressen	106
8	Anhang	106
	Tests zur Verwendung flacher Heizelemente zur luftfeuchtegesteuerten Temperierung in Kirchenorgeln	
	ATP-Testreihe Entwicklung Aktivität des Befalls in der Orgel des Klosters Michaelstein, Testlauf Luftfeuchtereulierte Temperierung in der Orgel	
	Anlegen von Probeflächen für die Bewertung verschiedener Reinigungsmethoden in der Orgel in Kloster Michaelstein	

1. Kurzfassung

Viele Orgeln in Kirchenräumen sind von Schimmelbefall betroffen. Die Pilze besiedeln Instrumente aus allen Epochen, auch Werke berühmter Orgelbauer wie Silbermann, Trost, Hildebrandt, Ladegast.

In dem auf die Ursachenforschung orientierten Projekt „Schimmelbefall an Orgeln in Mitteldeutschland (OSCHI, 2014-2018)“ wurden Einflussfaktoren identifiziert, die den Pilzbefall an Orgeln begünstigen oder hemmen. Im Ergebnis wurde sichtbar, dass natürliche und anthropogene Faktoren zusammenwirken und sich teilweise überlagern.

Ziel des im Oktober 2018 begonnenen und Ende 2021 abgeschlossenen Vorhabens SCHIK, über das hier berichtet wird, war es, praktikable Strategien gegen einen Schimmelbefall an Orgeln zu entwickeln und zu erproben. Diese sollten an den im Projekt OSCHI identifizierten Ursachen des Pilzbefalls ansetzen, um auf Fungizid-Behandlungen wie auch auf kostspielige Umbaumaßnahmen künftig möglichst verzichten zu können. Zumindest sollten die Zielgrößen solcher Eingriffe präzisiert werden. Außerdem beinhaltete das Vorhaben die Formulierung allgemeiner Empfehlungen für die Prävention von Schimmelbildung an Orgeln in Kirchen.

Das Forschungsprojekt, das die Evangelische Kirche in Mitteldeutschland (EKM) initiiert hatte, wurde zusammen mit der Evangelisch-Lutherischen Landeskirche in Braunschweig, dem Bistum Fulda, dem Erzbistum Köln, dem Erzbistum Paderborn, der Evangelisch-lutherischen Kirche in Sachsen (EVLKS), der Kulturstiftung Sachsen-Anhalt und dem Freistaat Thüringen realisiert. Die Finanzierung erfolgte aus Mitteln der Partner und der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU). Im Projekt arbeiteten Mikrobiologen, ein Restaurator, Klimafachleute, ein Orgelbauer und Organist und eine Kunsthistorikerin mit den örtlich jeweils Verantwortlichen zusammen.

Das **Untersuchungsgebiet** erstreckte sich auf die Länder Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen (NRW), Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen bzw. die Zuständigkeitsbereiche der Partner. Die Palette der Modellobjekte reichte von Instrumenten in romanischen Kirchen bis zu Orgeln in Bauten, die nach dem Zweiten Weltkrieg errichtet wurden. Die untersuchten Instrumente stammen aus dem 18., 19. und 20. Jahrhundert.

Die im Projekt SCHIK unternommenen Versuche zeigten, dass Schimmelbefall an Orgeln verhindert werden kann, wenn es gelingt, das Feuchteangebot an den gefährdeten Oberflächen zu reduzieren. Dies ist mittels einer lokalen Temperierung

wie auch einer Entfeuchtung der Raumluft möglich. Flankierende Versuche mit Bioziden, die als Beschichtung oder im Sinne einer Begasung eingesetzt werden können, erbrachten positive Resultate für eine Schwefelbegasung, die als bekämpfend, jedoch nicht als vorbeugend angesehen werden kann, sofern die klimatischen Bedingungen unverändert bleiben. Dies gilt ebenso für Ozonbehandlungen, UV-C-Bestrahlungen und die Ionisation.

Zu den Ergebnissen gehört ein praktikabler „Werkzeugkasten“ für Eigentümer, kirchliche und öffentliche Bauverwaltungen, Denkmalpfleger und Restauratoren, Orgelbauer, Architekten und Haustechnikingenieure, der einen Fragenkatalog („Checkliste“) und verschiedene Verfahren zur Vermeidung und Bekämpfung von Schimmelbildung enthält. Diese dürften auch auf andere sporadisch genutzte Innenräume (mit und ohne Orgeln) übertragbar sein.

1 Einleitung zum Projekt

1.1 Ausgangslage

Orgeln gehören zu den wertvollsten Ausstattungsstücken in Kirchenräumen. Bundesweit existieren Tausende Instrumente in Dorf-, Kloster- und Stadtkirchen, alte und neue, große und kleine der unterschiedlichsten Bauarten. Insgesamt dürften in der Bundesrepublik Deutschland etwa 50.000 Orgeln in Kirchenräumen stehen. Viele dieser Instrumente sind als national wertvolle Kulturgüter besonders schutz- und erhaltungswürdig.

Im Jahr 2017 wurden die Orgelbaukunst und die Orgelmusik in das Verzeichnis des immateriellen Kulturerbes der UNESCO aufgenommen. Die Bundesbeauftragte für Kultur und Medien (BKM), Staatsministerin Monika Grütters, legte 2016 ein Programm zur Erhaltung wertvoller Orgeln auf, aus dem die Restaurierung wertvoller Instrumente gefördert wurde und wird. 2021 wählten die Landesmusikräte die Orgel zum „Instrument des Jahres“.

Zahlreiche Orgeln sind durch **Schimmelbefall** gefährdet. Manchmal ist der gesamte Kircheninnenraum von Schimmelpilzen befallen. Von den rund 400 Orgeln, die 2015 im Rahmen einer von der Evangelischen Kirche Mitteldeutschland (EKM) initiierten Befragung erfasst wurden, waren knapp 40% betroffen. Die Pilze besiedeln alte und neue Instrumente.

In dem auf die Ursachenforschung orientierten Projekt „Schimmelbefall an Orgeln in Mitteldeutschland“ (OSCHI) wurden zwischen Oktober 2014 und Februar 2018

verschiedene **Einflussfaktoren** identifiziert, die einen Schimmelbefall an Orgeln begünstigen oder hemmen.¹ Dabei wirken natürliche und anthropogene Einflüsse zusammen und überlagern sich teilweise.

So fehlen seit etwa 1990 **Luftbestandteile** aus unterschiedlichen Verbrennungsvorgängen, die den Schimmelbefall bis dahin offenbar hemmten. Dazu gehören Schwefeldioxid und einige Schwermetalle, die seitens der Industrie und Energieunternehmen wie privater Haushalte heute wesentlich weniger emittiert werden.

Die **Raumlufttemperaturen** haben einen größeren Einfluss auf die Schimmelbildung. Die Wachstumsbedingungen für die Pilze haben sich durch im Laufe der letzten Jahrzehnte gestiegene Außentemperaturen, die auf das Klima in den Kirchenräumen wirken, verbessert (natürliche Klimaerwärmung und menschlich verursachter Klimawandel). Oft wurden innerhalb der letzten drei Jahrzehnte in Kirchenräumen (leistungsstärkere) Heizungen installiert.

Ein verhältnismäßig häufiges Erreichen hoher **Luftfeuchtwerte** (über 60% rel. F.) in der Raumluft begünstigt den Schimmelbefall. Dabei wirkt sich einerseits aus, dass die Winter in den letzten Jahrzehnten weniger Frosttage umfassten als früher, andererseits, dass durch das Beheizen von Räumen die Bausubstanz wie auch die Materialien der Ausstattung in der Nähe der Heizelemente zur Abgabe von Feuchtigkeit gebracht werden. Diese sammelt sich an kälteren Bauteilen wie der Orgel an. Oft gelingt es nur unzureichend, Feuchtigkeit aus dem Kirchenraum nach außen abzuführen. Jüngere Maßnahmen zur Abdichtung des Bauwerks begünstigen die Ansammlung von Feuchtigkeit im Raum. Einen gewissen Einfluss hat auch der Feuchteintrag durch Besucher (etwa bei stark frequentierten Weihnachtsgottesdiensten) oder durch Reinigungsarbeiten (nasses Wischen).

Viele Praktiker nehmen an, dass dynamische Einflussfaktoren wie die **Strömungsgeschwindigkeit** der Luft die Entwicklung von Schimmel beeinflussen, weshalb der Einfluss der Luftströmung im Labor untersucht wurde. Modernisierungen und die Erneuerung von Fenstern gehen oft mit einer „Abdichtung“ der Innenräume einher, die außerdem oft nur sporadisch genutzt werden und in denen die Luft dann „steht“, so dass die Luftfeuchte über die Zeit zunimmt.

¹ Siehe den Abschlussbericht zum Projekt OSCHI, 2018, <https://www.baufachinformation.de/ursachen-des-schimmelbefalls-an-orgeln/fb/250046>

Neben der relativen Raumlufffeuchte und der Raumlufftemperatur im Umfeld und in der Orgel markieren sich **mikroklimabeeinflussende Faktoren** an den Materialoberflächen (der Orgeln wie auch sonst im Raum) als einer der Einflussfaktoren auf die Schimmelbildung und -Entwicklung. Zu nennen sind etwa Materialien, die Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen und unter bestimmten Bedingungen wieder abgeben (Sorption) oder die die Bildung erhöhter Feuchte an der Oberfläche begünstigen, sodass die Pilze diese Feuchtigkeit nutzen können (siehe Pkt. 2.1.6).

Substratfähige, also mikrobiell verwertbare **Beschichtungen, Staub** und staubbindende Oberflächeneigenschaften begünstigen die Schimmelbildung. Hierbei spielen auch frühere Holzschutzmittelbehandlungen eine Rolle, da ölige Beschichtungen das Sorptionsvermögen der Hölzer mindern. Andererseits konnten Inhaltsstoffe von Beschichtungen identifiziert werden, die das Schimmelwachstum nachweisbar hemmen, so Zink als Bestandteil von Anstrichen (Zinkweiß). Beschichtungen wie moderne Dispersionsfarben, die den Feuchteaustausch zwischen Raumluff und Bauwerk/ Ausstattung hemmen, tragen dazu bei, dass Oberflächen, an denen sich für die Pilze günstige Temperatur- und Feuchtebedingungen einstellen, eher schimmeln als vergleichbare Bereiche in Räumen mit höherem Feuchtepuffervermögen. Zudem besitzen Dispersionsfarben mit Acrylatanteilen auch eine Nahrungsfunktion (Heyn, 2002).

Teile der Orgeln, die im Dunkel des Gehäuses liegen, zeigen häufiger einen Schimmelbefall als dem natürlichen **Licht** ausgesetzte Teile. Bei der Frage nach dem Ursachenzusammenhang ist zu unterscheiden zwischen der möglichen direkten Beeinflussung bestimmter Entwicklungsstadien des Schimmels/ bestimmter Schimmelarten durch verschiedene Wellenlängen des Lichts, die für hier relevante Isolate jedoch noch nicht untersucht werden konnte, und einer indirekten Beeinflussung. Letztere könnte sich daraus ergeben, dass dem Licht zugewandte Flächen sich durch das Sonnenlicht leicht – aber messbar – erwärmen und dadurch eher abtrocknen.

1.2 Ziele

Im Projekt SCHIK sollten **praktikable Strategien** gegen einen Schimmelbefall an Orgeln entwickelt und erprobt werden, die an den oben beschriebenen Ursachen des

Pilzbefalls ansetzen, um auf Fungizid-Behandlungen wie auch auf kostspielige Umbaumaßnahmen künftig möglichst verzichten oder zumindest die Zielgrößen solcher Eingriffe präzisieren zu können. Empfehlungen für die Prävention von Schimmelbildung an Orgeln in Kirchen wie auch allgemein für die Vermeidung von Schimmelbefall in sporadisch genutzten Innenräumen sollten formuliert werden

Kirchenräume mit ihren oft reichen Ausstattungen wurden seitens der Partner als für diese Untersuchungen in besonderer Weise geeignete Objekte angesehen. Sie weisen hinsichtlich der teilweise im Laufe vieler Jahrhunderte verarbeiteten **Baustoffe**, der **Konstruktionsweisen** wie auch der **Materialitäten** der Ausstattungsteile ein sehr breites Spektrum auf. Folglich sind in diesen Räumen auch die möglichen **Nebenwirkungen** von Verfahren gut abzuschätzen, die nicht nur lokal wirksam sind, weil z. B. Wirkstoffe in gasförmigem Aggregatzustand eingesetzt werden.

Im Ergebnis war ein „**Werkzeugkasten**“ zusammenzustellen, der allgemein das Vorgehen von der Anamnese über die Diagnose bis zur Therapie und zum Monitoring beschreibt und generell oder in bestimmten Fällen geeignete Verfahren zur Vermeidung und Bekämpfung von Schimmelbildung vorstellt. Eigentümer, kirchliche und öffentliche Bauverwaltungen, Denkmalpfleger und Restauratoren aber auch Orgelbauer, Architekten und Haustechnikingenieure sollen so mit den notwendigen Informationen zu den jeweils angezeigten Voruntersuchungen und zu den insgesamt zur Verfügung stehenden Präventions- und Bekämpfungsmöglichkeiten ausgestattet werden und Entscheidungshilfen erhalten, um, wissenschaftlich fundiert, für den konkreten Einzelfall die beste Lösung zu finden. Projektergebnisse wurden bereits innerhalb der Laufzeit des Projektes in einem **Workshop** mit Anwendern auf ihre Praxistauglichkeit überprüft. Angestrebt wurde, dabei auch ein Format für spätere Weiterqualifikationsangebote zu erarbeiten.²

1.3 Arbeitsschritte

Ausgehend von den Ergebnissen des Projektes OSCHI (Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln, 2014–18) wurden im Projekt SCHIK (15.10.2018 bis 15.04./31.12.2021, pandemiebedingt verlängert) **Eingriffsmöglichkeiten** erprobt, die

² Ein ursprünglich geplanter zweiter Workshop konnte wegen der COVID-19-Pandemie nicht stattfinden, wie auch das Abschlusskolloquium auf den Herbst 2022, somit auf einen Zeitpunkt nach Abschluss des Projektes, verschoben werden musste. Der Entwurf des Abschlussberichts wurde mit den Partnern und dem Beirat diskutiert.

einen Schimmelbefall verhüten oder zu dessen nachhaltiger Beseitigung geeignet erscheinen.

Im Mittelpunkt der ursachenbezogenen Forschung stand die Frage, wie das **Feuchteangebot** auf den schimmelgefährdeten Oberflächen reduziert werden kann. Dazu wurden Ansätze im Sinne einer lokalen Temperierung, der Entfeuchtung der Raumluft im Orgelgehäuse, der Ventilation und der optimierten Heizung und Lüftung verfolgt und entsprechende Verfahren und Technologien erprobt. Eine energetische Optimierung der erprobten Verfahren war in diesem Projekt nicht möglich.

Die Wirkung von **Licht** verschiedener Wellenlängen auf das Schimmelwachstum konnte wegen des begrenzten Budgets nur in Bezug auf UV-C untersucht werden.

Der Einsatz von **Bioziden** wurde von vorneherein als lediglich flankierende Maßnahme verstanden, die im Kontext von ursachenbezogen ergriffenen Maßnahmen zur Vermeidung von schimmelbegünstigenden Klimaverhältnissen zu erwägen ist, diese jedoch keinesfalls ersetzen kann.

Das Projekt wurde in sechs Arbeitspaketen oder -Schritten bearbeitet:

- (1) Grundlagenermittlung und Auswahl der Vertiefungsobjekte
- (2) Laborversuche und Simulationen
- (3) Versuche an Modellobjekten
- (4) Auswertung und Bewertung der Ergebnisse
- (5) Abschlussbericht
- (6) Projektkoordination.

Im ersten Arbeitsschritt wurden 20 **Modellobjekte** in der Zusammenschau der von den Projektpartnern vorgeschlagenen Objekte ausgewählt: Bad Berka (St. Marien), Berge-Anröchte (St. Michael), Braunschweig (St. Katharinen), Brauweiler (Abteikirche), Bruchhausen (St. Johann Baptist), Freiberg (Dom; kleine Silbermannorgel), Geseke (St. Cyriakus), Heubach (St. Ulrich), Hünhan (St. Andreas), Karlsruhe (Christuskirche), Köln (St. Maria Lyskirchen), Köln (St. Mauritius), Marienberg (St. Marien), Michaelstein (Kapelle im Kloster), Rasdorf (St. Johannes d. T. und St. Cäcilia), Reichenbach (Trinitatis), Scharfenberg (St. Laurentius), Schöppenstedt (St. Stephanus), Schwarzenberg (St. Georgen) und die Paulskirche in Jena-Wöllnitz. Im Rahmen der Auswahl der Vertiefungsfälle wurden darüber hinaus acht weitere Kirchen besucht.³ Die Modellobjekte wurden mit Klimadatenloggern ausgestattet. Verwendung fanden

³ Dabei handelte es sich um Kirchen in Effeln und Ehrighausen (Erzbistum Paderborn), Lauterbach und Vielau (Sachsen), Bonn-Limperich, Siegburg (Erzbistum Köln), Blankenau und Soisdorf (Bistum Fulda).

Geräte der Firmen Testo, Driesen & Kern GmbH und Ahlborn Messtechnik GmbH. Die Genauigkeit der Messfühler betrug bzgl. der Temperatur $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (-20 bis +55 $^\circ\text{C}$), bzgl. der rel. Feuchte $\pm 2 \text{ } \%$ rel. F (2 bis 98 $\%$ rel. F) bei +25 $^\circ\text{C}$.



Abb. 1 Bruchhausen, Wallfahrtskirche St. Johannes Baptist, Blick zur Orgel

Bereits an dieser Stelle ist festzustellen, dass grundlegende Voraussetzungen für die Erfassung der maßgeblichen Außen- und Raumklimadaten darin bestehen, dass (1.) die Messpunkte aufgabenbezogen gewählt werden und (2.) qualitativ angemessene und kalibrierte (geeichte) **Messtechnik** zum Einsatz kommt. Die Erfahrung zeigt, dass es trotz eines erheblichen Betreuungsaufwandes sonst zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen kommen kann.

Im zweiten Arbeitsschritt wurden **Laborversuche** unternommen, um die Abhängigkeit der an den Objekten gewonnenen Isolate gegenüber Beschichtungen und Substraten, Klimaeinflüssen, Luftströmungen wie auch gegenüber anthropogenen Luftschadstoffen und unterschiedlichen Bioziden zu erkunden. Der Einfluss von Schwefeldioxid auf „Orgel-Materialien“ wie Holz, Leder, Metall konnte im Projektrahmen im Hinblick auf Elfenbein (Tastatur) untersucht werden. Ebenso wurde der Wirkung einer UV-C-Bestrahlung auf Elfenbein nachgegangen.

Präparierte **Probekörper** wurden in ausgewählten Objekten (Hünhan und Bruchhausen) ausgelegt, um die Wirkung verschiedener Hemmstoffe (Jod- und Silberverbindungen) zu untersuchen, die einen Befall bekämpfen könnten, oder womit ein Wiederbefall nachhaltig zu vermeiden wäre. In Schwarzenberg wurden zwei seitens der Gemeinde veranlasste Begasungen mit Schwefeldioxid begleitet.

Objekte, an denen in der Vergangenheit **Ozonbehandlungen** stattgefunden hatten (Berge, Geseke), wurden nachuntersucht, um anhand von ATP-Tests die Wirksamkeit der gewählten Maßnahme zu bewerten, hierzu erfolgten flankierende Laboruntersuchungen. Oberflächen von Kunstgegenständen im Kirchenraum wurden auf **augenscheinliche Nebenwirkungen** (z.B. Oxidationserscheinungen) begutachtet.

Ein Versuch diente dem Vergleich und der Bewertung der Wirksamkeit gängiger **Reinigungsmethoden**.

In Freiberg wurde die Wirkung einer **passiven Dämmung** zwischen Außenwand und Orgelrückseite erprobt. Der Versuch mit einem **Luftentfeuchter**, der in Hünhan bereits 2016 in der Orgel aufgestellt wurde, wurde beobachtet und ein ähnlicher Versuch in Wöllnitz vorgenommen.

In Kloster Michaelstein wurde ein Versuch mit einer **Temperierungsanlage** konzipiert, seitens der Kulturstiftung Sachsen-Anhalt realisiert und durch die Projektbearbeiter messtechnisch begleitet. In einem Laborversuch wurden **Heizteppiche und -folien** als mögliche Alternativen zu den in Michaelstein zur Temperierung eingesetzten Heizkörpern untersucht.

Zur Bewertung der Wirkung der Temperierung der Orgel auf die Stimmung des Instruments wurde in Michaelstein ein **Tonhöhenversuch** angestellt.

Nebelversuche dienten der Erkundung der Luftströmungsverhältnisse im Kirchenraum (Berge, Geseke, Marienberg, Schwarzenberg, Michaelstein, Bad Berka).⁴ In Geseke wurde auf diesem Wege die Wirksamkeit einer automatischen Lüftung überprüft.

Das im Projekt OSCHI entwickelte **Simulationsprogramm** (siehe Punkt 2.1.6, 2.1.7) wurde weiterentwickelt, um es zur Prognose der Wirksamkeit von Eingriffen in das

⁴ In Projekt OSCHI hatten entsprechende Versuche in Reichenbach, Trinitatis wie auch Peter und Paul, und Crawinkel stattgefunden.

Raumklima bzw. in das Klima in der Orgel einsetzen zu können, bevor diese Maßnahmen technisch realisiert werden. Für Objekte, an denen in der Vergangenheit offensichtlich wirksame Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas getroffen worden waren (Berge, Karlsruhe, Schöppenstedt, Scharfenberg), wurden mutmaßlich früher herrschende Klimaverhältnisse simuliert.

An den Vertiefungsobjekten, also jenen Objekten, an denen mit einer lokalen Temperierung (Michaelstein) oder einer technischen Luftentfeuchtung (Hünhan, Wöllnitz) oder mittels einer SO₂-Begasung (Schwarzenberg) in die Wachstumsbedingungen eingegriffen wurde, wurden wiederholt **ATP-Tests** vorgenommen, um die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen zu kontrollieren. ATP-Tests fanden auch in Bruchhausen statt, wo die manuelle Lüftung seitens der Gemeinde verbessert wurde. In Berge, Karlsruhe wie auch in Schöppenstedt, wo die örtlich Verantwortlichen bereits vor Projektbeginn in das Raumklima/ Klima in der Orgel eingegriffen hatten, konnte während der Projektlaufzeit kein neuerlicher Befall nachgewiesen werden.

Das **ATP** (Adenosintriphosphat) ist ein Stoff, der in lebenden Organismen, so auch in Pilzen und Bakterien als Energieträger dient, um dann unter Abgabe von Energie zu Adenosindiphosphat oder –monophosphat zu zerfallen (ADP /AMP). Die Menge an enthaltenem ATP in einer mit Mikroorganismen belasteten Probe kann als Maß für die Aktivität des Befalles dienen. Zur ATP-Bestimmung dient ein Verfahren, welches sich das Phänomen der Biolumineszenz zunutze macht. Im Projekt wurde dafür ein Photomultiplier Lumitester C-100 mit den Teststäbchen LuciPac II verwendet. Maßeinheit ist „Relative Light Units (RLU)“, eine geräteinterne Größe, die inproportionalem Verhältnis zu der im Reaktionsgefäß emittierten Lichtmenge steht. Werte zwischen 100 und 500 RLU/cm² definieren die Verfasser bei einem Oberflächenbefall als schwache Aktivität, Werte zwischen 500 und 1000 RLU/cm² als deutliche Aktivität, Werte ab ca. 1000 RLU/cm² aufwärts als starke Aktivität. Eine dünne Staubschicht auf einer Metalloberfläche kann bei 70% relativer Luftfeuchte z.B. 65 RLU/cm² ergeben. Diese „Grenzwerte“ beziehen sich auf Daten, die mit einem *Photomultiplier Lumitester C-100* gewonnen wurden, und sind deshalb nicht auf andere Geräte zu übertragen oder zu verallgemeinern.

An der Orgel der Katharinenkirche zu Braunschweig wurde eine mutmaßlich den Schimmelbefall begünstigende **Beschichtung** der Oberfläche untersucht.

Die Laborversuche und die Tastversuche an Ort und Stelle zielten darauf ab, praxistaugliche **Eingriffsmöglichkeiten** zu finden und zu erproben. Alle Projektergebnisse wurden in der Gruppe der Bearbeiter und mit den Partnern diskutiert und aus mikrobiologischer, bauklimatischer, denkmalpflegerischer und restauratorischer Perspektive wie auch aus der Sicht des beteiligten Orgelbauers bewertet. Die Praxistauglichkeit stellte dabei ein entscheidendes Kriterium dar.

Die Ergebnisse sind im vorliegenden Abschlussbericht zusammengefasst, der auch die Handreichung für die Eigentümer bzw. örtlich Verantwortlichen, den „Werkzeugkasten“, enthält.

Die Bearbeiter danken den Projektpartnern für das Vertrauen und die vielfältige praktische Unterstützung.

2 Ergebnisse

2.1. Ergebnisse der Laborversuche

2.1.1 Versuche zur bioziden Ausstattung von Oberflächen

In Laboruntersuchungen auf geeigneten Nährböden wurde zunächst die Wirkung von **Silbernanopartikeln** und **Jodid** (KJ) auf das Wachstum von 18 relevanten Isolaten untersucht. Diese Stoffe sind im Vergleich zu handelsüblichen Bioziden deutlich weniger gesundheitsgefährdend.

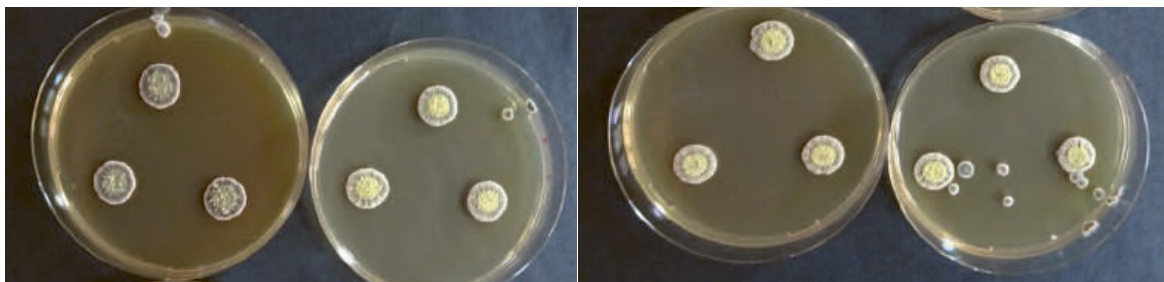


Abb. 2 Geringe Hemmwirkung von Silbernanopartikeln auf das Isolat aus Bruchhausen
v.li.n.re.: 0, 10, 25, 50 mM Ag

Für das Isolat aus Hünhan konnte im Laborversuch auf den mit Silber ausgerüsteten Nährböden kein Hinweis auf eine ausreichende Hemmung des Schimmelwachstums gezeigt werden.

An den mit einer Mischkultur bzw. dem Isolat aus Hünhan beimpften Probeklötzchen, die vom 20.09.2019 bis zum 31.10.2021 in der Orgel in Hünhan ausgelegt waren, wurde dagegen über die Messung des Energiegehalts (ATP) auf den behandelten Flächen, die mit unbehandelten Probekörpern verglichen wurden, ein Effekt

nachgewiesen. Verwendet wurden Probekörper aus Kiefer und Eiche, die mit Silber in einer Konzentration von 25 mM behandelt worden waren. Der Ausgangswert der unbehandelten beimpften Proben wurde für Kiefer mit 896 RLU/ cm², für die behandelte Probe mit 392 RLU/cm² bestimmt. Für das Isolat aus Hünhan ergab sich eine Verringerung der mikrobiellen Aktivität von 8.104 auf 236 RLU/cm².

mM Ag	Holzart	Isolat	RLU/1 cm ²
0	Kiefer	Mischkultur	896
0	Eiche	Mischkultur	1.152
25	Kiefer	Mischkultur	392
25	Eiche	Mischkultur	476
0	Kiefer	Hünhan	8.404
0	Eiche	Hünhan	620
25	Kiefer	Hünhan	236
25	Eiche	Hünhan	212

Tab. 1 Wirkung der Behandlung der Holzoberflächen mit Silbernanopartikeln (Ag), in Millimol (mM) auf zwei Isolate, mit denen die Probeklötzchen angeimpft worden waren. Die „Mischkultur“ wurde an verschiedenen Orgeln isoliert. Beim Isolat „Hünhan“ handelt es sich um den in Hünhan isolierten Schimmelpilz. Die Maßzahl RLU/1cm² steht für die Aktivität der Pilze auf den Probekörpern bei Testlaufzeiten von = und 25 Tagen.

Für die Behandlung mit **Kaliumjodid (KJ)** und die enzymatische Jodierung mittels **Laccase/KJ** wurden ebenfalls Testungen im Labor wie auch in Orgeln unternommen. Die desinfizierende Wirkung einer **Jodtinktur** wird seit Langem auch im medizinischen Umfeld genutzt. Schubert et al. (2012) nutzen diesen Effekt, um durch den modifizierten Einsatz Holz im Außenbereich vor witterungsbedingtem mikrobiellen Abbau zu schützen. Neben anderen Stoffen erzielten sie durch Tauchen in eine **Enzymlösung** (Laccase, 10 U/ml) die Aktivierung des Lignins und erreichten zudem eine Anbindung des ebenfalls durch die Laccase zu Jod umgewandelten Jodids, was zu einer verstärkten Hemmwirkung führte.

Im Laborversuch wurden daher einerseits unterschiedliche Konzentrationen **Kaliumjodid** (0, 1, 10, 25, 50 mg/l) in Nährböden zugesetzt und diese mit gleichen Mengen der relevanten Isolate beimpft. Der Zusatz von KJ ohne Enzymanwendung zeigte eine Hemmung in Konzentrationen ab 25 mg/l.

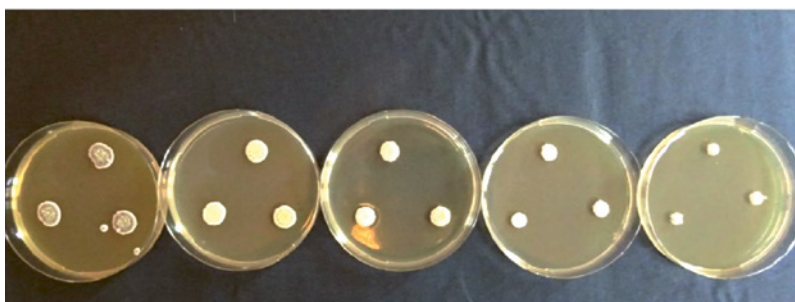


Abb. 3 Hemmwirkung von Kaliumjodid (KJ) auf das Isolat aus Bruchhausen: v.li.n.re.: 0, 1, 10, 25, 50mg/l

Der Versuch wurde modifiziert, um die Effektivität der Jodierung zu steigern und eine bessere Anbindung an das Holz zu erreichen. In Anlehnung an Versuche zur Ausrüstung von Holz im Außenbereich (Schubert et al. 2012) wurden Furniere aus Kiefer sterilisiert und durch eine kombinierte Behandlung mit Laccase und Jodid ausgerüstet. Diese Probepfättchen wurden gezielt mit Isolaten beimpft und unter das Wachstum fördernden Bedingungen – 86 % rel. F. bei Raumtemperatur – für 21 Tage inkubiert. Es zeigte sich für die Mehrzahl der Isolate eine deutliche Verringerung des Wachstums durch die Laccase/Jodierung (Laccase +50mM KJ). Die Ausrüstung mit geringerdosiertem Jod (Laccase + 1mM KJ) war nicht ausreichend. Auch für die Anwendung von Jod (50 mM KJ) ohne Laccasezusatz wurde in einigen Ansätzen keine ausreichende Hemmung erzielt.

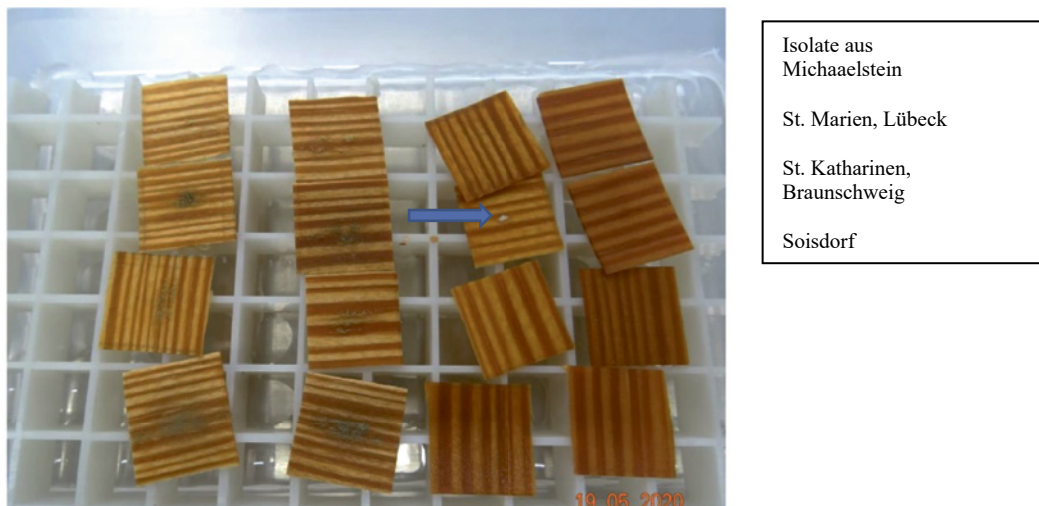


Abb. 4 Kiefern furnier mit Laccase/Jod Ausrüstung, beimpft mit Isolat aus Michaelstein, Lübeck, Braunschweig und Soisdorf, nach 21 Tagen Versuchsdauer; v. li. n. re.: Kontrolle, 1mMKJ + Laccase, 50mM KJ, 50mM KJ + Laccase. Der blaue Pfeil weist auf die Kolonieentwicklung für das Isolat aus St. Marien, Lübeck.

Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass die gering dosierte **KJ**-Konzentration trotz Laccase-Behandlung zu keiner eindeutigen Wachstumshemmung führt. Obwohl für die anderen Isolate eine Hemmwirkung durch 50 mM KJ gezeigt wird, wird diese zwar gegen das Isolat aus Lübeck auch gezeigt, jedoch kommt es hier noch zu einem verringerten aber eindeutigen Wachstum. Die Ansätze mit höher dosiertem KJ und gleichzeitiger Umsetzung durch die Laccase führen hier in allen Fällen zu einer vollständigen Wachstumshemmung.

Ebenfalls in Hünhan wurden so präparierte und angeimpfte **Probeklötzchen** in der Orgel ausgelegt.

Nach **25** Monaten wurde wie zuvor für die Silberausstattung der Energiegehalt auf den mit KJ + Laccase behandelten Oberflächen gemessen (ATP-Test).

mM KJ +Laccase	Holzart	Isolat	RLU/1 cm ²
0	Kiefer	Mischkultur	896
0	Eiche	Mischkultur	1.152
50	Kiefer	Mischkultur	236
50	Eiche	Mischkultur	112
0	Kiefer	Hühnhan	8.404
0	Eiche	Hühnhan	620
50	Kiefer	Hühnhan	308
50	Eiche	Hühnhan	156

Tab. 2 Wirkung von KJ + Laccase auf die Besiedlung der Oberflächen durch Schimmelpilze. Verwendet wurden wiederum das in verschiedenen Orgeln gewonnene „Mischisolat“ und das Isolat aus Bruchhausen. Die Maßzahl RLU/1cm² steht für die Aktivität der Pilze auf den Probekörpern.

Auch an den in der Orgel ausgelegten Probeklötzchen konnte so die Wirksamkeit der **Laccase-Jodierung** nachgewiesen werden.

Es allerdings völlig klar, dass diese Wirkung nur auf Holzoberflächen erreicht werden kann, die nicht zuvor oder aber im Nachgang lackiert oder anderwärtig abgeschirmt werden. Es handelt sich bei der vorgeschlagenen Behandlung also um eine Möglichkeit, neue Hölzer auszurüsten, um hier einen anhaltenden Schutz gegen Besiedlung aufzubauen.

Inwieweit sich die Keimung durch den Einsatz von **Zimtsäure** verzögern lässt, konnte ebenfalls im Laboransatz untersucht werden.

Zimtsäure ist ein in Pflanzen und Mikroorganismenvorkommender Naturstoff, der von aromatischen Aminosäuren über einen Reaktionsweg abgeleitet wird, auf dem u. a. auch viele rote Farbstoffe (Anthocyane) in Blütenblättern aber auch in Rotkohl gebildet werden.

Hierzu wurde Nährböden eine entsprechende Konzentration handelsüblicher Zimtsäure (Sigma. CAS-Nr.: 140-0-3) zugesetzt und diese Böden mit Sporensuspensionen angeimpft. Das Wachstum von Kolonien wurde nach 7 Tagen ausgewertet, bereits bei einer Konzentration von 1 µM Zimtsäure konnte das Auskeimen von 80% der Isolate gegenüber dem Wachstum auf Platten ohne Zimtsäurezusatz derart verzögert werden, dass die Koloniegrößen um bis zu 90 % im Durchmesser geringer ausfielen.

Entsprechende **Untersuchungen im realen Objekt** stehen noch aus. Jedoch konnte bereits im Laboransatz nachgewiesen werden, dass ein mit Zimtsäure präpariertes Furnierplättchen durch den späteren Auftrag einer Beschichtung keine Hemmwirkung

auf das Auskeimen mehr ausübt. Offensichtlich wird durch eine Beschichtung hier die Wirkung auf die Keime verhindert, da eine Art Abschirmung durch die Beschichtung erreicht wird. Ebenso verhielt es sich, wenn Zimtsäure in Klebemittel eingebracht wurde, auch in diesem Ansatz zeigte die Zimtsäure keine Wirkung. Der direkte Kontakt mit den Sporen ist also für die Wirkung der Zimtsäure ausschlaggebend.

Schönfelder (2020) belegte in ihren Laborversuchen zur Auswirkung einer **Schwefelbegasung** Farbveränderungen an Elfenbein, eine Problematik, die auch an Orgeln auftreten könnte.

2.1.2 Auswirkungen von Beschichtungen

Ausgehend von im Projekt OSCHI durchgeführten Laborversuchen wurde auch im Projekt SCHIK im Labor und vor Ort die **Substratwirkung gängiger Oberflächenbehandlungen** untersucht (siehe 2.2.9).

In Bruchhausen wurde am 12.11. 2020 eine entsprechend vorbereitete Probetafel ausgebracht, die mit einer Mischkultur der relevanten Keime angeimpft worden war. Am 08. November 2021 erfolgte die Auswertung der zwischenzeitlich eingetretenen Besiedlung durch eine Aktivitätsmessung (ATP-Test) sowie mikroskopische Kontrolle des jeweiligen Entwicklungsstadiums, die mit den ATP Messungen im Einklang stehen.

Holzart / Bindemittel	ATP (RLU/ 1 cm ²) Mischisolat	ATP (RLU/ 1 cm ²) Bruchhausen
1.1. Fichte ohne Beschichtung	1.299	1.887
1.2. Fichte / technische Gelatine	3.879	5.175
1.3. Fichte / Ammoniak-Kasein	882	1.064
1.4. Fichte / Mowilith 50	714	635
1.5. Fichte / Mowiol 4-98	2.015	2.184
1.6. Fichte / Zapponlack	21.580	19.239
1.7. Fichte / Leinölfirnis	21.930	20.743
1.8. Fichte / Schellack	6.952	6.130
1.9. Fichte / Fußboden Hartwachs	18.230	16.741

Tab. 3 Wirkung von gängigen Beschichtungen im Blick auf die Besiedlung der Oberflächen durch Schimmelpilze. Verwendet wurden wiederum das in verschiedenen Orgeln gewonnene „Mischisolat“ und das Isolat aus Bruchhausen. Die Maßzahl RLU/1cm² steht für die Aktivität der Pilze auf den Probekörpern.

Abweichend zu ebenfalls erfolgten Laboruntersuchung konnte unter Objektbedingungen auf Polyvinylacetat bzw. –alkohol kein Besiedlungsaufbau nachgewiesen werden. Hier bliebe zu prüfen, ob den Materialien möglicherweise werksseitig eine Topfkonservierung zugesetzt wurde.

Zudem kann davon ausgegangen werden, dass einige **Hölzer** – nicht nur Tropenhölzer – eine natürliche Hemmwirkung auf Mikroben ausüben (Milling et al. 2005). Auch hier wird durch das Aufbringen von Beschichtungen dieser Schutz inaktiviert, da die Mikroben nicht mehr in direkten Kontakt zur Holzoberfläche kommen.

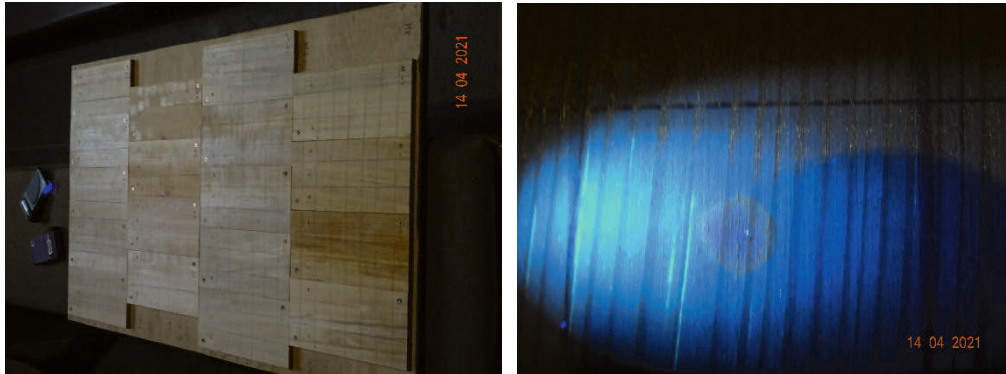


Abb. 5 Probeplatten aus Bruchhausen Impfpunkt mit ausgebildeter Fluoreszenz (MK 1.9)

In wieweit die Besiedlungsentwicklung tatsächlich nur auf unterschiedlicher Substratwirkung der Überzüge beruht, oder ob hier auch Faktoren wie erhöhte „Klebrigkeit“ der Oberflächen zur Anhaftung von Stäuben und damit einhergehend Erweiterung des Nährstoffangebots führen oder auch die Feuchtaufnahme und -Abgabe des Holzträgers beeinflussen, zu berücksichtigen sind (Spiegel 2007), konnte nicht geklärt werden.

Eine Probeplatte durfte zur weiteren Beobachtung im Objekt verbleiben.

2.1.3 Versuche zum Einsatz von UV-C-Bestrahlung zur Hemmung von mikrobiologischer Aktivität

Im Laborversuch erfolgten zunächst Versuche zur Wirksamkeit einer germicidalen (keimtötenden) **UV-C-Bestrahlung** (256 nm 1.200 mW). Hierzu wurden sterilisierte Filterplättchen mit jeweils gleicher Menge von Keimsuspensionen verschiedener relevanter Schimmelpilzisolat beimpft. Je eine Serie der Plättchen wurde bis zur Bestrahlung trocken gelagert, was einem nicht mehr aktiven Altbefall gleichkäme, während eine weitere Serie für 2 Tage auf feuchte Agarböden aufgebracht wurde, um durch die kontrollierte Anfeuchtung einen aktiven Befall zu simulieren. Die eigentliche Bestrahlung erfolgte dann für 24, 48 oder 120 Stunden. Danach wurden die Plättchen auf frische Nährböden aufgelegt, das erzielte Wachstum mit dem auf unbehandelten und zu Versuchsbeginn beimpften und gelagerten Plättchen verglichen.

Die Isolate aus **Heubach** wie auch für jene aus der kleinen Silbermannorgel im Freiburger Dom zeigten bereits nach einer 24-stündigen Behandlung eine vollständige Abtötung und somit keinerlei Wachstum mehr, sowohl für den simulierten Altbefall als auch für bestrahlten aktiven Schimmel. Für das Isolat aus der Klosterkirche Michaelstein konnte diese erst nach 120 Stunden Bestrahlung erreicht werden.



Abb. 6 Referenzprobe Heubach 24 h trocken / 24 h UV-C Heubach inaktiv

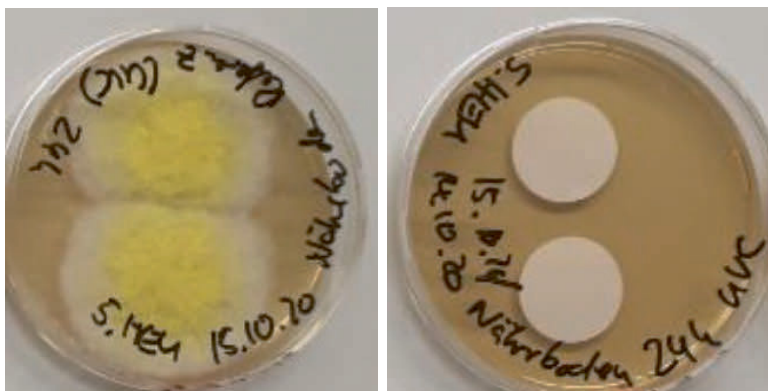


Abb. 7 Referenzprobe Heubach 24 h aktiviert / 24 h UV-C Heubach aktiviert

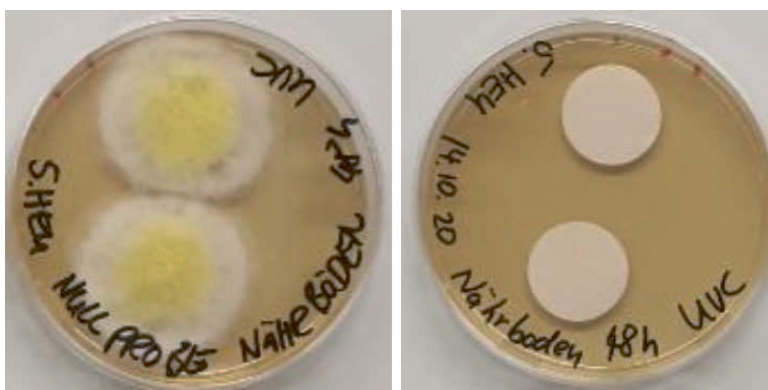


Abb. 8 Referenzprobe Heubach 48 h aktiviert / 48 h UV-C aktiviert

Das Isolat aus der Klosterkirche Michaelstein dagegen zeigte bei Behandlung aktiven wie inaktiven Befalls nach 48h UV-C Bestrahlung zwar eine deutliche Reduzierung des

Wachstums, eine vollständige Abtötung wurde jedoch erst nach 120 h Bestrahlung festgestellt.

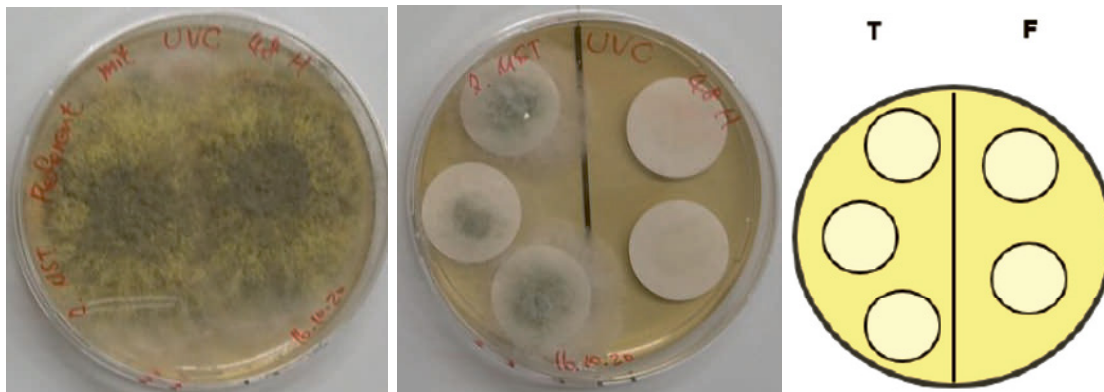


Abb. 9 MST Referenz feucht 48 h

MST Behandelt 48 h

li: trocken / re: feucht 48h

Es kann somit einerseits von einer drastischen **Reduzierung des Schimmelbefalls** bereits nach 48 Stunden Bestrahlung ausgegangen werden. Wie lange jedoch die Zeiten bis zur vollständigen Abtötung anzusetzen sind, hängt einerseits vom Aktivitätszustand des Befalls ab und zudem davon, welche Art in der jeweiligen Orgel ausgebildet ist. Somit sollte die Effektivität in jedem Fall durch Kontrolluntersuchungen begleitet werden.

Elfenbeinplättchen wurden für 62 Stunden in den Versuch zur UV-C Bestrahlung einbezogen, um mögliche Auswirkungen der Bestrahlung zu erfassen, Die untere Hälfte der Plättchen wurde durch Alufolie von der Bestrahlung abgeschirmt.

Die Messung der eingetretenen und auch mit dem bloßen Auge erkennbaren Farbveränderung erfolgte mittels Spektrometer (spectro-guide shere gloss, BYK – Gardner) vor und nach der Bestrahlung. Zunächst wurden die $L^* a^* b^*$ -Werte ermittelt und daraus der ΔE_{2000} -Wert berechnet.

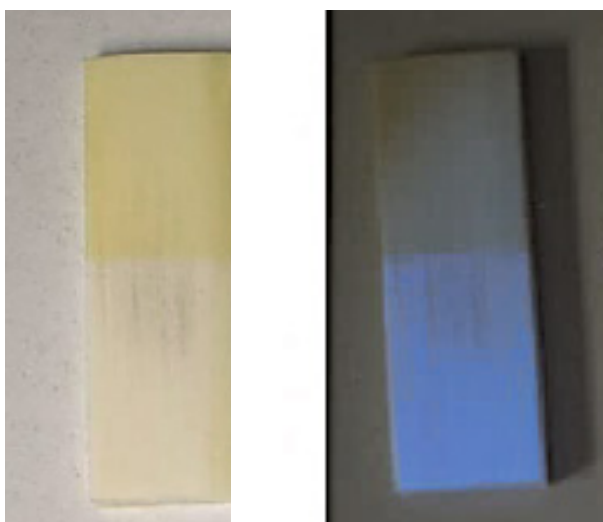


Abb. 10 Vergilben des oberen, bestrahlten Teils des Elfenbeins
li: im Tageslicht aufgenommen
re: unter UV-Anregung

2.1.4 Versuche zum Einsatz von Ozon zur Hemmung von mikrobiologischer Aktivität

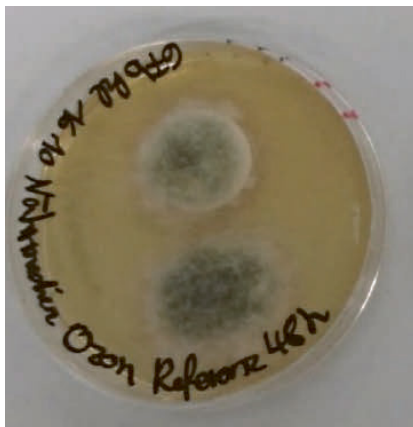
Die Versuche zur Wirkung von **Ozon** erfolgten nach dem gleichen Muster wie zuvor für die UV-C Bestrahlung beschrieben. Im Raum wurde ionisierte Luft (59.000 Ionen/cm³) erzeugt. Durch Einstellen in einen Farady'schen Käfig wurden die Ionen abgeschirmt, während das sich bei der Ionisation der Raumluft gleichzeitig bildende Ozon (400 ppm) in den Käfig eindringen und dort auf die Pilze wirken konnte.



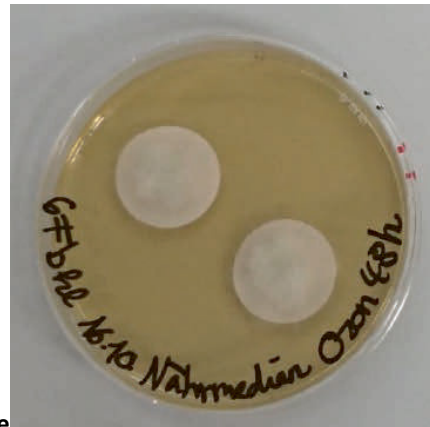
Abb. 11 Ionisationsanlage



Faraday'scher Käfig zur Abschirmung der Ionen



Fb 48 f re



48h+



120 f120



f+

Abb. 12 Isolat aus Freiberg, kleine Silbermann Orgel.

Links: unbehandelte aktivierte Kontrollprobe, rechts: 120 h Ozon, aktiviertes Isolat

Auch in diesem Versuch zeigten sich leichte Abweichungen für die verschiedenen Isolate. Generell kann jedoch bereits nach 48 Stunden Lagerung unter Ozon eine deutliche Reduzierung des Wachstums erreicht werden, hier für das aktivierte Isolat aus **Freiberg** belegt. Dieser Effekt wird bei der längeren Behandlungszeit von 120 Stunden auch gegenüber der inaktiven Probe noch deutlich gesteigert.

Im Hinblick auf die Wirkung der **kombinierten Behandlung unter Ionisation und Ozon** konnte keine nennenswerte Steigerung der Hemmwirkung durch die zusätzlich durchgeführte Ionisationsbehandlung erreicht werden.

Die Möglichkeit, eine Ionisation ohne die Entwicklung von Ozon durch das Ionisieren der Luft zu bewirken, ist aus technischen Gründen nicht gegeben. Die Prüfung der reinen Ozonanwendung erfolgte durch Lagerung der Proben in einem Faraday'schen Käfig.

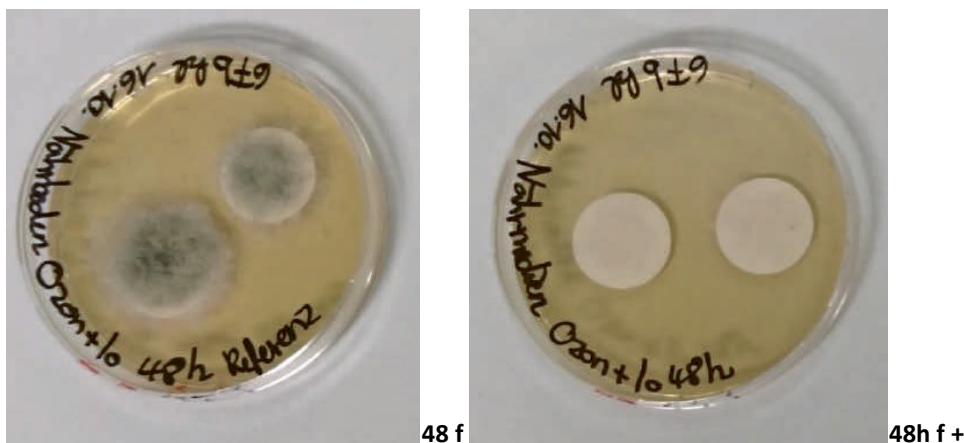


Abb. 13 Isolat aus Freiberg, kleine Silbermann Orgel.

Links: unbehandelte aktivierte Kontrollprobe, rechts: 48 h Ozon+Ionisation, aktiviertes Isolat

Wie für die UV-C-Bestrahlung beschrieben, ergaben sich auch für diese beiden Verfahren geringe Unterschiede in der Effektivität bei den verschiedenen Isolaten. Die Wirksamkeit am Objekt wäre per ATP-Test nachzuprüfen.

2.1.5 Anzuchtversuche weiterer Mikroorganismen in Abhängigkeit von raumklimatischen Umgebungsbedingungen

Bereits im Projekt OSCHI wurden erste Untersuchungen zur Entwicklung von Schimmel in Abhängigkeit von der **Temperatur** und der **Feuchtigkeit** durchgeführt. Die Parameter wurden dabei so gewählt, dass sie einen realistisch in Kirchenräumen zu erwartenden Klimakorridor zu Grunde legten.

Diese Ergebnisse zeigten, dass sich unter den tatsächlichen Bedingungen in den einem **Klimamonitoring** unterzogenen Kirchenräumen nur extrem selten die Bedingungen einstellten, die im Labor unter gleichbleibenden Klimabedingungen zur Entwicklung eines Befalls erforderlich waren.

Das von den Beobachtungen und Messungen in den Objekten abweichende Laborergebnis lässt sich dadurch erklären, dass an den realen Objektoberflächen in den Kirchen häufige Klimawechsel dazu führen, dass sich dort **Feuchteschwankungen** und eben auch die **Feuchteanreicherung** auf den besiedelten Oberflächen einstellen, die das Wachstum ermöglichen, obwohl Messungen von Feuchte und Temperatur im Luftraum gegen eine Schimmelentwicklung sprechen.

Um dieses Problem näher zu untersuchen, wurden **Laborversuche** mit Vertretern der Arten durchgeführt, die in den als Vertiefungsfälle ausgewählten Orgeln nachgewiesen worden waren. Hier wurde insbesondere darauf geachtet, Arten der relevanten Gruppe *Aspergillus glaucus* in die Untersuchungen einzubeziehen. Im Hinblick auf die Praxis interessierte insbesondere, wie lange Wachstumsbedingungen bestehen müssen, damit es zu einer Keimung kommt. Die Bedeutung der **minimal time of wettness** (MTW, minimale Zeit für den Beginn der Keimung) für die Praxis ergibt sich daraus, dass auch kurzfristig im Zuge von Eingriffen erreichte Klimaveränderungen in ihrer Auswirkung auf einen Schimmelbefall abgeschätzt werden können.

Zum Verständnis der Untersuchungen wird hier zunächst auf den **Entwicklungszyklus** der Schimmelkonidien/-sporen eingegangen. Zum besseren Verständnis wird nicht zwischen beiden Formen – Schimmelkonidien/-sporen – unterschieden und der umgangssprachlich geläufigere Begriff *Sporen* benutzt, der sich nach Florian (2002) wie folgt charakterisieren lässt.

Die reifen **Sporen** unterliegen zunächst einer **Keimhemmung** (*Dormancy*), die durch von der Elterngeneration oder in den Zellen selbst (*Selbstinhibitoren*) gebildete Chemikalien eintritt. Hierbei wären nicht flüchtige phenolische Komponenten und insbesondere Zimtsäure von Bedeutung, aber auch die Impermeabilität der Zellwände kann dies bewirken. Darüber hinaus können äußere Faktoren die Keimung verhindern: Klimafaktoren, Schadgase, nicht zum Wachstum geeignete Substrate, zu geringe Feuchtigkeit, ungünstiger pH-Wert, toxische Chemikalien oder andere Inhibitoren.

Grundsätzlich liegen einige wenige Labordaten für die **Dauer der Keimfähigkeit** von Sporen je nach Lagerungsbedingungen von bis zu über 20 Jahren vor.

Die **Aktivierung** kann durch physikalische oder chemische Faktoren oder eine Kombination von beiden erfolgen. So wirkt eine moderate **Temperaturerhöhung** bereits nach kurzer Zeit dahingehend, dass die Zellwandlipide und die Membranen ihren hydrophoben Charakter verlieren und durchlässig werden. Somit wird eine Verdünnung der zelleigenen Inhibitoren möglich, aber auch Proteinveränderungen, die zur erhöhten Phosphorylierung und damit zum Energiegewinn führen können, werden angegeben. Auch **Detergentien**, organische Lösungsmittel und andere Chemikalien, verschiedene Aminosäuren ebenso wie Säuren oder Alkalien können die Keimhemmung aufheben.

Das hier beschriebene **Brechen der Inaktivierung** führt jedoch nicht zwangsläufig auch zur Keimung, da diese nur dann erfolgt, wenn die Ansprüche an die Wachstumsbedingungen erfüllt sind. Für die weitere Entwicklung aktivierte Zellen können diesen Zustand für sehr lange Zeit beibehalten und dann sofort bei einsetzenden günstigen Umfeldbedingungen auskeimen.

Eine **erneute Deaktivierung** ist unter ungünstigen Umgebungsbedingungen wie z. B. Trockenheit oder Sauerstoffmangel möglich, führt aber nicht dazu, dass die einmal erreichte **Möglichkeit des Auskeimens** verloren geht. Voraussetzung hierfür ist es allerdings, dass die eigentliche Keimung – beginnend mit dem durch Wasseraufnahme induzierten Anschwellen der Sporen – noch nicht begonnen hat. Bei dann erneut einsetzenden günstigen Umfeldbedingungen kann die eigentliche Keimung innerhalb von Minuten (angegeben werden hier 10-20 Minuten) einsetzen. Hat die eigentliche Keimung, beginnend mit dem Anschwellen der Zellen durch Wasseraufnahme, einmal eingesetzt, ist ein erneutes Eintreten in die ursprüngliche Phase der Keimungshemmung jedoch nicht mehr möglich. Legt man dies zu Grunde, so erkennt man, wie sehr auch vorangegangene restauratorische Eingriffe im Zusammenhang mit Baumaßnahmen – etwa Einhausungen oder als Staubschutz angebrachte Folien – die weitere Entwicklung einer Besiedlung negativ beeinflussen können.

MTW Minimal time of wettness

Um diese grundsätzlichen **Entwicklungsschritte** mit der Situation des Schimmels am Objekt in Einklang zu bringen, erfolgten Untersuchungen zur sogenannten **minimal time of wettness (MTW)**, also der Zeitspanne, die für den eindeutigen Beginn der Keimung erforderlich ist. Dass diese Zeitspanne klimaabhängig ist, muss

vorausgesetzt werden. Die Untersuchungen erfolgten daher im Temperaturbereich zwischen 8 und 26°C bei Feuchten entsprechend 91 bis 76 % rel. F.

Die hier beurteilte Keimverhalten lässt sich nur mikroskopisch bei 200 bis 400-facher Vergrößerung beurteilen und ist daher ausschließlich makroskopisch nicht zu bewerten.

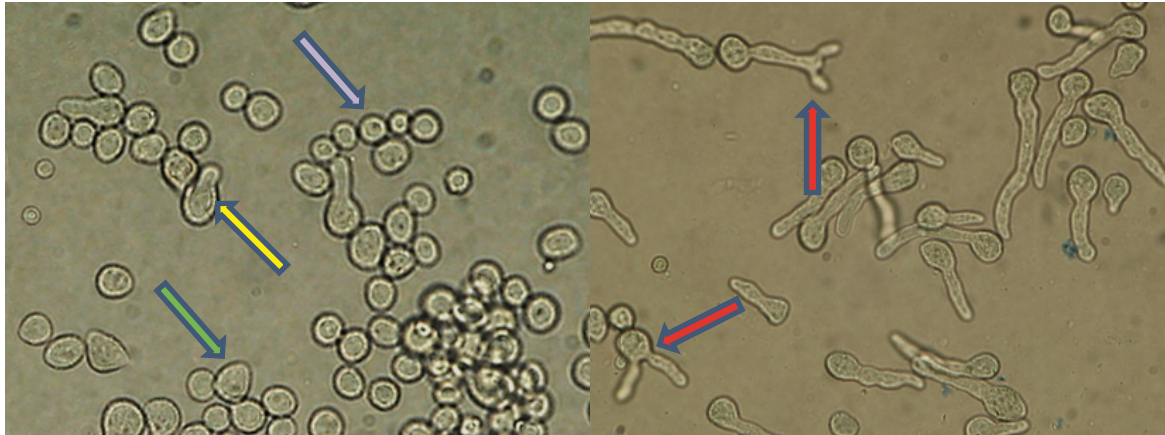


Abb. 14 Unterschiedliche Stadien der Keimung (\Leftrightarrow 10 μ m) unter dem Mikroskop, markiert durch Pfeile.

Violett: Sporen ohne Quellung, grün: beginnende Quellung, gelb: Beginnende Keimung, rot: Hyphenausbildung

Das jeweilige **Entwicklungsstadium der Keimung** in Abhängigkeit von den Kulturbedingungen wurde mikroskopisch untersucht, das Ergebnis grafisch dargestellt.

Somit kann für die im Einzelnen untersuchten Keime die Zeitspanne (in Stunden) angegeben werden, die für das Einsetzen der Keimung im Temperaturintervall von 8 bis 26°C und bei Wasseraktivitäten zwischen 0,931 und 0,765 erforderlich ist. Bei einer Temperatur von 8°C würde hier z. B. für das **Isolat aus Brauweiler** bei einer relativen Luftfeuchte von 93,1 % rel. F. (übereinstimmende Oberflächentemperatur und Lufttemperatur vorausgesetzt) nach 168 Stunden die Keimung einsetzen. Erhöht man die Temperatur auf 26°C, erfolgt die Keimung bei unveränderter Feuchtigkeit bereits nach 24 Stunden. In diesem Zeitraum wird bei deutlich geringerer relativer Feuchte von 76,5 % rel. F. im Untersuchungszeitraum von 168 Stunden bei keiner Temperatur eine Keimung erreicht. Übereinstimmende Oberflächentemperatur und Lufttemperatur vorausgesetzt, entspricht dieser Wert einer **Wasseraktivität** (aw-Wert) von 0,765.

Wird die Temperatur schrittweise auf 26 °C erhöht, so verringert sich die Zeit für das Auskeimen bereits bei 18 °C auf maximal 24 Stunden. In der Objektsituation bedeutet dies, dass bereits nach einem Tag der Beginn des Besiedlungsaufbaus einsetzen kann, sofern alle weiteren Bedingungen für das Wachstum, insbesondere Nährstoffverfügbarkeit gegeben sind.

Bei schrittweiser Verringerung der Feuchte erhöht sich die Auskeimzeit. So setzt die Keimung bei 84 % rel. F. erst bei 16 °C und erst nach 120 Stunden, bei 82 % rel. F. erst nach 144 Stunden Versuchsdauer ein. Dabei wird die Zeit für die Keimung i. d. R. mit unter gleicher Feuchte erhöhter Temperatur wiederum geringer. Eine Ausnahme sehen wir hier für die Mehrzahl aller untersuchten Isolate bei 24 °C: Im Bereich mittlerer Feuchten scheint dies die **ideale Temperatur** zu sein, da hier die geringsten Zeiten für die Auskeimung zu beobachten sind. Wird die Feuchte dann allerdings auf einen a_w -Wert von 0,822 reduziert, verringert sich die Keimdauer kontinuierlich bei steigender Feuchte und ist bei 26 °C im Untersuchungszeitraum am Kürzesten, die Optimaltemperatur von 24 °C zeigt sich also unter erhöhtem Wasserstress nicht mehr. Das bedeutet auch, dass eine zur Vermeidung von Schimmelbefall vorgenommene Temperierung des Orgelgehäuses kritisch werden könnte, wenn bei einer rel. F. von > 70 % eine Temperatur von 24°C erreicht würde. Als Zielwert einer Temperierung werden deshalb im Ergebnis des Projekts SCHIK 60% rel. F. empfohlen (siehe 2.1.7, 2.2.1, 2.2.5, 2.2.13).

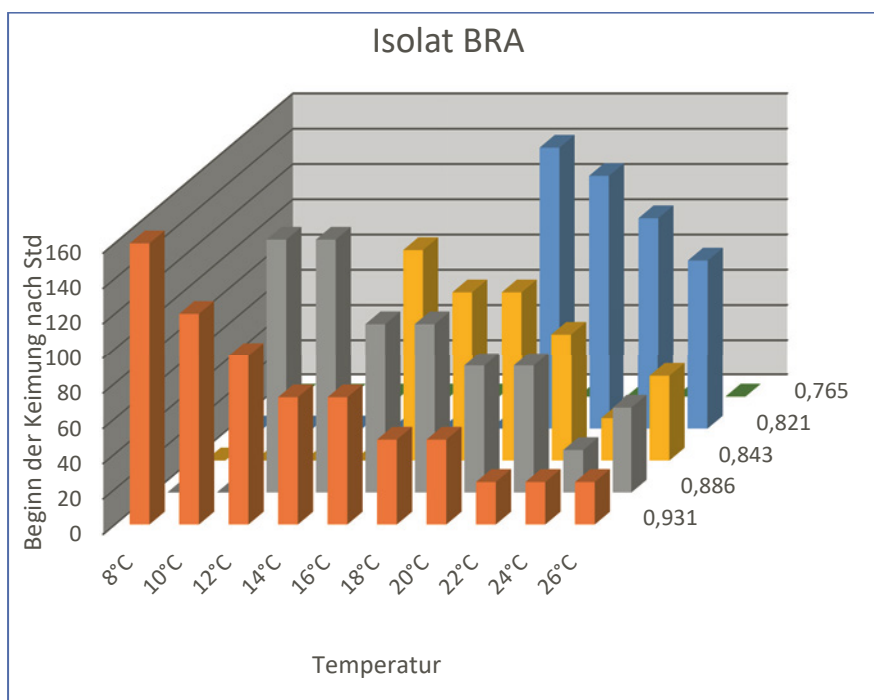


Abb. 15 Dauer (d) bis zum Einsetzen der Keimung in Abhängigkeit von Temperatur und Wasseraktivität für das Isolat aus der Abteikirche, Brauweiler. Für Klimawerte ohne Säulendarstellung erfolgte im Untersuchungszeitraum keine Keimung

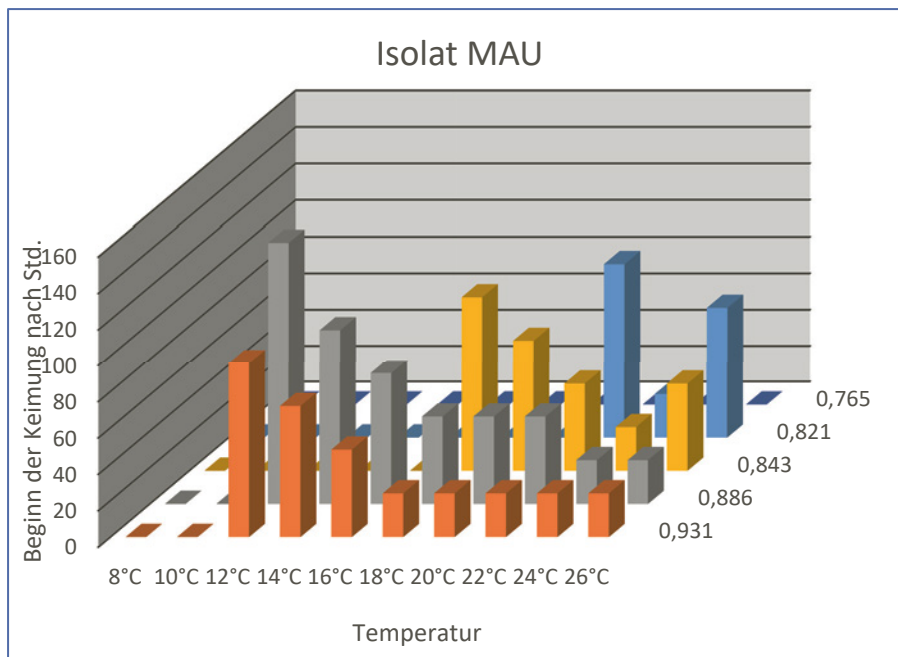


Abb. 16 Dauer (d) bis zum Einsetzen der Keimung in Abhängigkeit von Temperatur und Wasseraktivität für das Isolat aus St. Mauritius, Köln. Für Klimawerte ohne Säulendarstellung erfolgte im Untersuchungszeitraum keine Keimung

Im Vergleich dazu sehen wir für das **Isolat aus St. Mauritius, Köln**, generell im Untersuchungszeitraum (168 h) das Auskeimen erst ab einer Temperatur von 12 °C, z. B. bei 93 % rel. F. nach 96 Stunden. Ebenfalls nach 96 Stunden erfolgt die Keimung bei auf 82 % rel. F. verringerter Luftfeuchte, hier allerdings erst bei 22 °C. Bei diesem Isolat zeigt sich jedoch durchgehend das **Temperaturoptimum** für die Keimung bei 24 °C.

Die Untersuchungen erfolgten für insgesamt für 18 Isolate bei 11 Temperaturstufen und für 5 unterschiedliche Feuchten und wurden täglich mikroskopisch ausgewertet. Die erzielten Daten könnten in erweiterte Simulationsberechnungen (siehe Pkt. 2.1.6) einfließen.

Durch das Quellen der Zellen, das je nach Temperatur und Feuchteangebot mehr oder weniger Zeit in Anspruch nimmt, wird der Stoffwechsel aktiviert und die Zellwand aufgerissen, was dann zunächst die Ausbildung des Keimschlauchs und die anschließende Hyphenbildung einleitet. Diese ersten Entwicklungsschritte sind jedoch nur unter mikroskopischer Vergrößerung zu beobachten.

Mit diesen Werten kann ein auch kurzfristiges Einsetzen veränderter Klimabedingungen in der Auswirkung auf die Besiedlung vorhergesagt werden, sodass die erforderlichen Maßnahmen zur Klimastabilisierung zu präzisieren sind.

Ausgehend von diesen Ergebnissen dürften die an einigen Orgeln gemachten Beobachtungen erklärlich sein: In Köln, St. Maria Lyskirchen, und Karlsruhe wurde während der Projektlaufzeit kein Schimmelbefall beobachtet, obwohl dort laut Simulation hin und wieder Wachstumsbedingungen herrschten. Offenbar waren die Wachstumsvoraussetzungen in diesen Fällen weder ausreichend lang, noch ausreichend häufig gegeben, sodass es nicht zur Keimung kam. In derartigen Fällen wäre zunächst nichts weiter zu tun, als das Klimamonitoring fortzusetzen und regelmäßig (einmal pro Jahr) die Orgel auf ein Schimmelwachstum in Augenschein zu nehmen (siehe Pkt. 2.1.7, hier insbesondere die Auswertung der Diagramme für Karlsruhe, Köln, Maria Lyskirchen, Schöppenstedt und Berge; auch Pkt. 2.2.13).

2.1.6 Simulationsberechnungen zu den Ursachen und Behandlungsmöglichkeiten von Schimmel in Orgeln

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln in Mitteldeutschland (OSCHI)“ waren die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf das Schimmelwachstum abzuschätzen. In diesem Zusammenhang wurden durch an Referenzobjekten, sogenannten Vertiefungsfällen, die aus 50 vorab untersuchten Kirchen ausgewählt worden waren, mikrobiologische Proben entnommen. Unter Laborbedingungen erfolgten im Anschluss Anzuchtversuche an diesen Proben in Abhängigkeit von 11 Temperaturstufen zwischen 6°C und 26°C sowie in bis zu 16 Abstufungen der relativen Luftfeuchte zwischen 72% rel. F. und 99% rel. Feuchte. Insgesamt wurden im Projekt OSCHI sowie im Folgeprojekt SCHIK an 18 Objekten mikrobiologische Isolate gewonnen und pro Organismus an 84 bis 176 Einzelanzuchten (geimpfte Nährböden) die vom Umgebungsklima abhängigen **Wachstumsbedingungen der Mikroorganismen** erforscht.

Im Rahmen dieser sehr aufwendigen Analysearbeit erfolgten insgesamt 2064 Anzuchtproben, deren Ergebnis die Ermittlung eines messbaren Koloniewachstums in Abhängigkeit von der umgebenden konstanten Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit war. Bedingt durch die Größe der verwendeten Petrischalen konnte das messbare Koloniewachstum zwischen keinem Wachstum, also einem Wert von 0 mm, und einer Maximalausdehnung von 70 mm schwanken (siehe Abb. 17).

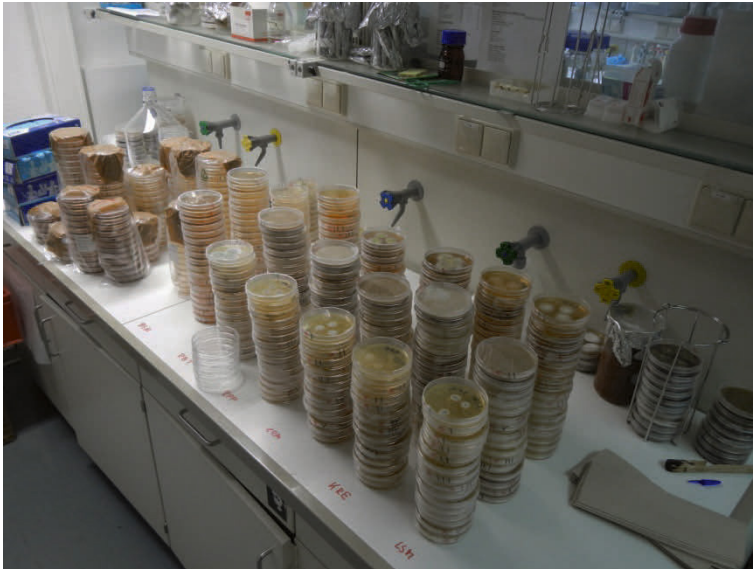


Abb. 17
Herstellung und Auswertung von über 2000 Anzuchtproben unter Laborbedingungen

Für die digitale Auswertung bestand nun die Aufgabe, den in den untersuchten Orgelgehäusen meist stündlich erfassten „realen“ **Werten der Lufttemperatur** und **relativen Luftfeuchte** die unter Laborbedingungen ermittelten „idealen“ Wachstumsdaten der jeweils nachgewiesenen Mikroorganismen zuzuordnen. Die mikrobiologischen Laborergebnisse wurden mit Erfahrungswerten aus der Praxis vor Ort in Einklang gebracht, indem durch die Mikrobiologen ein **Korrekturwert von 10% rel. Feuchte** vorgegeben wurde. Um diesen Wert wurden die in den Objekten gemessenen Raumklimadaten reduziert. Der Korrekturwert basiert auf der Beobachtung, dass in den Kirchen die Schimmelbildung früher einsetzt als im Labor. Dieses Phänomen wird mit zusätzlichen Feuchtigkeitsschwankungen erklärt, die aus den Sorptionseigenschaften der Materialien der Orgel und der umgebenden Bauhüllen im Sinne von sogenannten **Feuchtigkeitsquellen** oder **-senken** herrühren. Unter Feuchtigkeitsquelle wird hier ein Material verstanden, das Feuchtigkeit in die Raumluft abgibt, unter Feuchtigkeitssenke ein Material, das Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnimmt.

Im Ergebnis entstand eine Korrelation zwischen den **Raumklimabedingungen** und den mikrobiologischen **Wachstumsbedingungen** der jeweils nachgewiesenen Organismen. Damit sind Rückschlüsse auf die Zeiträume im Jahresverlauf möglich, in denen gute bis sehr gute Wachstumsbedingungen für die Mikroorganismen und damit für das Schimmelwachstum herrschen. Im Diagramm werden diese Zeiten durch die roten Koloniedurchmesser markiert (siehe Abb. 18). Das Maß des Koloniedurchmessers ist jeweils am linken Rand des Diagramms angegeben, rechts die Temperatur (unten) und die rel. Luftfeuchte (oben).

Objektbezeichnung: Reichenbach Trinitatis
Auswahl der Organismusnummer: 6
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.: 0
Hysteresewert: 0
Simulation Temperierung in K (Änderung rel. Feuchte): 0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.: 0
Simulation Temperatur in K: 0

Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSI	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit; markierte Zellen)

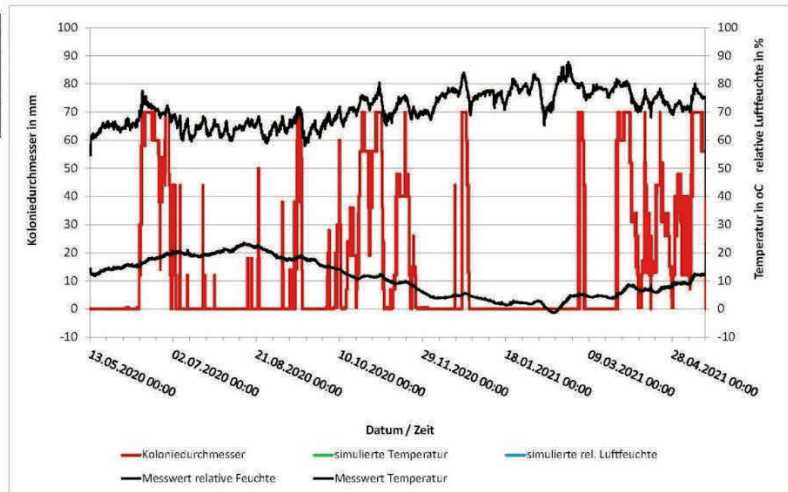


Abb. 18 Reichenbach Trinitatiskirche, Korrelation der Raumklimaaufzeichnungen [schwarz] aus der Orgel der Kirche mit den mikrobiologischen Wachstumsbedingungen [rot]. (Ohne Belang für die Simulation ist der Umstand, dass die Heizung während der Beobachtungszeit ausgefallen war).

Das im Vorgängerprojekt OSCHI entwickelte Simulationsprogramm ermöglichte auch die Abschätzung der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen, wie sie vor Jahrzehnten bei 1K bis 2K geringeren Jahresmitteltemperaturen sowie, bedingt durch mehr Eistage im Winter, bei geringeren Werten der relativen Raumluftfeuchte vorgelegen haben. Die Simulation gibt einen plausiblen Hinweis darauf, dass sich allein aus raumklimatischer Sicht die Wachstumsbedingungen für das Schimmelwachstum im historischen **Rückblick** deutlich verbessert haben, was den in den letzten Jahrzehnten vermehrt beobachteten Schimmelbefall zumindest zu einem großen Teil erklärt.⁵ Aus den Untersuchungsergebnissen des ersten Forschungsprojektes zu den Ursachen des vermehrten Schimmelbefalls an Orgeln (OSCHI) ließ sich sehr eindeutig der Einfluss des umgebenden Raumklimas als ein wesentlicher Faktor ableiten (siehe Abb. 19).

⁵ Zu weiteren Ursachen, etwa der heute gegenüber früher „saubereren Luft“ durch die starke Reduktion von Schwefel- und Schwermetallemissionen siehe den Abschlussbericht zum Projekt OSCHI.

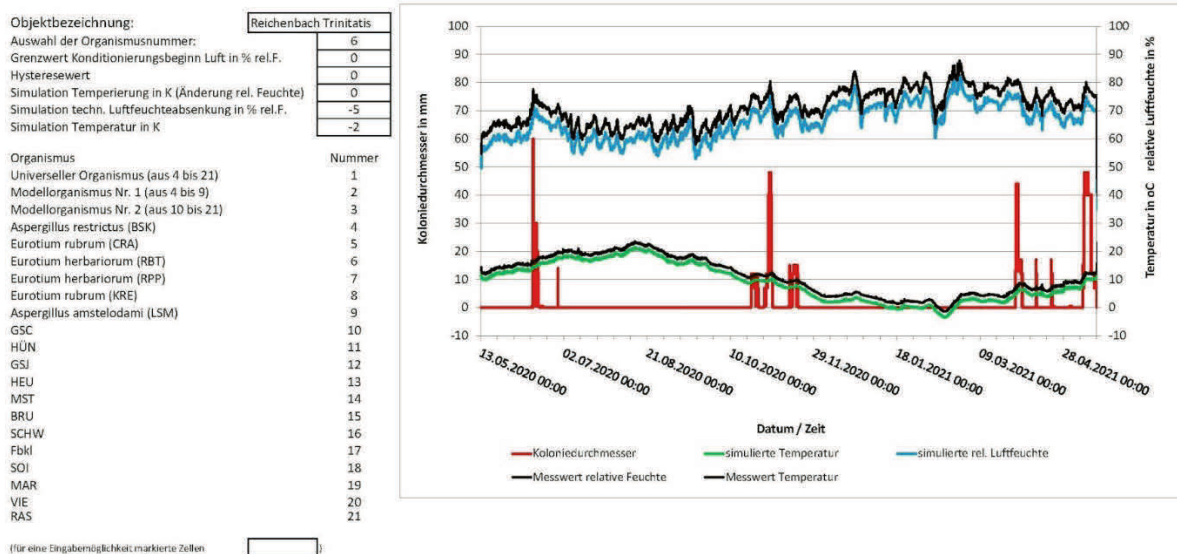


Abb. 19 Reichenbach Trinitatiskirche, Simulation eines raumklimatischen Rückblicks auf Raumklimabedingungen mit 2K und 5% rel. F. niedrigeren Umgebungsbedingungen und deren Auswirkung auf die stark reduzierten mikrobiologischen Wachstumsbedingungen [rot].

Das nun abgeschlossene Projekt „Schimmelbefall an Orgeln in Kirchenräumen – Entwicklung und Erprobung von Strategien zur Prävention und Bekämpfung (SCHIK)“ erforschte die technischen Möglichkeiten zur Minderung und im besten Fall Verhinderung des Schimmelwachstums.

Es war naheliegend, sich mit den **Möglichkeiten der raumklimatischen Beeinflussung** der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen in den Orgeln zu beschäftigen, um so das Schimmelwachstum zu hemmen. Für die Überprüfung praktizierter Lösungsansätze oder die Erprobung neuer oder wenig bekannter Technologien war erneut ein Instrument zur Bewertung im Sinne eines Simulationsprogrammes notwendig, das eine **Abschätzung der Wirksamkeit** dieser Methoden erlaubt. Entsprechend dieser Anforderung wurde, aufbauend auf dem Simulationsprogramm zur Ursachenforschung, eine Programmerweiterung entwickelt, die neben den Analysen zur Ursachenforschung die Simulation der Wirkung raumklimatischer Veränderungen auf das mikrobiologische Wachstum ermöglicht. Dies beinhaltet erweiterte Simulationsmöglichkeiten zur Auswirkung passiver wie auch aktiver raumklimatischer Veränderungen auf das mikrobiologische Wachstum.

Aus den mikrobiologischen Laboruntersuchungen ließ sich ableiten, dass die **Wasserverfügbarkeit** und, daraus abgeleitet, die relative Raumluftfeuchte sowie die Umgebungstemperatur Einfluss auf das mikrobiologische Wachstum haben (siehe

2.1.5). Die absolute Raumlufffeuchte besitzt dagegen in Abhängigkeit von der Temperatur nur indirekten Einfluss.

Die mikrobiologischen Analysen der an den untersuchten Orgeln entnommenen Proben wiesen zudem einen Befall mit einer beschränkten Anzahl wiederkehrender aktiver Organismen nach. Entscheidend für die Bewertung des Befalls und zu ergreifende Gegenmaßnahmen ist der Nachweis der tatsächlich aktiven Organismen unter den an der konkreten Orgel vorherrschenden Klimabedingungen und nicht die übergroße Vielzahl aller theoretisch keimfähigen Mikroorganismen im Objekt.

Das Simulationsprogramm erlaubt sowohl die Beurteilung der Wachstumsbedingungen in einer Orgel an Hand der konkret erfassten **Raumklimadaten** über einen, besser aber mehrere **Jahresverläufe** hinweg, als auch die des konkreten, in der Orgel bestimmten Organismus. Für den Fall, dass für die betrachtete Orgel noch keine mikrobiologische Bestimmung des vorhandenen Schimmelbefalls stattgefunden hat, oder allein eine Gefährdungsanalyse ohne bereits vorhandenen Schimmelbefall erfolgen soll, ermöglicht das Simulationsprogramm die Annahme eines mikrobiologischen **Modellorganismus**, dessen Wachstumseigenschaften sich aus den Eigenschaften der bisher 2064 Anzuchtproben ableitet. Vergleiche zwischen den Simulationsergebnissen auf der Basis der für eine konkrete Orgel bestimmten aktiven Organismen mit den Ergebnissen auf der Basis des Modellorganismus weisen aber in einigen Fällen erhebliche Unterschiede auf. Aus diesem Grund ist es für die Festlegung einer Behandlungsstrategie für eine mit Schimmel belastete Orgel besser, den konkreten Organismus zu bestimmen, um ihn zumindest einer Organismengruppe genauer zuordnen zu können.

Andererseits führt die Anwendung eines Modellorganismus, der alle ungünstigen Eigenschaften aller bisher an Orgeln angetroffenen und untersuchten aktiven Organismen beinhaltet, zwar im konkreten Simulationsfall zu unschärferen Ergebnissen aber auch zu einer höheren Sicherheit hinsichtlich der Bandbreite der möglichen Wachstumsbedingungen der aktiven Mikroorganismen.

Der aktuelle Stand des Simulationsprogrammes basiert wiederum auf einer Excel-Anwendung, die jedem zeitlichen Messpunkt der relativen Raumlufffeuchte und Raumlufftemperatur die Wachstumsbedingungen des konkret nachgewiesenen aktiven Mikroorganismus bzw. des Modellorganismus zuordnet.

Im Rahmen der Simulation ist es in Abhängigkeit von den konkreten Messwerten der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur möglich, diese um festzulegende Größen der relativen Luftfeuchte und Temperatur zu erhöhen oder abzusenken. Die simulierten Ergebnisse – die Auswirkung auf die raumklimatischen Größen der relativen Luftfeuchte und Temperatur, aber auch die veränderten mikrobiologischen Wachstumsbedingungen – werden parallel zu den konkret gemessenen Klimamessdaten grafisch dargestellt (siehe Abb. 20). Dadurch können die Auswirkungen nachgewiesener Klimaveränderungen aus der Vergangenheit oder prognostizierte Klimaentwicklungen der Zukunft auf ihre Auswirkungen hinsichtlich der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen abgeschätzt werden. Bisher berücksichtigt das Simulationsprogramm noch keine zusätzlichen Feuchtigkeitsschwankungen aus den Sorptionseigenschaften der Materialien der Orgel und der umgebenden Bauhülle im Sinne von sogenannten Feuchtequellen oder Feuchtesenken. Diese Programmidee und -struktur könnte in vorhandene Gebäudesimulationsprogramme integriert werden.

Neu ist bei dem aktuellen Stand des Simulationsprogrammes die Möglichkeit, **Grenzwerte der relativen Raumlufffeuchte** mit einer konservatorisch zu vereinbarenden Schwankungsbreite, technisch bezeichnet als **Hysterese**, festzulegen, ab der eine simulierte Konditionierung der relativen Raumlufffeuchte erfolgen soll. Dies ist durch eine angenommene technische Luftentfeuchtung oder eine Temperierung der Raumlufft sowie durch die Kombination beider Einflussfaktoren möglich, indem zum Beispiel im Sommer technisch entfeuchtet und im Winter temperiert wird (siehe 2.2.1, 2.2.5). Dazu wird dem Programm eine zu simulierende Erhöhung der Raumlufftemperatur in Kelvin (K) im Sinne einer Raumlufftemperierung bzw. die Zuschaltung einer technischen Luftentfeuchtung als Wert -100% rel. Feuchte vorgegeben. Die Werteeingabe von -100% rel. Feuchte ist hierbei eine programmtechnische Vorgabe, die nicht zu einer Feuchtigkeitsabsenkung um 100% rel. Feuchte führt, sondern beschreibt, dass ein technischer Luftentfeuchter mit voller Leistung (Einstellung MAX) bis zum unteren Grenzwert, der durch den Hysteresewert festgelegt wird, zum Einsatz kommt.

Im Ergebnis werden der in der Simulation veränderten relativen Raumlufffeuchte und Raumlufftemperatur die entsprechenden mikrobiologischen Wachstumsbedingungen zugeordnet. Aus dem Vergleich der real vorhandenen Situation mit den in der

Simulation veränderten mikrobiologischen Wachstumsbedingungen ergibt sich eine Aussage über die zu erwartende Tendenz der Entwicklung aller Parameter.

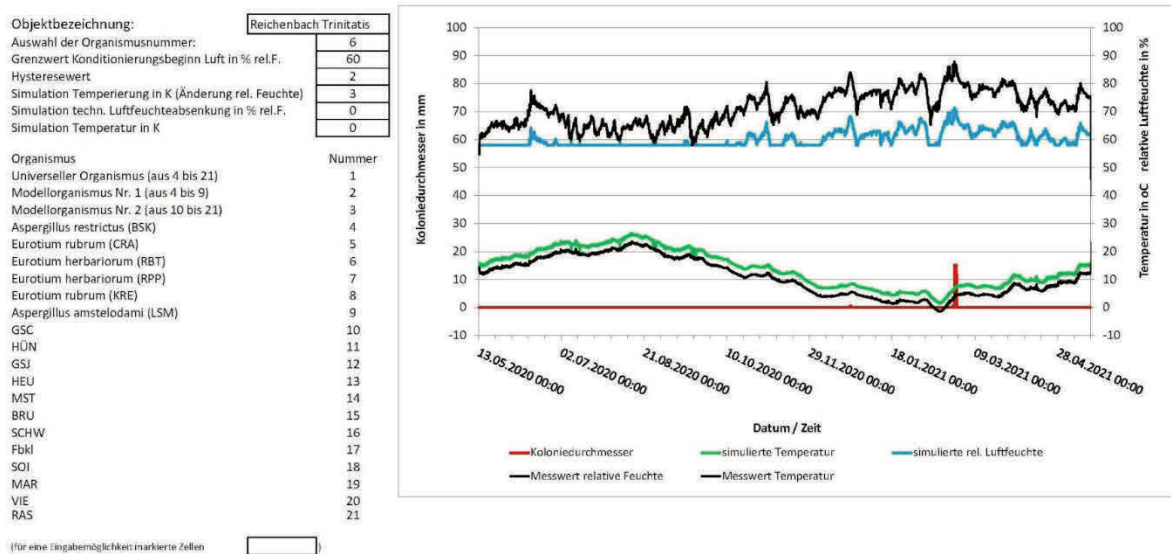


Abb. 20 Reichenbach Trinitatiskirche, Simulation einer leichten Erwärmung der Raumluft im Orgelgehäuse um 3 K, wenn die relative Luftfeuchte den Grenzwert von 60% rel. F. übersteigt. Dies führt zu einer Absenkung der relativen Raumluftfeuchte [blau] und damit zu einer deutlichen Verschlechterung der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen [rot].

Mit dem Simulationsprogramm besteht zusätzlich die Möglichkeit, den **Energieverbrauch** des jeweils gewählten Luftkonditionierungsverfahrens grob abzuschätzen.⁶ Je nach Größe und den Umgebungsbedingungen können auf der Grundlage von Erfahrungswerten die Anschlussdaten für eine technische Luftentfeuchtung bzw. eine Lufttemperierung eingegeben werden. Auf der Basis der aus den realen Raumklimamessdaten durch das Simulationsprogramm ermittelten Schaltzeiten werden die notwendigen Betriebszeiten für die technische Luftentfeuchtung oder die Lufttemperierung hochgerechnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Hochrechnungen umso genauer werden, je kürzer die Zeitabschnitte der Raumklimateaufzeichnung sind.

Da es sich bei den Orgelgehäusen um räumlich **offene Systeme** handelt, bleibt eine Berechnung zur Auslegung einer technischen Luftentfeuchtung bzw. einer Raumlufttemperierung für ein Orgelgehäuse dennoch schwierig. Grundsätzlich sollten sich dazu aber Gebäudesimulationsprogramme eignen. Aus rein praktischer Sicht ergibt sich aber auch die Möglichkeit der **empirischen Ermittlung** der notwendigen Anschlussdaten durch den probeweisen Einsatz mobiler Geräte für die Steuerung der

⁶ Siehe zu den realen Energieverbräuchen an den Testobjekten 2.2.6.

Raumlufttemperierung und der technischen Luftentfeuchtung. Durch das Austesten verschiedener Leistungsstufen der Geräte ist es möglich, den Leistungsbedarf sowie die Aufstellung der Geräte für eine gleichmäßige Wirkung in der Orgel festzulegen. Im Ergebnis dieser praktischen Erprobung und Anpassung könnte dann eine stationäre Installation der Geräte erfolgen. Die mobile Erprobungseinheit stünde danach für Vorversuche in weiteren Orgeln zur Verfügung. Dieser empirische Ansatz bietet sich für große Liegenschaftsverwaltungen, die Landeskirchen, Bistümer, Firmen sowie Planungsbüros an, die sich an einer Vielzahl von Bauwerken mit dieser Problematik beschäftigen.

2.1.7 Ergebnisse der mikrobiologischen und raumklimatischen

Untersuchungen an Referenzobjekten in Verbindung mit einer

Bewertung der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen:

Interpretation der Klimawerte und simulierten Wachstumsbedingungen

Zu Projektbeginn wurden die meisten Referenzobjekte mit eigenen **Datenloggern** ausgestattet. In einigen Fällen konnten Klimadaten genutzt werden, die seitens der Errichter der Heizungs- (und ggf. Lüftungs-) Anlage oder der Gemeinde erhoben und aufgezeichnet wurden/werden. In der Regel wurde je ein Datenlogger im Kirchenschiff (möglichst in Raummitte), einer in der Orgel und einer außen auf der Nordseite des Gebäudes angebracht.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Erfassung der maßgeblichen Außen- und Raumklimadaten ist die aufgabenbezogene Auswahl der **Messpunkte** sowie der Einsatz **qualitativ angemessener und kalibrierter Messtechnik**. Die Erfahrung zeigt, dass es trotz eines erheblichen Betreuungsaufwandes sonst zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen kommen kann. Wenn sich herausstellt, dass die Messgeräte nicht genau kalibriert („geeicht“) waren, sind die Daten im Zweifelsfall unbrauchbar und zu verwerfen. Die Erhebung genauer Messdaten ist die unabdingbare Voraussetzung für die Simulation der Wachstumsbedingungen und die Ableitung von Eingriffsmöglichkeiten.

Im **Untersuchungszeitraum** zeigten sich bei der Simulation der Wachstumsbedingungen Unterschiede: In einigen Fällen traten eher selten, in anderen eher häufig Luftfeuchte- und Temperaturverhältnisse ein, die einen Befall begünstigen, so waren z. B. in Rasdorf eher selten, in Geseke eher häufig Wachstumsbedingungen gegeben.

Objektbezeichnung:	Rasdorf 1
Auswahl der Organismusnummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	0
Simulation Temperierung in K (Änderung rel. Feuchte)	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Simulation Temperatur in K	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

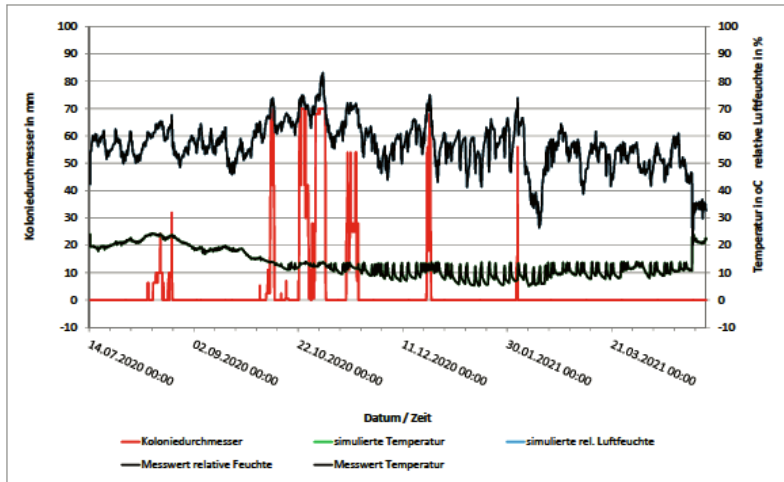


Abb. 21 Klimadiagramm für die Kirche in Rasdorf mit den simulierten Wachstumsbedingungen zwischen Mitte Juli 2020 und Mitte Mai 2021. Die untere schwarze Kurve gibt die gemessene Raumtemperatur an, die obere die relative Luftfeuchte (rel. F.). Rot dargestellt sind die simulierten Wachstumsbedingungen: je höher der Ausschlag (d.h. je größer der Koloniedurchmesser), desto besser sind die Voraussetzungen für ein Pilzwachstum. Im Sommer und Winter 2020 wurden nur recht selten Luftfeuchtwerte über 60% rel. F. erreicht, im „Corona-Winter“ 2020/21 sank die Temperatur zeitweise auf um die 5°C und lag maximal bei 14°C. Kritische Bedingungen herrschten kurzzeitig im Sommer bei hohen Temperaturen (> 20°C) und hoher Luftfeuchte (> 60 % rel. F.) und im Herbst bei hoher Luftfeuchte (> 70% rel. F.).

Objektbezeichnung:	Geseke 1
Auswahl der Organismusnummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	0
Simulation Temperierung in K	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

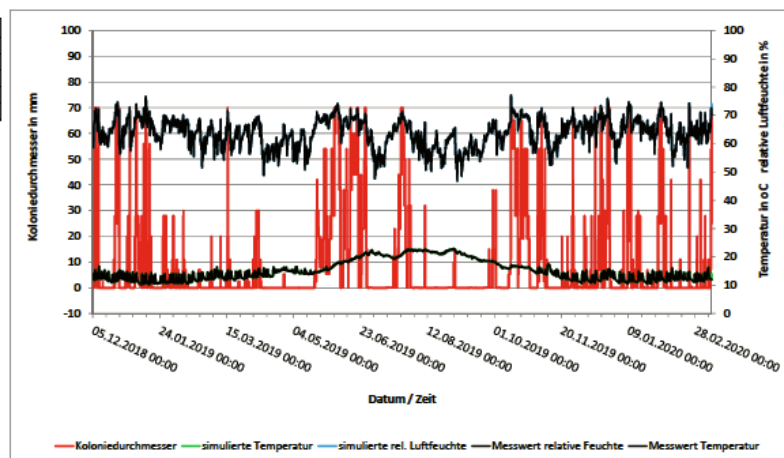


Abb. 22 Klimadiagramm für St. Cyriacus in Geseke mit den simulierten Wachstumsbedingungen im Zeitraum Dezember 2018 bis Februar 2020. Im Vergleich zur Situation in Rasdorf ist leicht zu erkennen, dass hier häufiger gute Wachstumsbedingungen gegeben waren. Die relative Luftfeuchte lag selten unter 60% rel. F., die Temperatur auch im Winter über 12°C.

Auch die absoluten Werte unterschieden sich teilweise stark. In der **Christuskirche Karlsruhe** wurde ein sehr trockenes Klima angetroffen, in **Geseke** ein sehr feuchtes.⁷

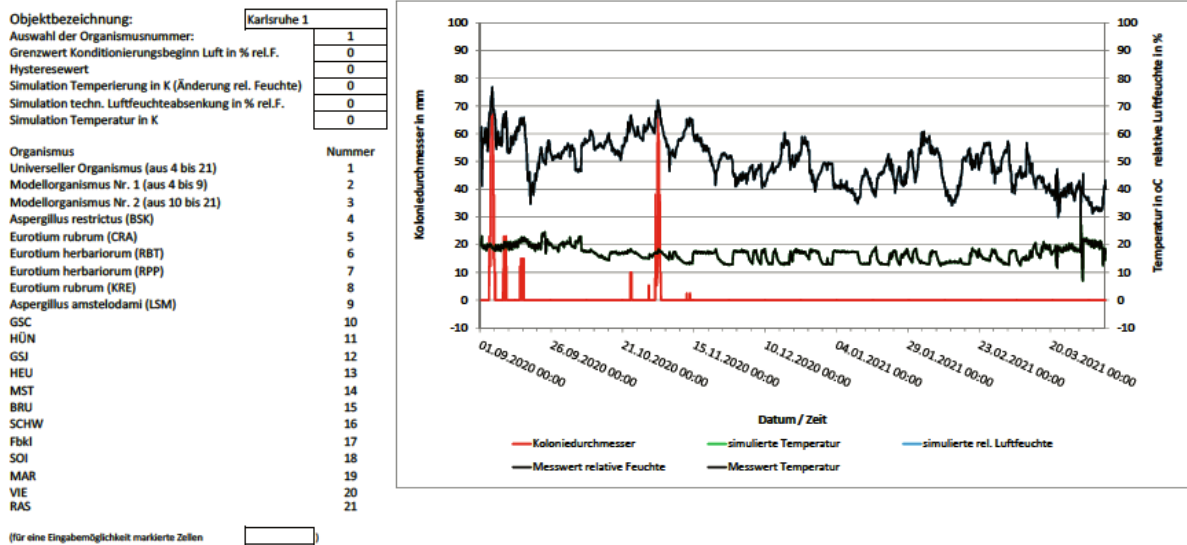


Abb. 23 Klimadiagramm für die Christuskirche in Karlsruhe mit den simulierten Wachstumsbedingungen. Die relative Luftfeuchte erreicht selten Werte über 60% rel. F., sie liegt häufig unter 50% rel. F., die Temperatur liegt im Winter fast immer über 12°C.

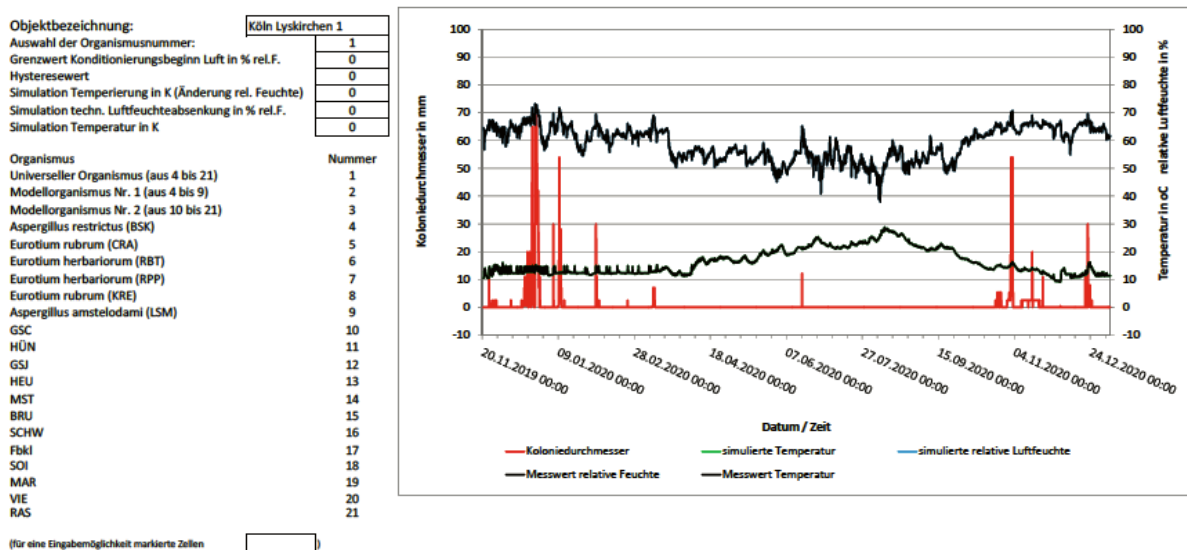


Abb. 24 Klimadiagramm für St. Maria Lyskirchen in Köln mit den simulierten Wachstumsbedingungen. Gute Wachstumsbedingungen herrschen nur an wenigen Tagen des Jahres (im Winter).

⁷ Im Vergleich der Klimadaten aus der Orgel und dem Kirchenschiff der Christuskirche Karlsruhe zeigt sich, dass es bei gleicher Temperatur im Kirchenschiff tendenziell trockener ist als in der Orgel, weshalb davon auszugehen ist, dass das trockenere Kirchenschiff zu einer Trocknung der Orgel beiträgt (siehe Abb. 55). Dies bestätigt auch eine Gegenüberstellung der Werte der absoluten Luftfeuchte aus der Orgel und dem Kirchenschiff (siehe Abb. 58). Der weitgehend parallele Verlauf beider Feuchte-Kurven/ aller vier Kurven deutet auf eine gemeinsame Steuerung beider Heizsysteme.

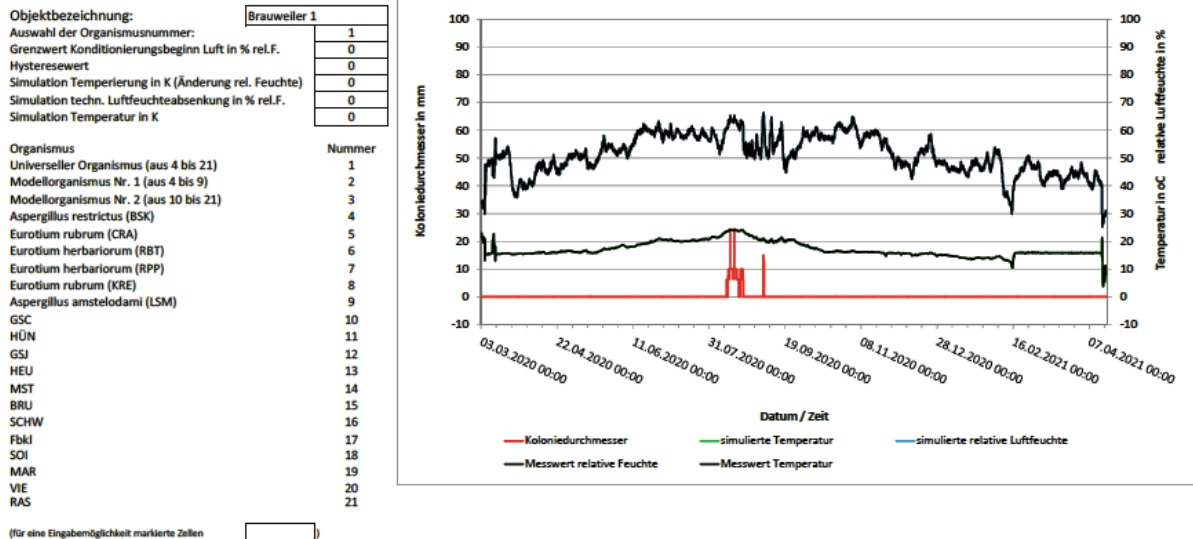


Abb. 25 Klimadiagramm für die Kirche der Abtei Brauweiler mit den simulierten Wachstumsbedingungen. Gute Wachstumsbedingungen herrschen nur an wenigen Tagen des Jahres (im Sommer).

Teilweise bestanden **nur saisonal** oder sogar **nur punktuell Wachstumsbedingungen**, so in Köln, Maria Lyskirchen, Brauweiler, Schöppenstedt, Karlsruhe und Scharfenberg, weshalb hier vorerst keine Veranlassung besteht einzugreifen.⁸

In Scharfenberg, wo ein größerer Einfluss der Außenluft auf das Klima im Kirchenraum vermutet wird, könnte ausprobiert werden, wie sich eine Temperierung der Orgel um + 1K im Sommer auswirkt (siehe unten).

In Bruchhausen zeigte sich, dass zumindest in dem relativ trockenen Sommer 2018 die Häufigkeit der Tage mit guten Wachstumsbedingungen gegenüber dem Sommer 2017 signifikant reduziert werden konnte, indem konsequent und zielgerichtet gemäß „Lüftungsampel“ gelüftet wurde. Obwohl die Kirche in Bruchhausen nur über wenige kleine Fenster verfügt, die dazu genutzt werden können, gelang hier offenbar die Abfuhr von Luftfeuchtigkeit nach außen.⁹ Ob dieses während einer niederschlagsarmen Phase erreichte Ergebnis den Einbau einer automatischen Lüftung, also den entsprechenden Umbau der Fenster und die Installation der zugehörigen Steuerung, rechtfertigt, sollte dennoch wohl überlegt werden (siehe unten: Einfluss der automatischen Lüftung in Berge und Geseke).

⁸ In Schöppenstedt wurden die Heizung und Lüftung optimiert, in Karlsruhe hinter der Orgel eine Wandheizung installiert, siehe 2.2.12.

⁹ Inzwischen (2020) wurde in Bruchhausen mittels einer Drainage auch die vermutlich früher bestehende Zufuhr von Feuchtigkeit aus dem Erdreich bzw. aus oberflächennah anfallendem Wasser reduziert.

Objektbezeichnung:	Bruchhausen 1
Auswahl der Organismusnummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	0
Simulation Temperierung in K	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

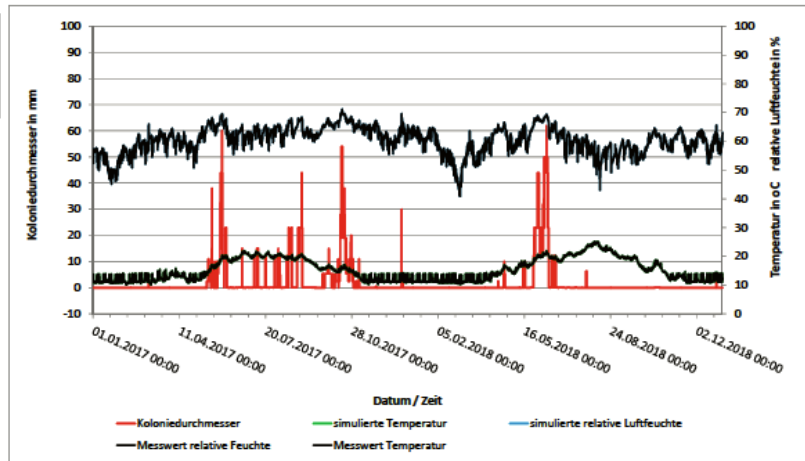


Abb. 26 Klimadiagramm für die Kirche in Bruchhausen mit den simulierten Wachstumsbedingungen 2017/18. Gute Wachstumsbedingungen herrschen im Sommer 2017 bei Temperaturen über 18°C und Luftfeuchtwerten über 60% rel. F.; 2018 wurden niedrigere Feuchtwerte gemessen als 2017, die Wachstumsbedingungen verschlechterten sich. Offenbar konnte im trockenen Sommer 2018 Feuchtigkeit aus dem Kirchenraum abgeführt werden.

Objektbezeichnung:	Köln Mauritius 1
Auswahl der Organismusnummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	2
Simulation Temperierung in K (Änderung rel. Feuchte)	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Simulation Temperatur in K	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

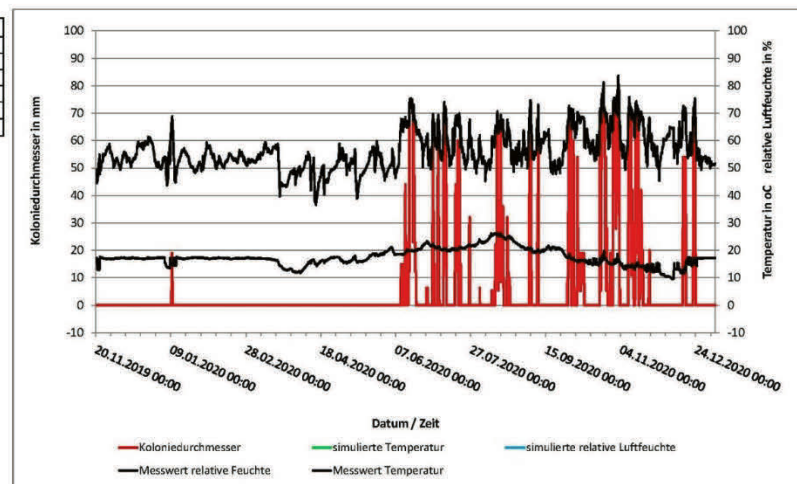


Abb. 27 Klimadiagramm für St. Mauritius in Köln mit den simulierten Wachstumsbedingungen. Mit dem signifikanten Ansteigen der relativen Luftfeuchte im Juni 2020 auf Werte über 60% rel. F. verbesserten sich die Wachstumsbedingungen sprunghaft, da auch die Temperatur anstieg und zumeist Werte über 15°C herrschten. Von November 2019 bis Mitte März 2020 lag die Raumtemperatur in Folge einer kontinuierlichen Beheizung konstant bei 18°C, während sie im November und Dezember 2020 schwankte und zweitweise auf 10°C sank.

An dieser Stelle müssen mögliche **Störgrößen** benannt werden.

In den meisten Fällen lagen Klimadaten lediglich für einen Jahresgang vor, auch könnte der Aussagewert durch die beiden aufeinander folgenden trockenen Jahre (2018/19 bzw. 2019/2020) beeinträchtigt sein.

Das Diagramm für **Köln, St. Mauritius** (Abb. 27) lässt vermuten, dass im „Corona-Winter“ 2020 weniger kontinuierlich als 2019 geheizt wurde, weshalb sich ein sehr deutlicher Unterschied hinsichtlich der Wachstumsbedingungen zwischen November 2019 und Juni 2020 einerseits und September 2020 bis Dezember 2020 zeigt. Die Temperatur- und Feuchtwerte legen die Vermutung nahe, dass auf die verhältnismäßig hohe Grundtemperierung verzichtet und nur zum Gottesdienst geheizt wurde.

Der Vergleich der im Rahmen des Langzeitmonitorings im **Dom zu Halle** (Saale) erhobenen Daten und der darauf basierenden Simulationen zeigt, dass im gegenüber 2020 feuchteren Jahr 2021 häufiger Wachstumsbedingungen herrschten als im Jahr zuvor.

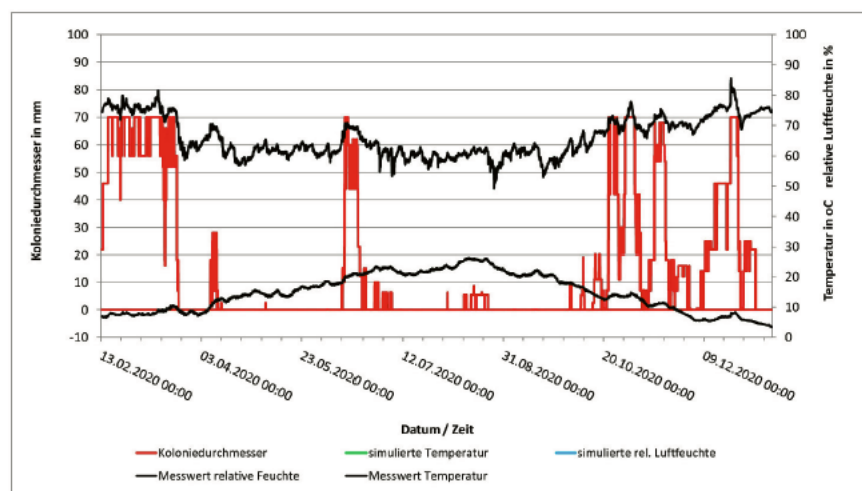


Abb. 28 Halle (Saale), Dom: Simulation der Wachstumsbedingungen auf der Basis der 2020 ermittelten Raumklimawerte

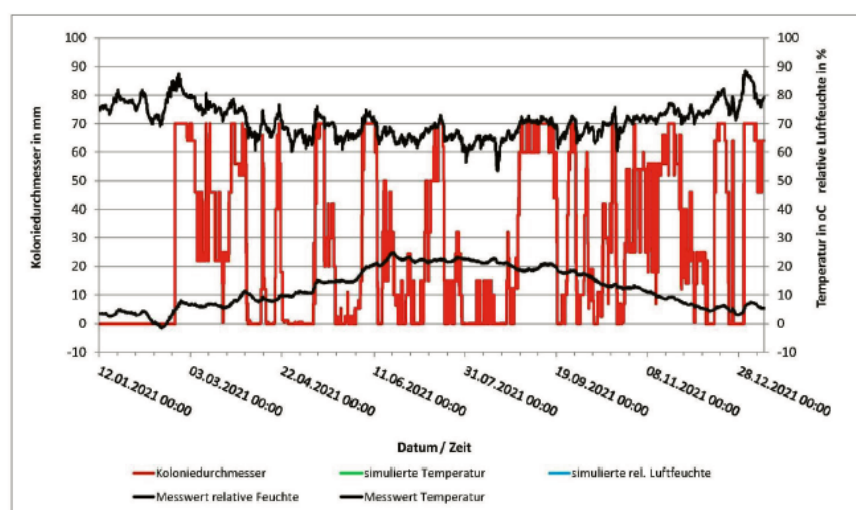


Abb. 29 Halle (Saale), Dom: Simulation der Wachstumsbedingungen auf der Basis der 2021 ermittelten Raumklimawerte

Aus der Bausubstanz bzw. **aus den Materialien der Orgel aktivierte Feuchtigkeit** wird bei der Simulation bisher nicht exakt berücksichtigt (vgl. 2.1.5 und 2.1.6). Dieser Feuchtigkeitseintrag könnte die Ursache dafür sein, dass an vielen Objekten bei niedrigeren Werten der rel. Luftfeuchte Schimmelbildung auftritt, als sie unter Laborbedingungen beobachtet wurde. Bislang werden von den Autoren dieses Berichts deshalb pauschal 10 % rel. F. zugeschlagen, d.h. es wird angenommen, dass es beispielsweise nicht bei 70% rel. F. zu Schimmelwachstum kommt, sondern bereits bei 60%. rel. F. Dieser Sicherheitsaufschlag könnte in einem Folgeprojekt durch zusätzliche Untersuchungen präzisiert werden, bietet aber andererseits auch in durchgängig feuchteren Jahren eine gewisse Sicherheit.

Vermutet wurde in einigen Fällen (Geseke, Brauweiler, Köln, Mauritius, Bad Berka) ein **Einfluss von zu feuchter Außenluft**, die durch Lüftungsschächte oder/und undichte Fenster in den Kirchenraum gelangen könnte. In diesem Zusammenhang wurde auch untersucht, ob über im Fußboden geführte Heizungsschächte Kondenswasser oder Erdfeuchte in die Innenraumluft transportiert wird.

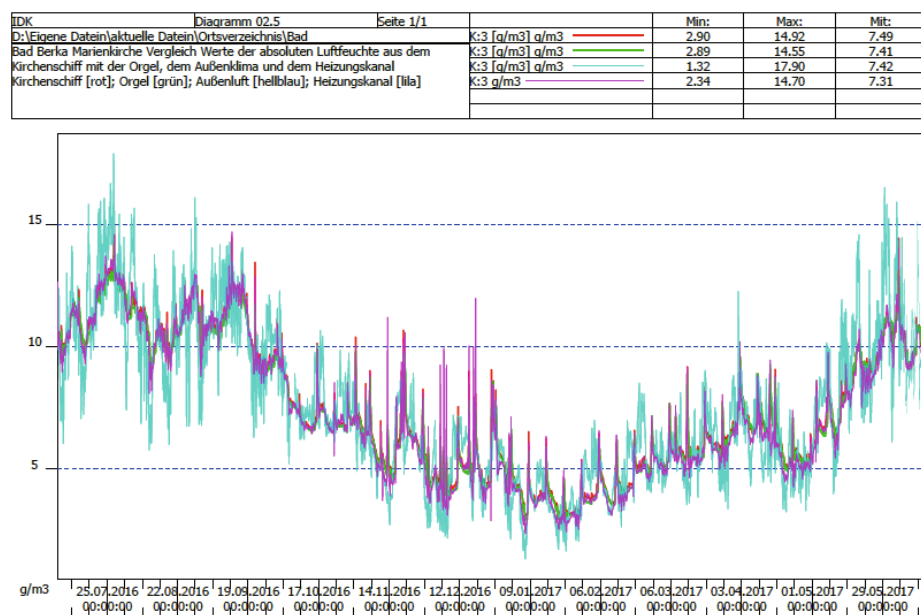


Abb. 30 Bad Berka: Vergleich der Werte absoluten Luftfeuchte im Kirchenschiff (rot), an der Orgel (grün), außen (hellblau) und am Heizungsauslass (lila)

In **Brauweiler** wurden im Zuluft- und Abluftschacht eines Heizungskanals Klimamessungen vorgenommen. Ein signifikanter Einfluss, der auf einen deutlichen Feuchtigkeitseintrag schließen lässt, ließ sich nicht nachweisen.

IDK	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:3 g/m ³	3.09	13.95	7.83
Brauweiler Kirche Heizungseinlass			K:3 g/m ³	1.96	12.95	7.46
absolute Feuchte Heizungseinlass [grün]						
absolute Feuchte Heizungsauslass [rot]						
Zeitraum: 03.03.2020 bis 15.04.2021						

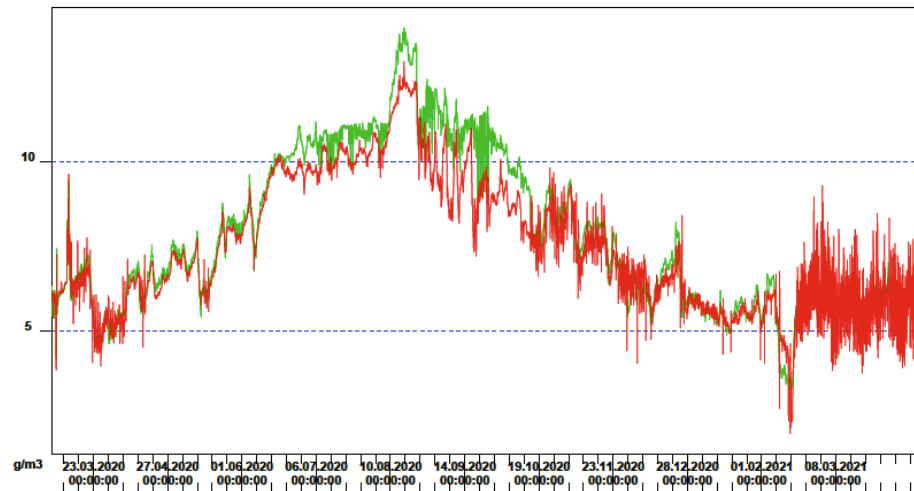


Abb. 31 Abteikirche Brauweiler: Vergleich der absoluten Feuchte am Heizungseinlass (grün) und am Heizungsauslass (rot)

Comfort-Software V3	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
C:\Users\Administrator\Documents\Schimmelprojekt\Brauweiler\DG01 2022\208			K:3 g/m ³	3.09	13.95	7.83
Brauweiler Kirche Heizungseinlass			K:3 g/m ³	1.96	12.95	7.46
absolute Feuchte Heizungseinlass [grün]						
absolute Feuchte Heizungsauslass [rot]						
Zeitraum: 16.02. bis 15.04.2021						

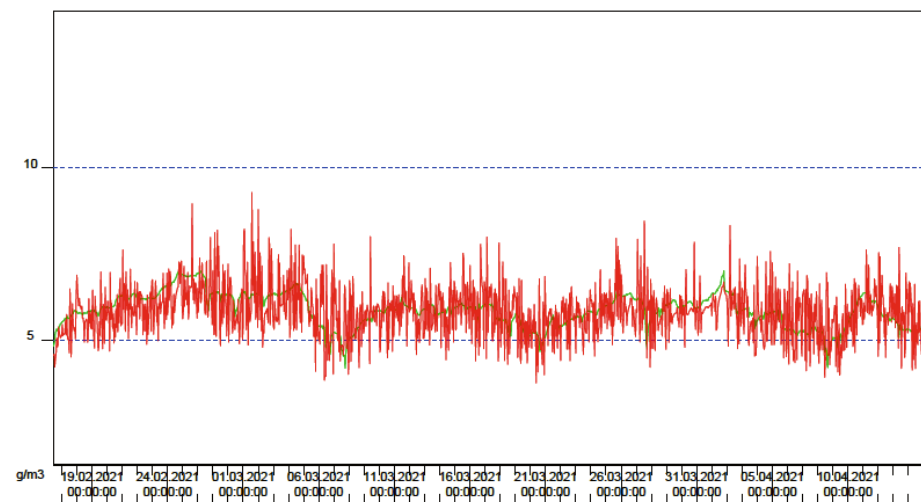


Abb. 32 Brauweiler, Detail: Vergleich der Werte absoluten Luftfeuchte am Heizungseinlass (grün) und Heizungsauslass (rot) im Zeitraum 16.2. bis 15.4.2021. Auch in diesem ungünstigen Zeitraum besteht kein belastbarer Hinweis darauf, dass das Raumklima in der Bilanz durch den Heizungsschacht befeuchtet wird. Der Mittelwert der absoluten Feuchte am Heizungseinlass lag bei 5,85 g/m³, am Heizungsauslasse bei 5,83 g/m³.

In **Geseke** und **Berge** wurden **Außenluft- und Raumklimadaten** verglichen, um den möglichen Einfluss des Außenklimas wie auch die Wirksamkeit einer automatischen, luftfeuchteabhängig gesteuerten Lüftungsanlage auf die Wachstumsbedingungen für die Schimmelpilze abzuschätzen.

Für beide Objekte wurde auf der Basis der Klimadaten, die der Errichter der Heizungs- und Lüftungsanlage freundlicherweise zur Verfügung stellte, ein Vergleichszeitraum vom 02.03. bis 31.12.2020 ausgewählt. Für Berge liegen hierfür Klimaaufzeichnungen im 15-Minutentakt vor, für Geseke im 30-Minutentakt. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl von Messzeitpunkten.

Die Simulation der mikrobiologischen **Wachstumsbedingungen** für die Kirchenschiffe in Berge und Geseke weist für Geseke deutlich bessere Wachstumsbedingungen aus als für Berge (Vergleiche der Simulationen für Berge und Geseke, siehe Abb. 35 und 36). Ursache dürften die vergleichsweise trockeneren Raumluftbedingungen und trockeneren Außenluftbedingungen in Berge sein (siehe Abb. 33 und 34).

Berge Mittelwerte der Raumluft im Kirchenschiff:	58,0% rel. F.; 16,9°C
Berge Mittelwerte Außenklima:	69,5% rel. F.; 13,1°C
Geseke Mittelwerte Raumluft Kirchenschiff:	68,2% rel. F.; 15,0°C
Geseke Mittelwerte Außenklima:	74,3% rel. F.; 12,8°C

IDK	Diagramm 1	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 %rF	39.60	71.80	58.03
Berge			K:2 °C	12.10	24.90	16.75
Kirchenschiff rel. Feuchte [rot]; Temp. [grün]			K:3 %rF	18.50	97.10	69.88
Außenklima rel. Feuchte [dunkelblau]; Temp. [hellblau]			K:4 °C	-3.40	33.40	12.87

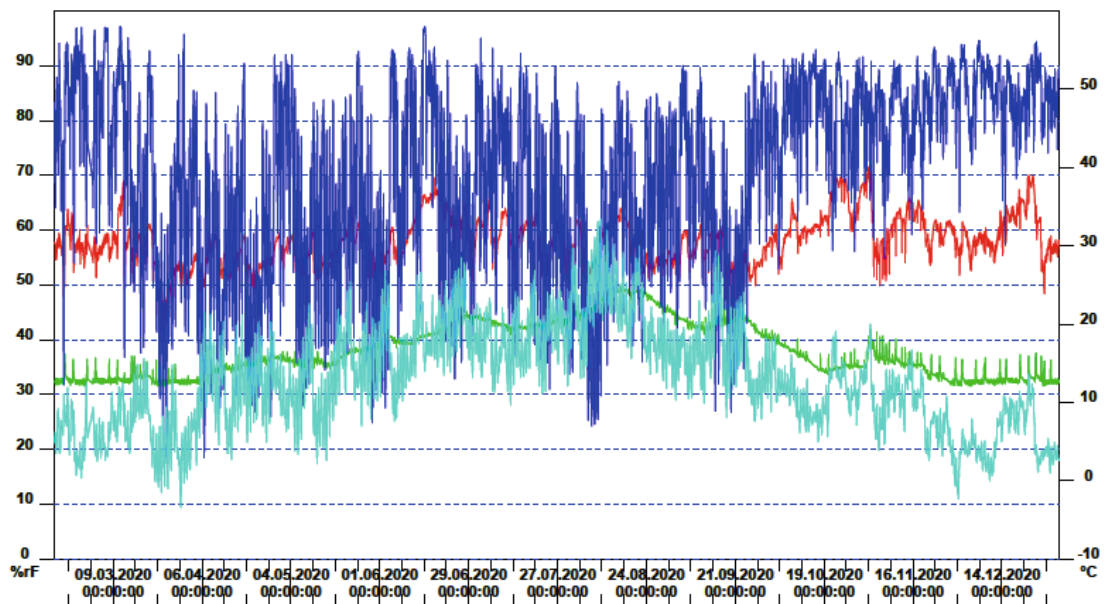


Abb. 33 Berge: Vergleich der Außenklima- und Raumklimawerte (Kirchenschiff rel. F. rot, Temp. grün, Außenklima: rel. F. dunkelblau, Temp. hellblau)

IDK	Diagramm 2	Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 %rF	40.30	93.20	68.90
Geseke			K:2 °C	8.60	23.20	13.89
Kirchenschiff rel. Feuchte [rot]; Temp. [grün]			K:3 %rF	24.40	100.00	76.91
Außenklima rel. Feuchte [dunkelblau]; Temp. [hellblau]			K:4 °C	-4.60	32.90	10.99

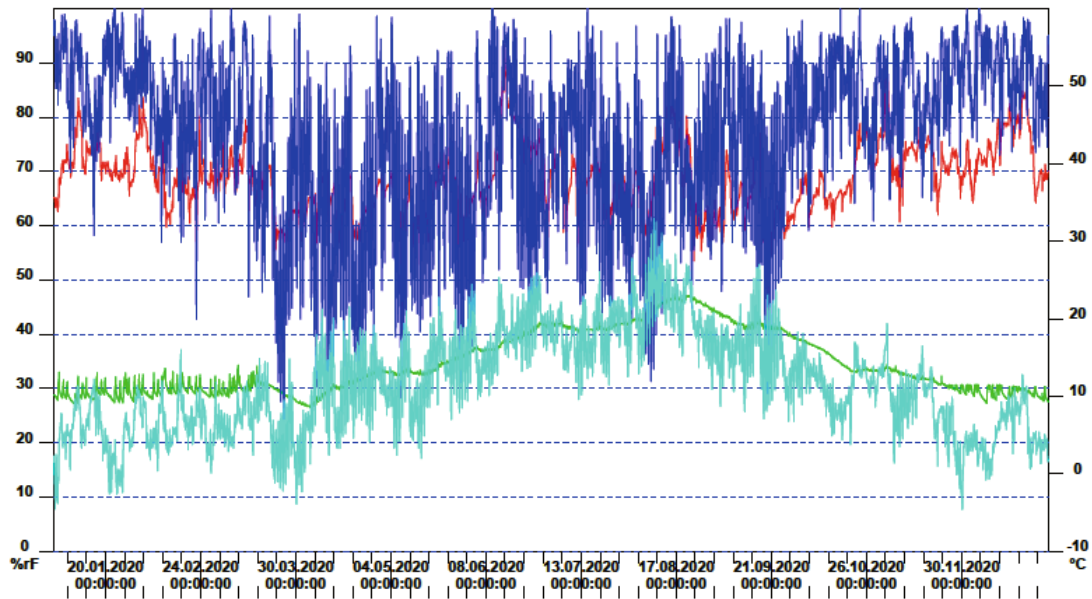


Abb. 34 Geseke: Vergleich der Außenklima- und Raumklimawerte (Kirchenschiff rel. F. rot, Temp. grün, Außenklima: rel. F. dunkelblau, Temp. hellblau)

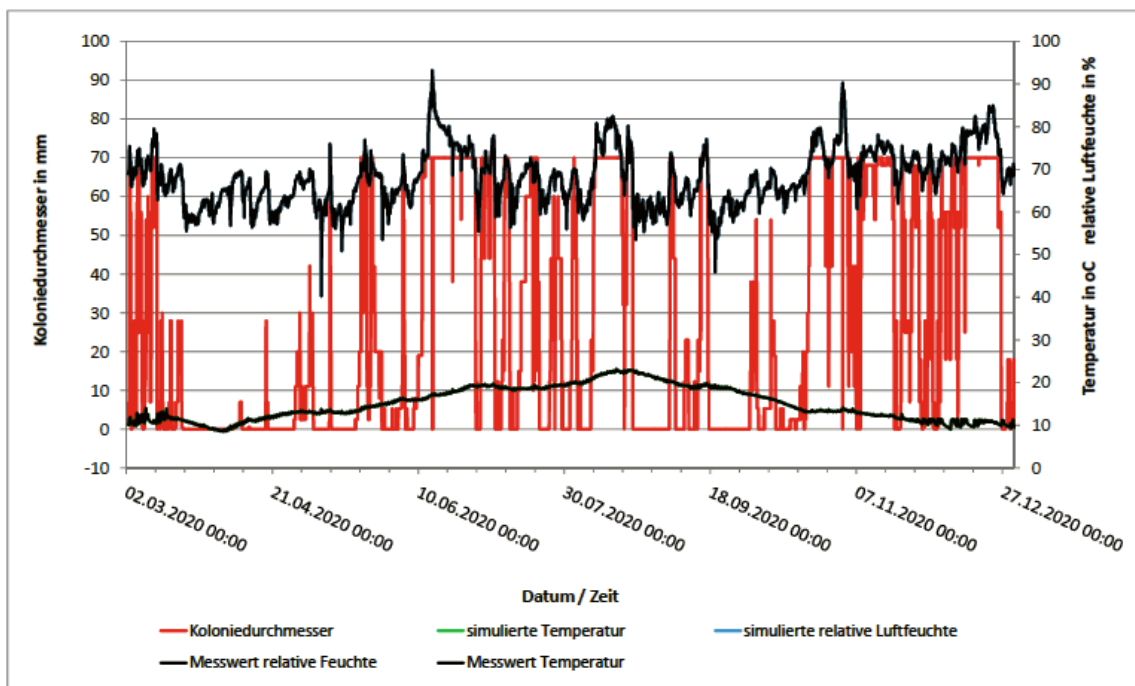


Abb. 35 Simulation der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen in Geseke, St. Cyriakus (Quelle Klimadaten: Herr Methe Firma Theod. MAHR Söhne GmbH)

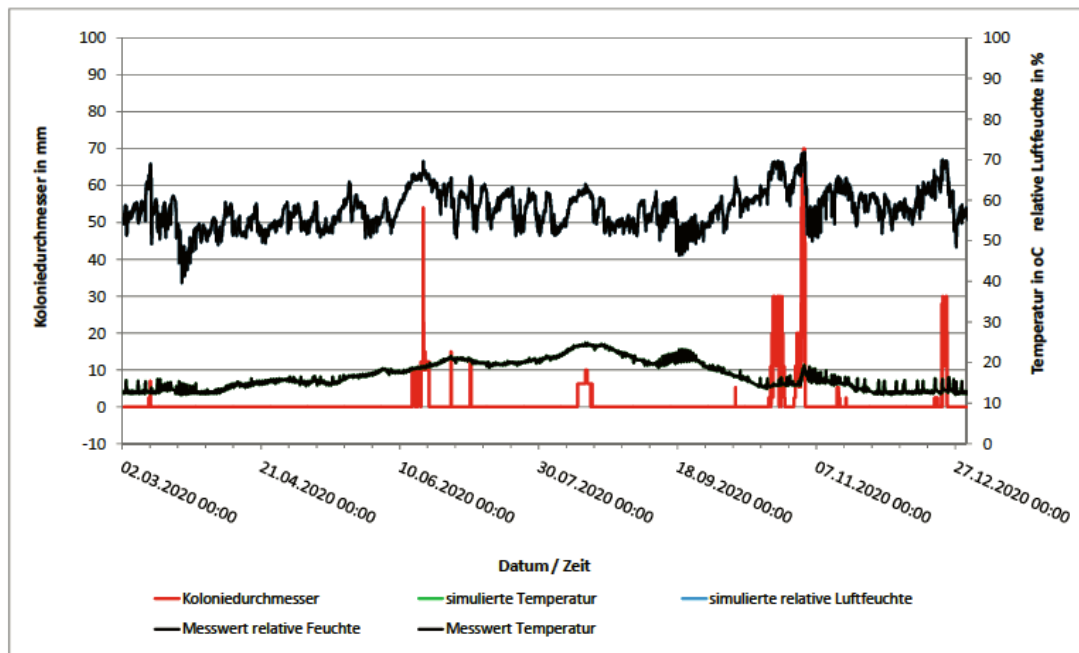


Abb. 36 Simulation der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen in Berge auf der Basis von Daten aus dem Kirchenschiff (Quelle Klimadaten: Herr Methe, Firma Theod. MAHR Söhne GmbH)

Der **Einfluss der Raumlüftung** auf die mikrobiologischen Wachstumsbedingungen erscheint in Berge wie auch Geseke dagegen eher gering.

Berge Kirchenschiff:

Anzahl aller Messzeitpunkte im Vergleichszeitraum 02.03. bis 31.12.2020:	29211
Anzahl der Messzeitpunkte mit mikrobiologischen Wachstumsbedingungen:	5974 = 20,4%
Anzahl der Messzeitpunkte, an denen gelüftet wurde:	989 = 3,4%
Anzahl der Messpunkte, zu denen mikrobiologische Wachstumsbedingungen vorlagen und gleichzeitig gelüftet wurde:	85 = 0,3%

Geseke Kirchenschiff:

Anzahl aller Messzeitpunkte im Vergleichszeitraum 02.03. bis 31.12.2020:	14597
Anzahl der Messzeitpunkte mit mikrobiologischen Wachstumsbedingungen:	11872 = 60,6%
Anzahl der Messzeitpunkte, an denen gelüftet wurde:	1732 = 8,8%
Anzahl der Messpunkte, zu denen mikrobiologische Wachstumsbedingungen vorlagen und gleichzeitig gelüftet wurde:	1354 = 6,9%

Die Berechnung zeigt, dass weder in Berge noch in Geseke (und möglicherweise auch in anderen Fällen) das Außenklima Voraussetzungen für ein zielgerichtetes Lüften zur Vermeidung von Schimmelbildung bietet. Unter den dort gegebenen Bedingungen steht der Wirkungsgrad einer automatischen Lüftung, also der automatischen Öffnung von Fenstern und Türen zur Ableitung feuchter Innenluft nach außen, mit dem Ziel der Hemmung von mikrobiologischem Wachstum in Frage. Ein im Sinne der Vermeidung von Schimmel wünschenswerter Trocknungseffekt dürfte sich allenfalls im Laufe mehrerer Jahre einstellen. Eine signifikante Minderung der Schimmelbildung ist auf diesem Wege an den beiden untersuchten Objekten kaum möglich. Dass die Lüftung

zu einer zweifellos wünschenswerten Ableitung von CO₂ und Zufuhr „frischer Luft“ beitragen kann, wird nicht bestritten, wenngleich sich auch hier in jedem Einzelfall die Frage des Wirkungsgrades stellt. Jeder Einzelfall muss untersucht werden, bevor entsprechende Eingriffe getätigt werden. Ein vorbereitendes Klimamonitoring innen und außen und der Vergleich der erhobenen Daten erlaubt die Abschätzung des Wirkungsgrades.

Die Laurentiuskirche in **Scharfenberg** wurde Mitte des 18. Jahrhunderts erbaut. Ihre Außenwände weisen große, einfach verglaste Fensterflächen auf. Der Einfluss des **Außenklimas** durch Sonneneinstrahlung und nächtliche Abkühlung dürfte deshalb recht hoch sein. Von Schimmelbefall betroffen sind oder waren neben der Orgel auch Teile der Ausstattung, z.B. die Rückseite des Hochaltars. Seit 2016 wird die Kirche im Winter konstant auf 11 bis 12°C beheizt, während vorher eine geringere Raumtemperatur (ca. 8°C) gehalten wurde. Leider liegen für diese Jahre keine Messdaten vor, sodass die entsprechenden Diagramme nicht gegenübergestellt werden können.

Die Simulation zeigt jedoch, dass im Winter, wenn die Kirche auf konstant 10 bis 12°C (zum Gottesdienst auf 15 bis 18°C) beheizt wird, keine Wachstumsbedingungen erreicht werden. Im Sommerhalbjahr steigen die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit, sodass regelmäßig Wachstumsbedingen bestehen.

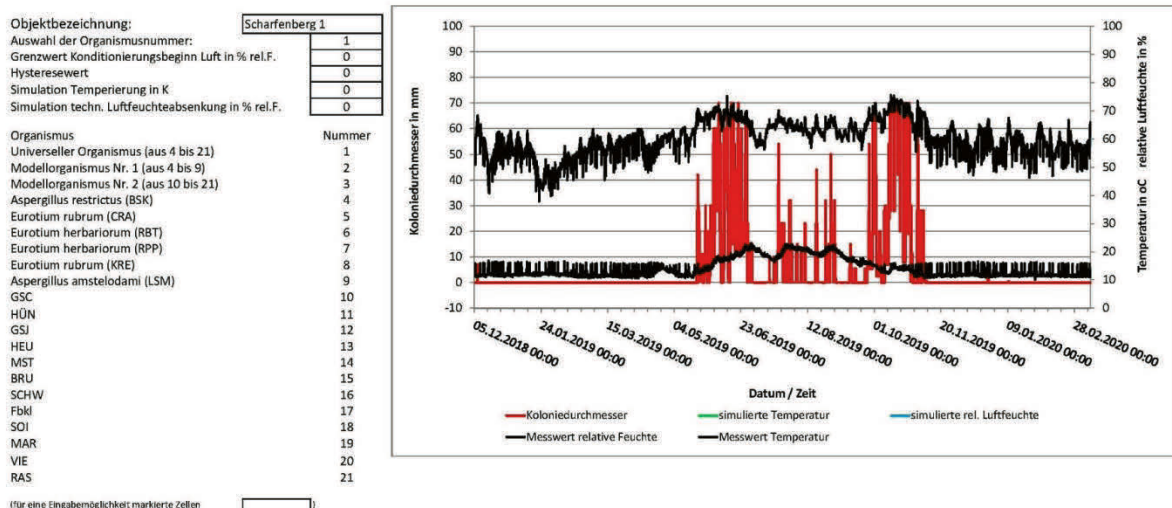


Abb. 37 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen. Im Sommerhalbjahr steigen die Temperatur- und die Luftfeuchtwerte an, damit verbessern sich die Wachstumsbedingungen für die Pilze.

Die Simulation von angeblich früher herrschenden winterlichen Temperaturen um 8 °C (und den zugehörigen Luftfeuchtwerten) zeigt, dass bei einer gegenüber heute (Grundtemperatur 10 bis 12 °C) reduzierten Heizung im Winter deutlich häufiger

Wachstumsbedingungen eintrüben (Abb. 38).¹⁰ (In der Simulation zeigt sich auch eine scheinbare Absenkung der Sommertemperaturen, die jedoch, real im Sommer nicht auftritt, sondern nur durch die Annahme der Temperaturabsenkung durch die Simulationsberechnung verursacht wird).

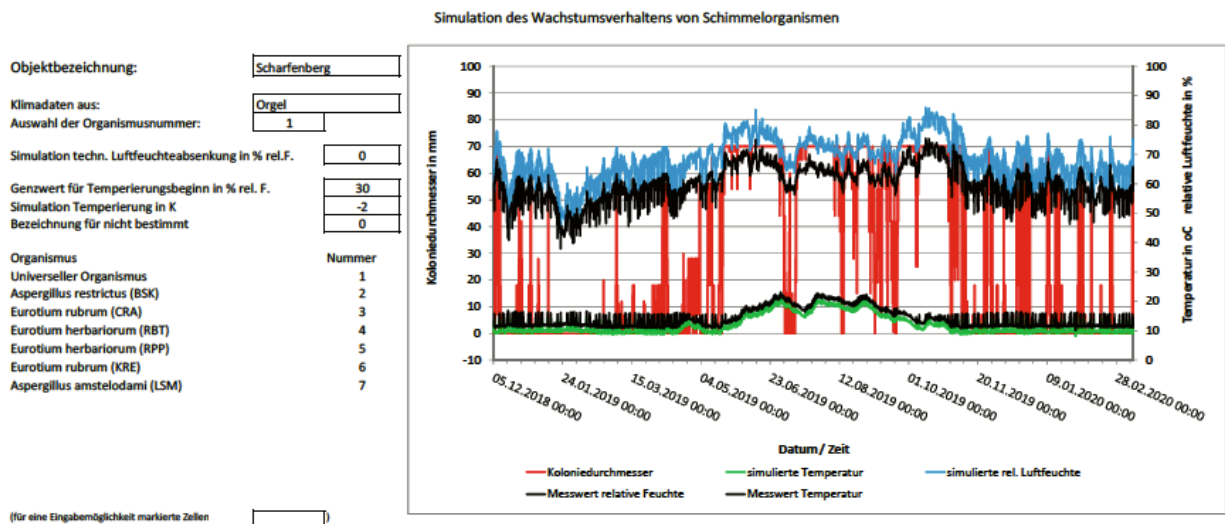


Abb. 38 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer um 2 K reduzierten winterlichen Beheizung (untere Kurven). Auch im Winter treten häufig Voraussetzungen für ein Schimmelwachstums ein. (Die simulierte (!) Reduktion der Raumtemperatur über das ganze Jahr führt auch zu einer simulierten Verminderung der Wachstumsbedingungen im Sommer).

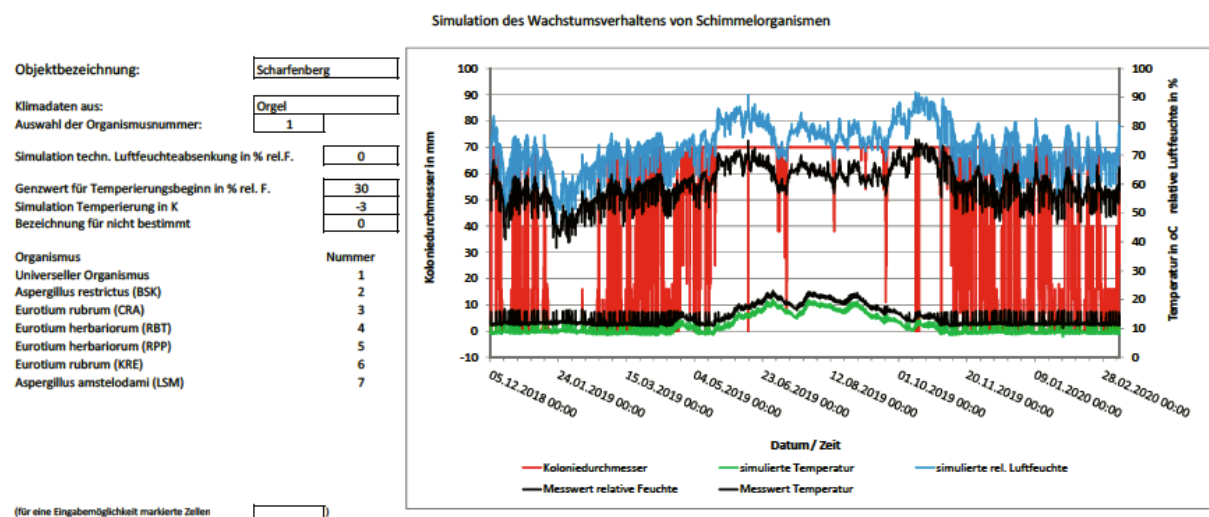


Abb. 39 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer um 3 K reduzierten winterlichen Beheizung. Im Winter treten dadurch deutlich häufiger die Voraussetzungen für ein Schimmelwachstums ein. (Die simulierte (!) Reduktion der Raumtemperatur über das ganze Jahr führt zu einer simulierten (!) Verminderung der Wachstumsbedingungen im Sommer, die aber nicht real ist).

¹⁰ Vgl. auch die Simulationen für Karlsruhe und Schöppenstedt, siehe Punkt 2.2.12).

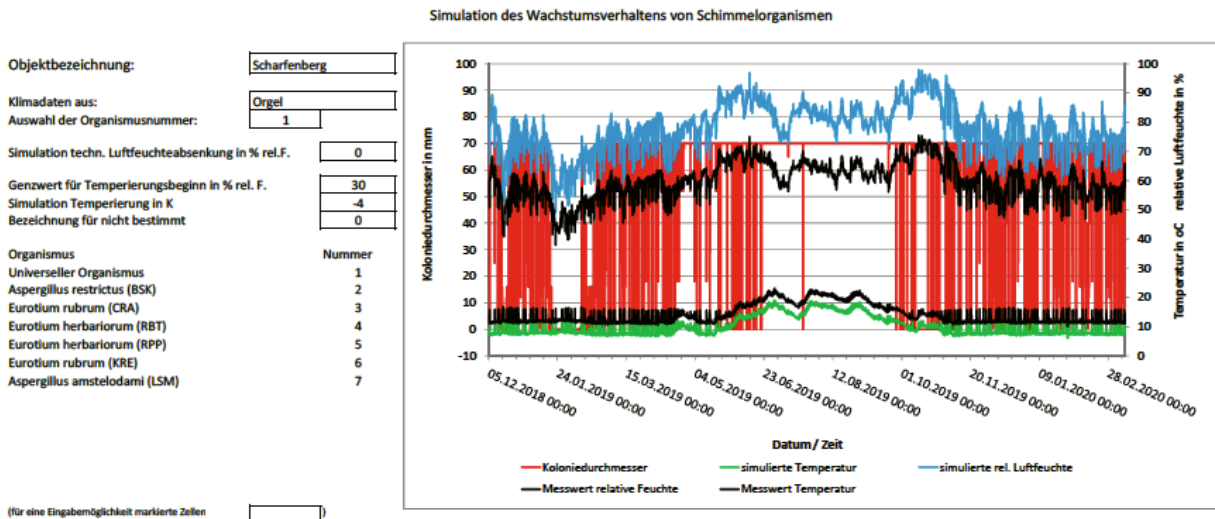


Abb. 40 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer um 4 K reduzierten winterlichen Beheizung. Im Winter treten sehr häufig Voraussetzungen für ein Schimmelwachstum ein. (Die simulierte (!) Reduktion der Raumtemperatur über das ganze Jahr führt zu einer simulierten Verminderung der Wachstumsbedingungen im Sommer, die aber nicht real ist).

Laut Simulation herrschten im Sommer 2019 in der Scharfenberger Kirche regelmäßig die Voraussetzungen für ein Schimmelwachstum (Abb. 37). Laut Simulation könnte eine geringfügige **Temperierung** der Orgel um 1 bis 3 K hier – auch im Sommer – eine Besserung bringen.

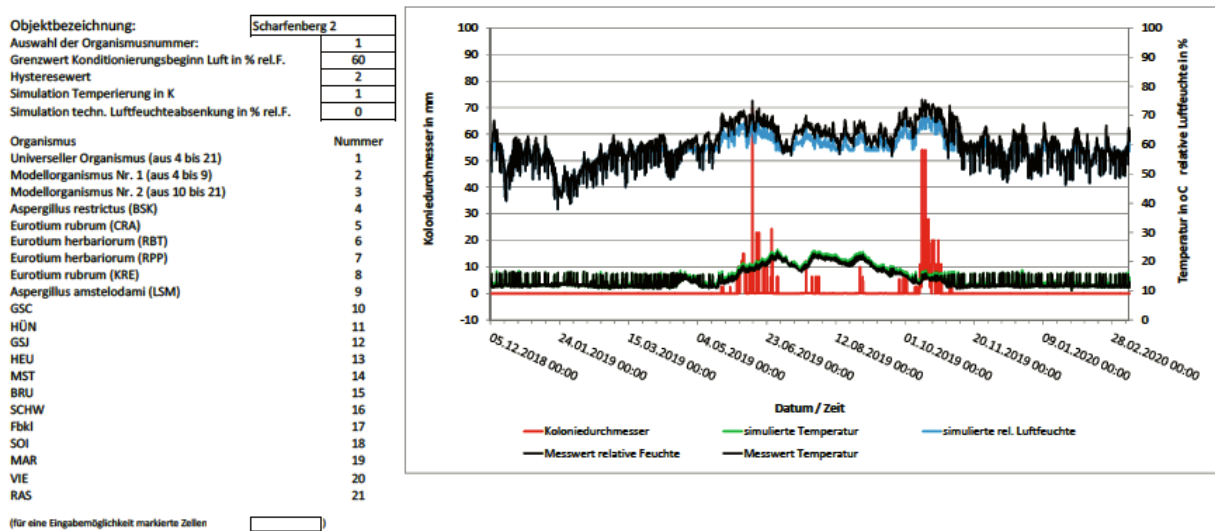


Abb. 41 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer Temperierung der Orgel um 1 K, die bereits zu einer deutlichen Verschlechterung der Wachstumsbedingungen im Sommer führt.

Objektbezeichnung:	Scharfenberg 2.1
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	60
Hysteresewert	2
Simulation Temperierung in K	2
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

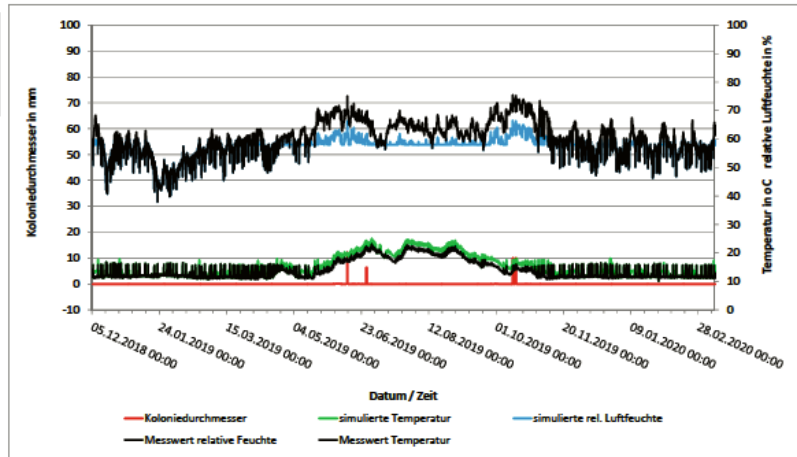


Abb. 42 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer Temperierung der Orgel um 2 K, die zu einer deutlichen Verschlechterung der Wachstumsbedingungen im Sommer führt.

Objektbezeichnung:	Scharfenberg 2.2
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	60
Hysteresewert	2
Simulation Temperierung in K	3
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

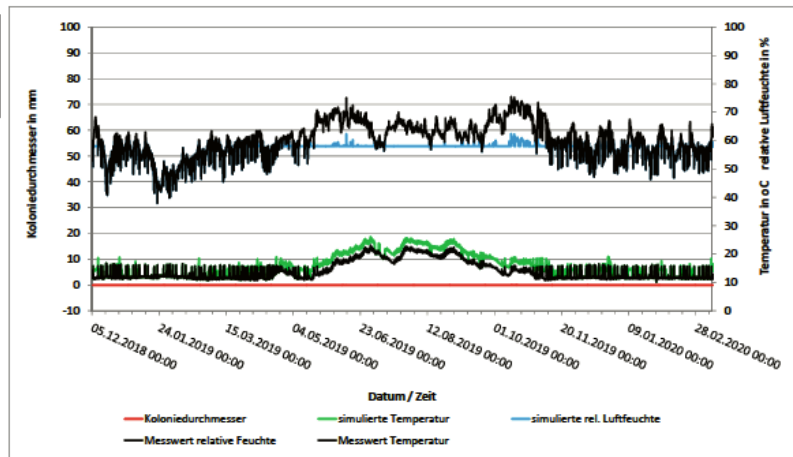


Abb. 43 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer Temperierung der Orgel um 3 K, die ganzjährig Wachstumsbedingungen ausschließt.

Auch eine **technische Entfeuchtung** (um ca. 10 % rel. F.) im Bereich der gefährdeten Oberflächen in der Orgel könnte Abhilfe schaffen. (Ob jedoch eine inselartige Luftentfeuchtung, etwa im freien Raum hinter dem gleichfalls von Schimmel befallenen Altar, wirksam wäre, steht in Frage, weil die Raumluftdurchmischung in den großen Kirchenräumen meist sehr gut ist).

Objektbezeichnung:	Scharfenberg 3
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	60
Hysteresewert	2
Simulation Temperierung in K	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	-100
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSI	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

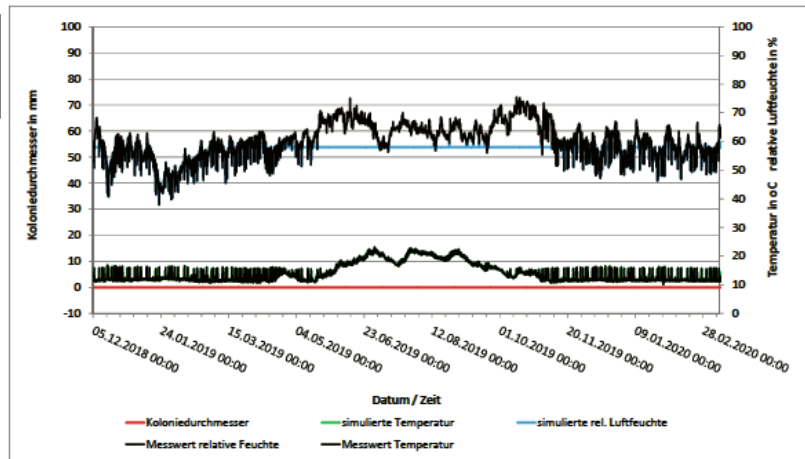


Abb. 44 Klimadiagramm für die Kirche in Scharfenberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen unter dem Einsatz eines Entfeuchtungsgerätes, das bei 60% rel. F. anspricht. Es treten keine Wachstumsbedingungen mehr ein.

Ob der gewünschte Effekt in Scharfenberg über eine **automatische Lüftung** zu erreichen wäre, ist fraglich (siehe oben die Ergebnisse für Berge und Geseke).

Zu den Energieverbräuchen siehe 2.2.6.

2.1.8 Untersuchung des Einflusses von Luftbewegungen auf das Schimmelwachstum

Die Laborversuche zur Wirksamkeit einer **Ventilation** der Luft in der Orgel ergaben, dass das Pilzwachstum allein durch die Bewegung der Luft nicht gehemmt wird.

In drei Klimaschränke aus Plexiglas wurden Probekörper aus Fichten-, Kiefern- und Eichenholz eingebracht, die mit Pilzkeimen angeimpft waren. In einem der Schränke wurde die relative Luftfeuchte konstant auf 51% gehalten, also ein für ein Pilzwachstum ungünstiges Klima eingestellt. In den beiden anderen Schränken lag die relative Luftfeuchte bei 84-87%. In einem dieser Schränke wurde zusätzlich ein Computerlüfter eingebaut, der die Luft im Schrank verwirbelte. In beiden Schränken mit erhöhter Luftfeuchte war ein Schimmelwachstum zu beobachten. Die Luftbewegung wirkte sich nicht aus. Im Schrank mit niedriger Luftfeuchte kam es zu keinem Wachstum.

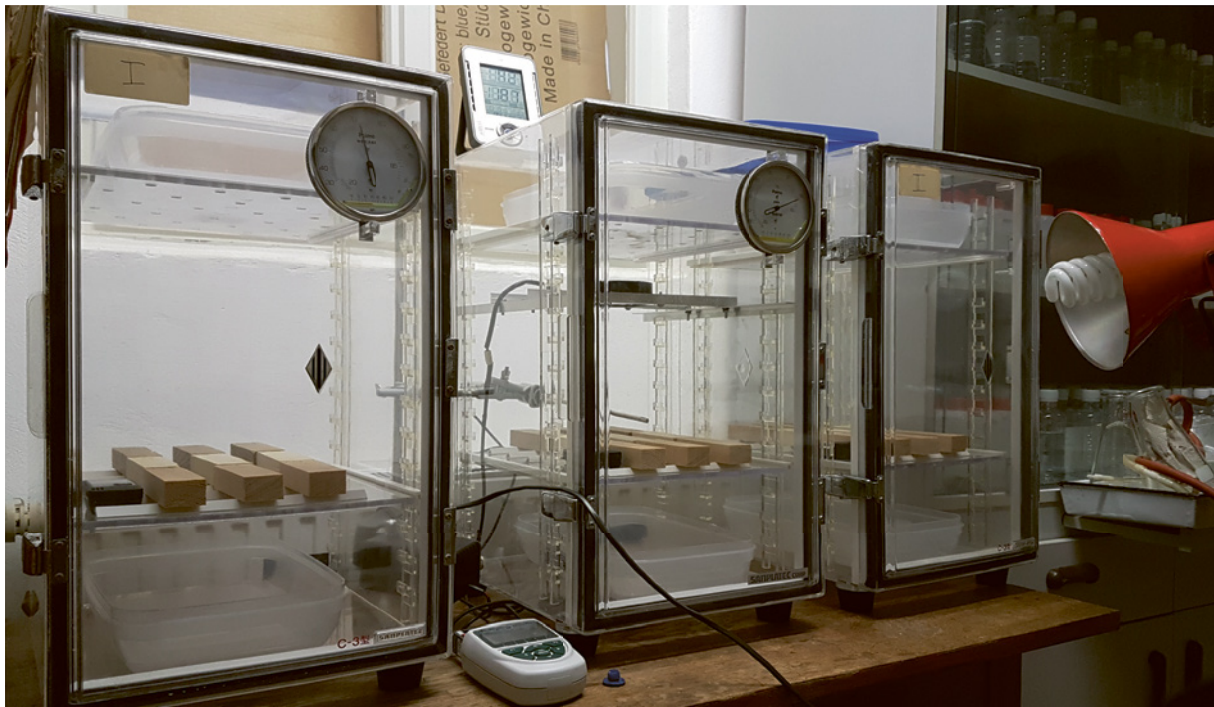


Abb. 45 Versuchsanordnung zur Wirkung von Luftbewegungen: im mittleren Exsikkatorschrank ist der Ventilator zu erkennen.

Der unter Realbedingungen beobachtete hemmende Einfluss einer Luftbewegung (im Gegensatz zu „stehender“ Luft) dürfte aus Trocknungseffekten an den von der bewegten Luft berührten Oberflächen resultieren. Die hier erfolgte Überprüfung der Wirkung bewegter Luft bestätigt entsprechende Hinweise aus der Literatur.¹¹

2.1.9 Untersuchung der Einsatzmöglichkeit von Heizteppichen und Infrarot-Heizfolien als Flächenheizungen

Im Blick auf Alternativen zu den in Michaelstein eingesetzten **Heizkörpern** (siehe 2.2.1) wurden im Rahmen von Laborversuchen **IR-Folien** und ein **Heizteppich** verglichen. Untersucht wurde, ob sich derartige Heizelemente für die luftfeuchtgesteuerte Temperierung in Kirchenorgeln verwenden lassen (s. den vollständigen Bericht im Anhang).

¹¹ Vgl. KAESS, G., SCHWARTZ, W.: Untersuchungen über den Einfluss der Luftbewegung auf das Wachstum von Schimmelpilzen auf gekühltem Fleisch. Archiv für Mikrobiologie (1934),5:443-450. MERSCH-SUNDERMANN, V. (1995) Umweltmedizin. Thieme-Verlag, Stuttgart. BAGDA, E. (2000) Biozide in Bautenbeschichtungen. Expert-Verlag. Technischen Regel für Arbeitsstätten „ASR A3.6: 2012. Lüftung“. Plaschkies, K., Flade, Ph., Henzler, T., Hartnagel, M., Löther, Th. (2019) Schlussbericht, IGF-Vorhaben Nr. 18891 60/1, Entwicklung technischer Verfahren zur Vermeidung der biogenen Schadstoffbelastung in Kirchenorgeln, S. 79 - 80.

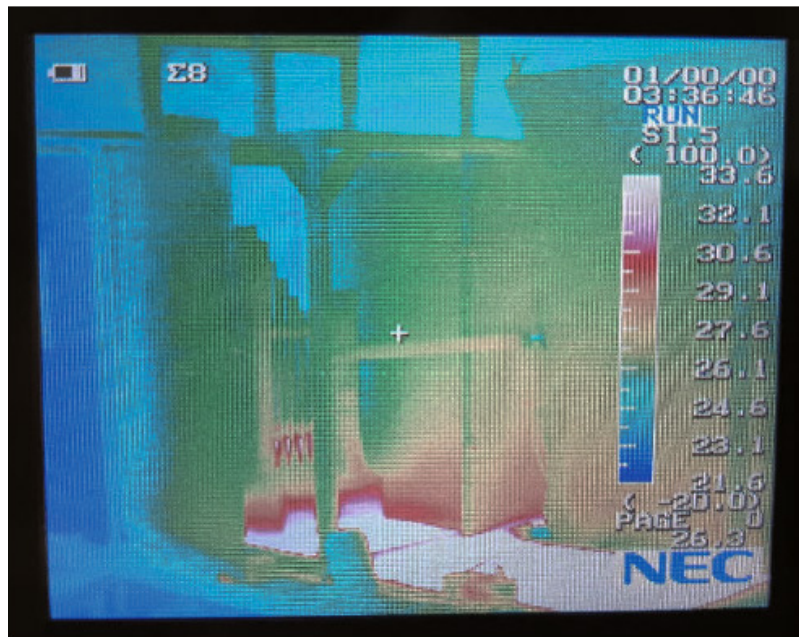


Abb. 46 Versuchsanordnung zur Wirkung eines Heizteppichs. Die Thermographie zeigt, dass die Oberflächen der Modellorgel und ihres Gehäuses bei mehrstündigem Betrieb des Teppichs im Bereich von 26,5 °C bis 33,6°C erwärmt werden.

Zum Versuchsaufbau mit einem Heizteppich und einem kleinen Orgelmodell gehörten fünf Klimadatenlogger, die vor, in und hinter der Orgel in unterschiedlichen Höhen angebracht wurden. Außerdem wurde eine Wärmebildkamera eingesetzt und die Verteilung der warmen Luft mit einem Nebelversuch nachvollzogen.

Im Verlauf des Versuchs mit einem **Heizteppich** zeigte sich, dass eine gezielte Temperierung der Oberflächen der Orgel möglich ist, aber nur dann funktionieren kann, wenn das **Orgelgehäuse** mitbetrachtet wird. Ohne ein Gehäuse verliert sich die Energie des Heizteppichs im Raum, sodass der angestrebte Effekt der Entfeuchtung nicht eintritt.

Innerhalb eines modellhaft ausgelegten Gehäuses war es möglich, die Temperatur um 3 K (im Durchschnitt) anzuheben und damit die relative Luftfeuchtigkeit um 8% (im Durchschnitt) zu senken.

Der Vergleich zweier Messstellen zeigte, dass Bereiche außerhalb des Einflusses des Heizteppichs nicht oder nur schwach temperiert wurden. Das bedeutet, dass die Heizelemente gleichmäßig angeordnet werden müssen. Wo kein Heizelement liegt, kann ein Bereich ohne entfeuchtende Wirkung in der Orgel bestehen bleiben. Eventuell ist es wichtiger, in den kälteren Bereichen zu heizen als in den wärmeren, also eher hinter der Orgel an der häufig kalten Wand, als vor der Orgel auf der dem Kirchenraum zugewandten Seite.

Falls zusätzlich Ventilatoren zur gleichmäßigeren Verteilung der erwärmten Luft eingesetzt werden (vgl. Michaelstein), ist darauf zu achten, dass diese die Wärme im Orgelgehäuse verteilen, aber die warme Luft nicht hinausblasen.

Die Messung der vertikalen **Temperaturverteilung** zeigte eine recht gleichmäßige Anhebung um etwa 2-3 K über der Temperatur außerhalb des Einflussbereichs des Heizteppichs. Direkt über diesem war die Temperaturspreizung stärker und damit ungünstiger.

Eine relativ gleichmäßige Temperaturverteilung im Orgelgehäuse scheint somit möglich. Die Heizelemente sollten nicht direkt in Kontakt mit empfindlichen Bauteilen montiert werden. Die Montage innerhalb des Orgelgehäuses unter dem Instrument oder zumindest im Fußbodenbereich um das Instrument herum erscheint für die gleichmäßige Temperaturverteilung prinzipiell sinnvoll.

Eine annähernde Berechnung des **Energieverbrauchs** in einer Orgel anhand des im Laborversuch verwendeten Modells deutet darauf hin, dass über das Jahr ein 4-stelliger Betrag für Betriebsenergie zusammenkommen kann. Trotz der erwartbar hohen Energiekosten sollte diese Technik in der Praxis überprüft werden. Dabei müssen die tatsächlichen Energiekosten gemessen und mit den Werten der Modellrechnung aus dem Laborversuch verglichen werden. Erst dann kann ein neues Modell zur Schätzung der Energiekosten erstellt und eine Kosten-Nutzen-Bewertung angestellt werden. Idealerweise sollte dieser Vor-Ort-Versuch über mindestens ein Jahr geführt werden, wobei vorher in einer Anlaufphase die Parameter zufriedenstellend angepasst und die möglichen Klimakorridore ausreichend erfasst werden. Das bedeutet eine Gesamtlaufzeit von ca. 1,5 Jahren (vgl. 2.2.2).

In einem weiteren Test wurde die Wirkung einer **Infrarot-Heizbahn** erprobt, die vertikal an den Innenwänden des Orgelgehäuses angebracht wurde. Die Erwärmung geschieht durch eine Spannung, die an Kohlefaserbahnen angelegt wird, die zwischen Kunststofffolienschichten eingeschweißt sind. Diese Infrarot-Heizbahnen sind in einer Leistungsdichte von 90 W/m², 150 W/m² und von 220 W/m² erhältlich. Hier wurde die Variante 150 W/m² verwendet (siehe Anhang Versuch mit IR-Heizbahn).



Abb. 47 Versuchsanordnung zur Wirkung einer IR-Heizbahn. Zu sehen ist links die Orgel, einer der Messfühler und die die hinter und neben der Orgel angebrachte Heizbahn.

Der Versuch zeigte, dass mit der Infrarot-Heizbahn eine luftfeuchtegeregelte Temperierung realisiert werden kann, mit der sich die Feuchtigkeit im Orgelgehäuse verringern lässt.

Im Ergebnis beider Versuche scheint der Heizteppich als für die Anwendung am Boden und auf Gangbrettern in der Orgel, die auch betreten werden, geeignet. Dort lässt sich der Teppich einfach auslegen und bei Bedarf wegnehmen. Die Infrarotheizbahnen sollten nicht direkt betreten werden, um die Leiterbahnen nicht zu beschädigen. Heizvliese können aber unter einem Fußbodenbelag oder einem Wandputz eingebaut werden und lassen sich einfacher als die Heizteppiche mit Hilfe von Leichtbauplatten oder ähnlichem reversibel auf der Innenseite von vielen Orgelgehäusen und an deren Rückwänden installieren. Sie sind leicht und in verschiedenen Längen und Breiten erhältlich, während die Heizteppiche nur in bestimmten Größen im Handel sind. Für den Laborversuch wurde eine Folie, kein Vlies, verwendet.

Der Vergleich zwischen der Installation einer Heizfolie an einer Innenwand im Modell-Orgelgehäuse mit der Installation an zwei Innenwänden zeigte, dass sich die klimatische Stabilität im Orgelgehäuse durch die Bekleidung zweier Innenwände stark verbessert. Daraus ist abzuleiten, dass die Installation der Heizelemente möglichst an

allen Innenseiten der vier Außenwände des Orgelgehäuses verteilt werden sollte, auch wenn dies an der Vorderseite, dem Prospekt, nur eingeschränkt umsetzbar ist. Noch einen Schritt weiter führt die Empfehlung, auch den Fußboden unter der Orgel und die Gangbretter mit einigen Heizelementen auszurüsten, um auch der Luftwalze „außen hoch und innen runter“ entgegenzuwirken und die Wärme noch besser zu verteilen. Auf einer Wärmebildaufnahme wurde die Erwärmung der etwa 10 cm entfernt liegenden Orgelwand aus Eichenholz auf etwa 27°C sichtbar. Die maximale Erwärmung einzelner Bauteile beim Versuch mit dem Teppich direkt unter der Orgel lag höher.

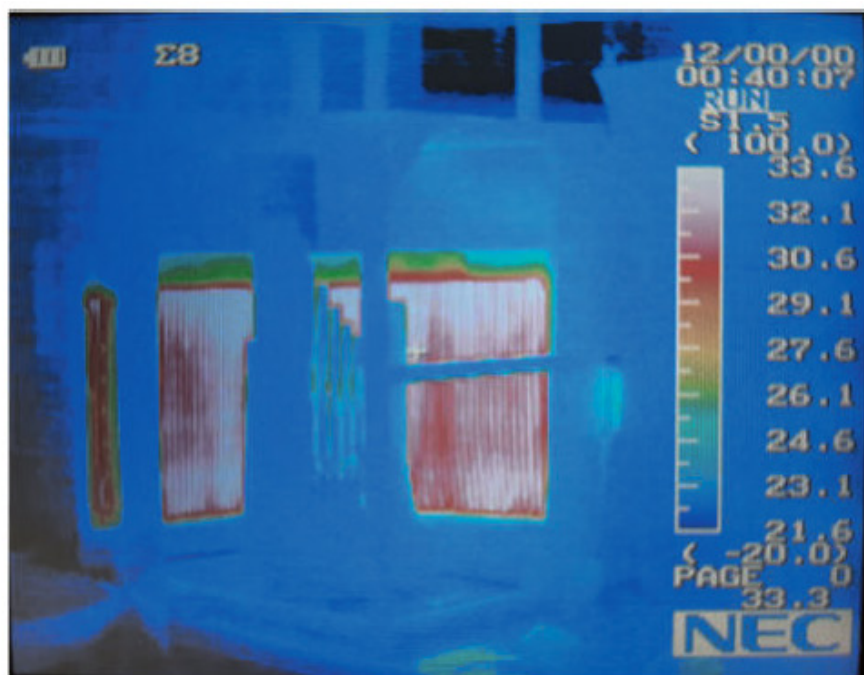


Abb. 48 Thermographie zur Überprüfung der Wirkung einer IR-Heizbahn. Die Oberfläche der Heizbahn erwärmt sich auf ca. 35°C, die Oberfläche der Orgel auf etwa 23°C.

Eine Bildung von **Wärmeschatten** ist beim Einbau einer solchen Technik ebenso zu vermeiden, wie die unmittelbare Nähe der Heizelemente zur Oberfläche empfindlicher Teile. Eine leichte aber etwas wärmedämmende Trägerplatte zwischen dem Heizelement und der Innenseite eines Orgelgehäuses könnte die Wärmeschwankungen des Orgelgehäusematerials mildern. In einem Testaufbau war das der Fall, da die Trägerplatte der IR-Folie aus Kapaplast eine gewisse Dämmwirkung aufweist. Zu untersuchen wären mögliche Effekte solcher in die Orgel eingestellten Platten auf den Klang.

Die Installation schwacher **Ventilatoren** zur optimierten Wärmeverteilung ist ein weiterer möglicher Aspekt der gleichmäßigen Erwärmung im Orgelgehäuse.

2.2 Praxisversuche zur Erprobung von Technologien zur Hemmung mikrobiologischer Aktivität

2.2.1 Versuche mit einer luftfeuchtegesteuerten Raumlufttemperierung zur Konditionierung der Raumluft im Gehäuse der Kapellenorgel im Kloster Michaelstein

Vor dem Hintergrund einer Schimmelbildung in der Kapellenorgel im Kloster Michaelstein beteiligte sich die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt am hier beschriebenen Forschungsprojekt SCHIK mit der Unterstützung eines Versuches zur **luftfeuchtegesteuerten Temperierung** der Raumluft im Gehäuse dieser Orgel. Ziel des Versuches war die definierte Absenkung und Stabilisierung der relativen Luftfeuchte auf ein vorgegebenes Niveau zwischen 60% und 65% rel. Feuchte, um ein weiteres Schimmelwachstum zu hemmen bzw. zu unterbinden. Die dazu genutzten technischen Komponenten sollten langlebig und wartungsarm sein.

Der Versuch wurde auf der Grundlage mobiler **Einzelkomponenten** zur Steuerung und Raumlufterwärmung ausgelegt, um im Verlauf des Versuches ein hohes Maß an Variabilität zu ermöglichen. Für die luftfeuchtegesteuerte **Regelung** kam das Vorschaltsteuergerät PASS-FOX-1 der Firma PAS-tec sowie für die vier im Orgelgehäuse verteilten Wärmequellen die Elektroheizkörper vom Typ Dimlex DX421 (230V bis 2000W) zum Einsatz (siehe Abb. 49 links).



Abb. 49 links: mobile Anschluss- und Regeleinheit, rechts: mobiler Lüfter und Elektroheizkörper

Selbstverständlich erfolgte der Einsatz der **Elektroheizkörper** entsprechend ihrer Einstellmöglichkeit in einem stark leistungsreduzierten Betrieb, hätte aber bei Bedarf deutlich gesteigert werden können. Ebenso wie die Wärmequellen war auch die

elektrische Sicherung und Verteilung inklusive der Regelungseinheit in einer mobilen Ausführung konzipiert worden. Im Verlauf der Optimierung des Versuchsaufbaus wurde ein Elektroheizkörper durch zwei **Ventilatoren** vom Typ VL1139 SCB der Firma Bomann mit jeweils 45 W ersetzt, die dazu beitragen, die Wärmeverteilung im Orgelgehäuse sehr gut auszugleichen (siehe Abb. 49 rechts). In diesem Zusammenhang bewährte sich die hohe Variabilität des Versuchsaufbaus durch die Ausführung aller elektrischen Leitungsverbindungen in Form von Steckverbindungen. Die Messwerterfassung für die Regelungseinheit erfolgt über ein ca. 2,80 m langes Kabel in der Mitte des Orgelgehäuses, der elektrische Anschluss des gesamten Versuchsaufbaus der Temperierungsanlage über eine 16A CE Kraftstromsteckdose. Die Firma ELGOS GmbH Elektroanlagenbau realisierte im Auftrag der Kulturstiftung Sachsen-Anhalt die gesamte Elektroinstallation.

Comfort-Software V3		Diagramm 15.1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
H:\Sicherung\DK-Kalisch\20210115\aktuelle				K:1 [%rF] Kapelle	42.00	74.70	61.05
Michaelstein Kapelle				K:2 [°C] Kapelle	7.80	25.60	14.24
Vergleich Raumklima in der Kapelle rel. Feuchte [rot]; Temp. [grün] mit Raumklima in der Orgel rel. Feuchte [dunkelblau]; Temp. [hellblau] am Messpunkt im unteren Teil des Orgelgehäuses				K:1 [%rF] Channel 1	45.80	68.30	58.35
				K:2 [°C] Channel 2	7.90	27.30	15.05

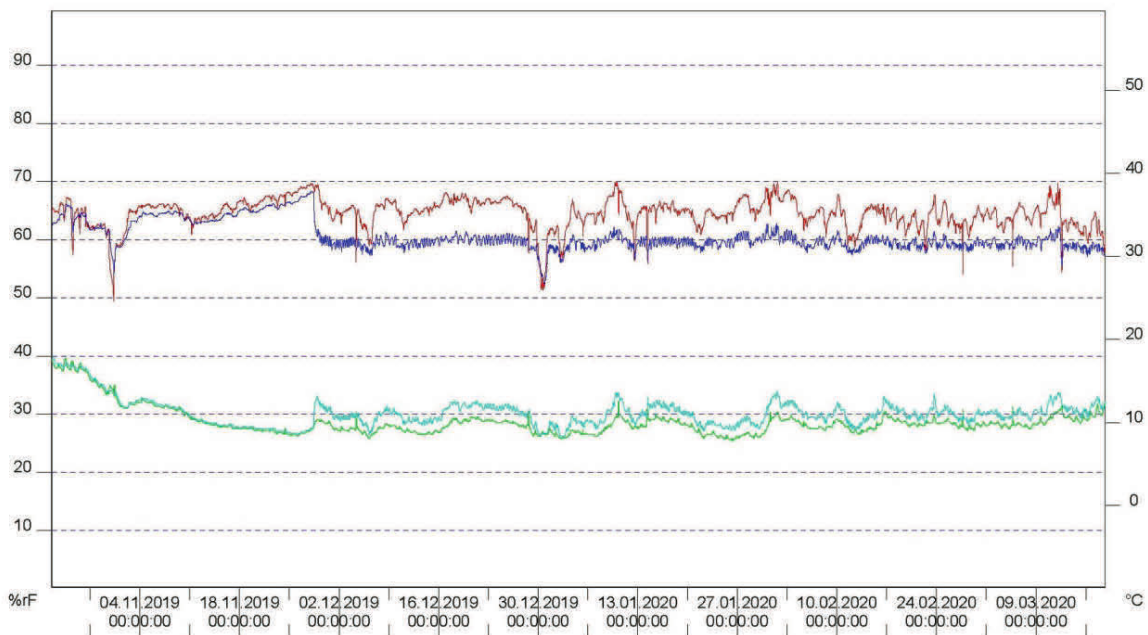


Abb. 50 Vergleich der relativen Raumluftfeuchte [rot] und Temperatur [grün] in der Kapelle mit der abgesenkten und stabilisierten relativen Luftfeuchte [dunkelblau] und Temperatur [hellblau] im Orgelgehäuse

Bereits mit der Inbetriebnahme der luftfeuchtgeregelten Temperierung in der Woche vom 10. bis 15.12.2018 stellte sich ein deutlich abgesenkter und stabilisierter Verlauf der relativen Raumluftfeuchte im Orgelgehäuse im Vergleich zum umgebenden Raumklima in der Kapelle ein. Durch den Einsatz der luftfeuchtgeregelten Temperierung ließen sich wie vorgegeben Anstiege der relativen Luftfeuchte über 60% rel. Feuchte abdämpfen bzw. weitgehend vermeiden (siehe Abb. 50).

Im Verlauf des Projektes konnte die Wirksamkeit des Verfahrens bei gleichzeitiger guter Verteilung der angestrebten raumklimatischen Stabilisierung im Orgelgehäuse nachgewiesen werden. Zukünftig stellt sich die Aufgabe der gerätetechnischen und energetischen Optimierung des Konzeptes, um es zu wirtschaftlicher Markreife zu führen. Im Rahmen des Projektes SCHIK wurden bereits einige Verbesserungen vorgenommen.

So wurde nach Hinweisen des örtlich verantwortlichen Orgelbauers die Steuerung der Temperierungsanlage modifiziert, um den **Heizvorgang** langsamer als zunächst ablaufen zu lassen. Zu schnelles Erwärmen ($> 1\text{-}2\text{ K/h}$) wirkt sich nachteilig auf Stimmung und Traktur der Orgel aus. Bei einem Arbeitstreffen am 26.05.2020 in Michaelstein wurde mit dem Orgelbauer der erreichte Arbeitsstand diskutiert.

Ein **Nebelversuch** erbrachte Aufschlüsse bzgl. der Luftbewegungen, Aufnahmen mit einer **Wärmebildkamera** lieferten Informationen zur **Wärmeverteilung im Orgelgehäuse**. Die Beobachtungen führten zu der Festlegung, den Temperierungsversuch insofern zu modifizieren, als zusätzlich zwei Ventilatoren aufgestellt werden sollten, die die erwärmte Luft möglichst gleichmäßig im Orgelgehäuse verwirbeln.

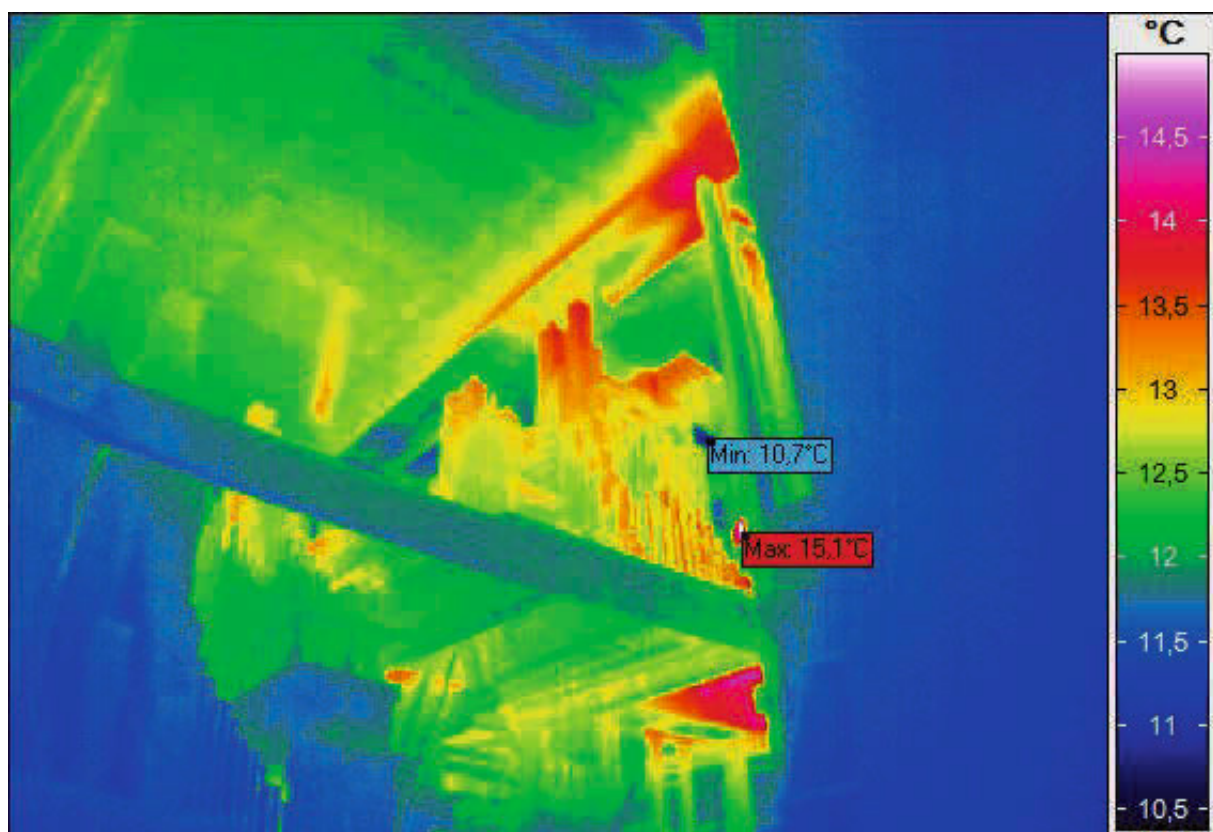


Abb. 51 Michaelstein, Wärmeverteilung in der Orgel am 14.01.2020. Um die erwärmte Luft gleichmäßiger im Gehäuse zu verteilen, wurden nach diesem Versuch Ventilatoren aufgestellt.

Bei der letzten Kontrolle im Oktober 2020 wurden die niedrigsten ATP-Werte der Versuchsreihe gemessen, nachdem die früheren ATP-Tests bereits reduzierte Aktivitätswerte ergeben hatten. Die Messwerte zeigen den Erfolg der Maßnahme. (siehe Tabelle 4 und Abb. 52).

Orgel Michaelstein ATP auf 4 cm ²					
Datum	Messstelle				Anmerkungen
	1	2	3	4	
30.08.2018	146.534 RLU		79.554 RLU	37.556 RLU	
28.03.2019	90.245 RLU		25.669 RLU		neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testfläche vom 30.08.2018
	5.711 RLU		2.907 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
29.08.2019	27.736 RLU	56.882 RLU	28.647 RLU	27.797 RLU	neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testfläche vom 28.03.2019
	702 RLU	301 RLU	2.605 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
	11.206 RLU	nicht gefunden	1.888 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 28.03.2019 erneut abgerieben
14.01.2020	16.181 RLU	24.583 RLU	7.729 RLU		neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testfläche vom 29.08.2019
26.05.2020	10.869 RLU	19.392 RLU	18.234 RLU	22.985 RLU	neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testfläche vom 14.01.2020
	1.321 RLU	873 RLU	888 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
06.10.2020	11.612 RLU	12.620 RLU	17.272 RLU		neue 4 cm ² Testfläche

Tab. 4 Ergebnisse der Bestimmung der Aktivität der Schimmelpilze (ATP-Wert) in der Orgel in Michaelstein während der Projektlaufzeit

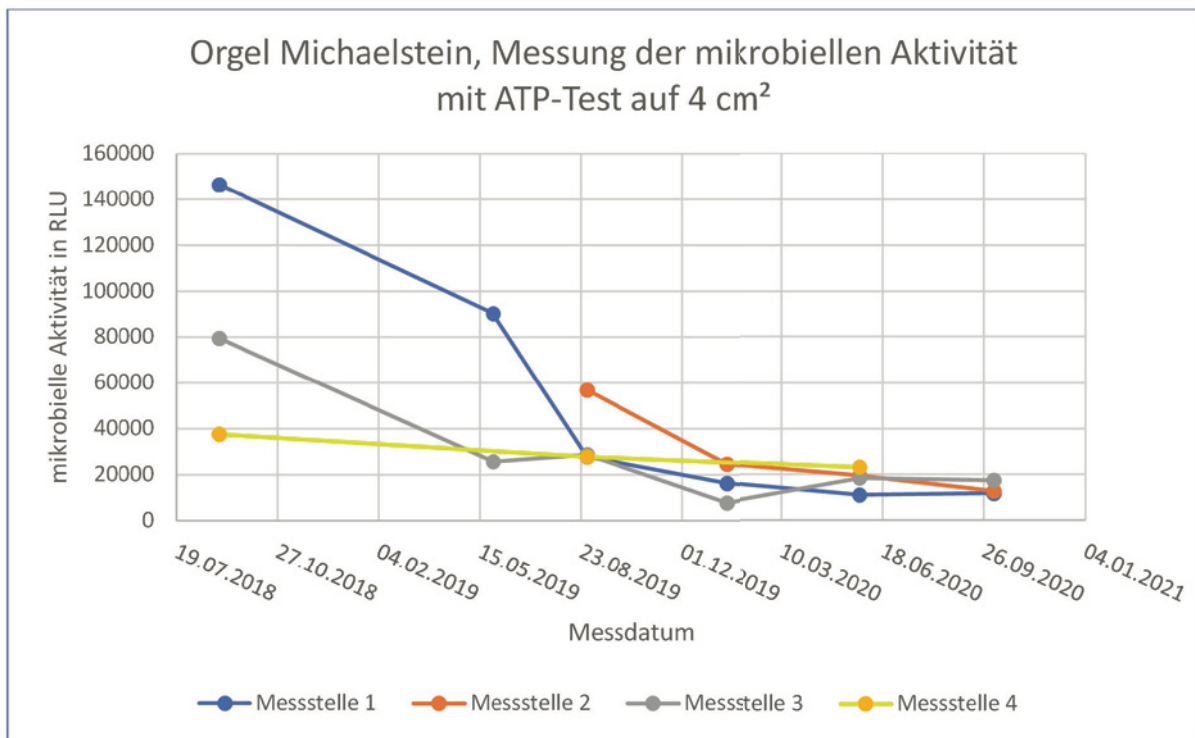


Abb. 52 Übersicht über die in Michaelstein gemessenen ATP-Werte

Die in Michaelstein gemessenen **ATP-Werte** zeigen, dass die geringfügige und schwankungsarme Temperierung der Luft und damit auch der Oberflächen in der Orgel den Schimmelbefall mindert. An Messstelle 1 konnte eine Minderung auf ca. 7 % erreicht werden, an Messstelle 3 auf 23% des Ausgangswertes.

Datum	Messstelle 1/Aktivität (RLU)	Messstelle 3/Aktivität (RLU)
	ATP auf 4 cm ² / 1 cm ²	ATP auf 4 cm ² / 1 cm ²
30.08.2018	146.534/ 36.634	79.554/ 19.889
26.05.2020	10.869/ 2.717	18.234/ 4.559
Restaktivität	7 %	23 %
Rückgang	93 %	77 %

Tab. 5 Ergebnisse der Bestimmung der Aktivität der Schimmelpilze (ATP-Wert) vor und nach der Inbetriebnahme der Temperierungsanlage in der Orgel in Michaelstein

Ein geringfügiger **Einfluss auf die Stimmung** einiger Pfeifen wurde beobachtet. Allerdings dürfte sich mittelfristig ein gegenüber dem Zustand ohne Temperierung stabileres Klima in der Orgel einstellen, sodass es dann auch seltener zu Verstimmungen kommen sollte, die durch Temperaturschwankungen im Kirchenraum hervorgerufen werden (siehe 2.2.4).

2.2.2 Anwendungsbeispiel für Heizteppiche: die Orgel in Geseke

In **Geseke** fanden im Rahmen eines ersten Tastversuches handelsübliche Heizteppiche Verwendung, die auf dem Fußboden im Orgelgehäuse unter dem Instrument und auf Laufbrettern in der Orgel ausgelegt wurden. Ein Ortstermin in Geseke zur Abstimmung mit der Gemeinde, den Bistumsvertretern, den Orgelsachverständigen und einem Elektriker fand im Oktober 2020 statt. Dabei wurden die Anzahl und Größe der Teppiche festgelegt. Die Umsetzung dieses Versuches erfolgte im Frühjahr 2021, weshalb eine solide Auswertung im Rahmen des Projektes SCHIK nicht mehr möglich war. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Teppiche nicht genug Wärme abgeben, um den Schimmelbefall signifikant zu hemmen. Der Versuch soll in einem Nachfolgeprojekt fortgeführt werden, wobei die Leistung der Anlage zu steigern wäre.

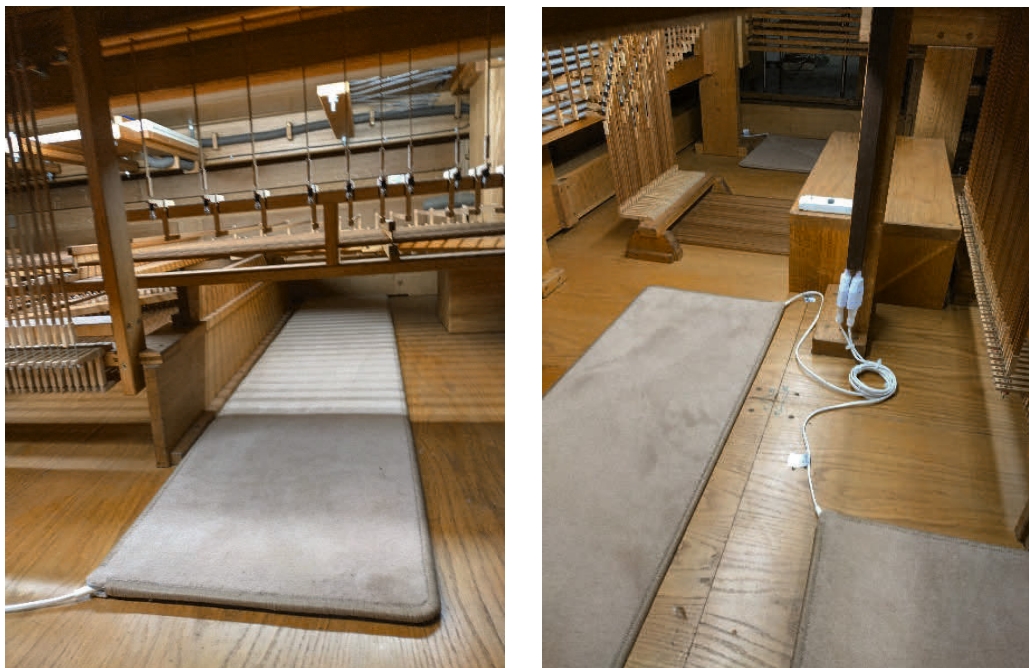


Abb. 53 Geseke: Heizteppiche in der Orgel. Im rechten Bild ist auf dem Kasten einer der fünf (weißen) Datenlogger zu sehen, die in der Orgel ausgelegt wurden.

2.2.3 Temperierung der Wand hinter der Orgel: die Orgel in der Christuskirche Karlsruhe

Als Alternative zu Heizkörpern und Heizteppichen könnte die **Wand hinter der Orgel** mittels IR-Folien oder einer Wandheizung temperiert werden. Häufig handelt es sich um eine kalte Westwand, sodass auf diesem Wege eine Auskühlung der Orgel entgegengewirkt werden könnte. Diesem Ansatz folgend wurde in der **Christuskirche**

Karlsruhe bereits 2010 hinter der Orgel eine Wandheizung installiert. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde 2020/21 überprüft, indem Klimadatenlogger im Kirchenraum und in der Orgel platziert wurden, um die Verhältnisse in der Orgel und im Kirchenraum zu erfassen und vergleichen zu können.



Abb. 54 Karlsruhe: Blick von der Empore zur Orgel (links), Heizleitungen an der Wand hinter der Orgel (rechts)

IDK	Diagramm 3	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\Eigene Dateien\aktuelle			K:1 [%rF] rel. Feuchte	29.90	76.80	49.88
Karlsruhe Christuskirche; Orgelgehäuse			K:2 [°C] Temperatur	7.00	30.00	16.72
Orgelgehäuse rel. Feuchte [rot]; Temp. [grün]			K:1 %rF	26.00	74.40	46.86
Kirchenschiff rel. Feuchte [dunkelblau]; Temp. [hellblau]			K:2 °C	7.30	26.40	16.76
Zeitraum: 06.10.2020 bis 21.03.2021						

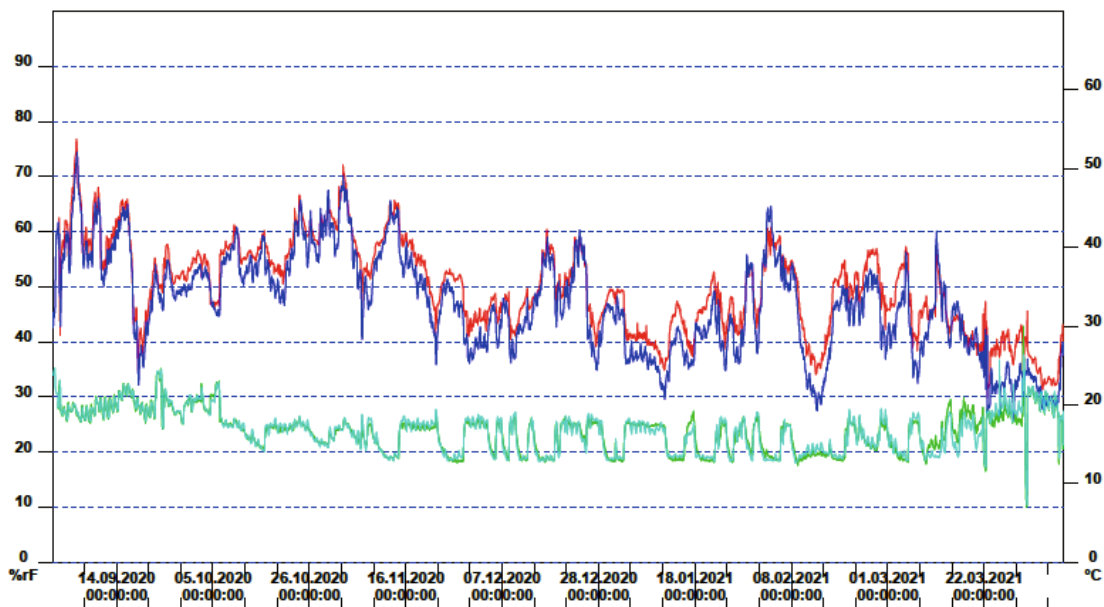


Abb. 55 Karlsruhe: Vergleich der Klimadaten aus dem Kirchenraum (rel. F. dunkelblau, Temp. hellblau) und dem Orgelgehäuse (rel. F. rot, Temp. grün)

Es zeigt sich, dass die Wand- und die Fußbodenheizungen im Laufe der gut zehn Jahre ihres Betriebs zu einem Austrocknungseffekt geführt haben: In der Kirche herrschen häufig sehr geringe Luftfeuchtwerte (siehe Abb. 55), weshalb inzwischen zwei Luftbefeuchter betrieben werden, um Trocknungsschäden an der Orgel und Ausstattung vorzubeugen. Dies zeigt, wie wichtig das ständige Klimamonitoring ist.

Die **Simulation einer geringfügig reduzierten Fußboden-und Wandheizung** um 1 K in Karlsruhe erbrachte keine nennenswerte Verbesserung hinsichtlich der Wachstumsbedingungen. Allerdings ist hierbei Vorsicht geboten, wie der Vergleich mit der Simulation einer Absenkung um 3 K zeigt.

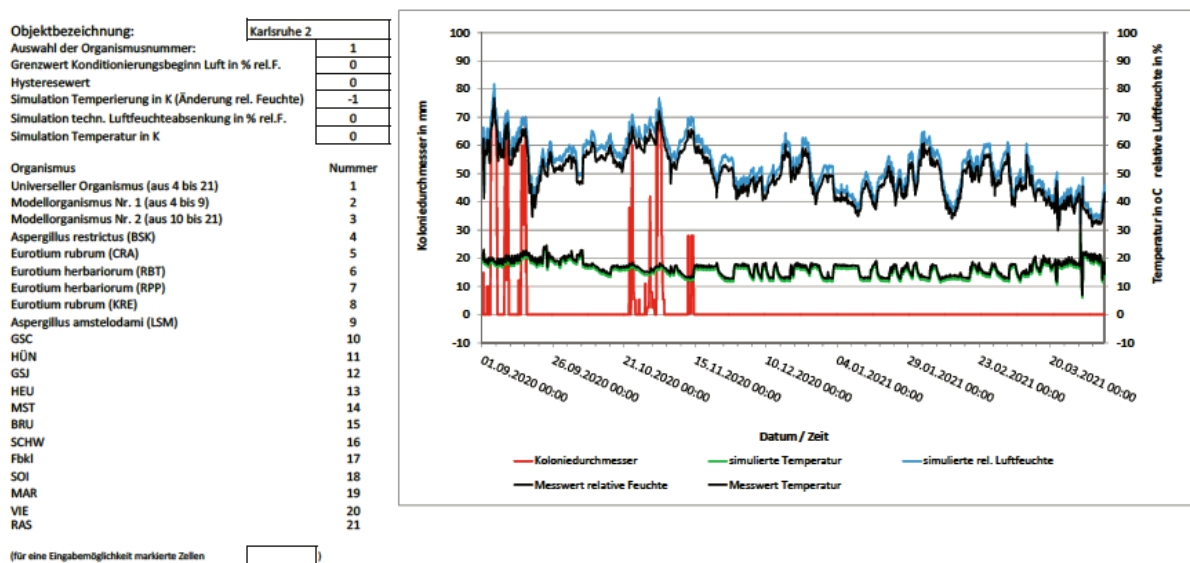


Abb. 56 Simulation der Wachstumsbedingungen in der Christuskirche Karlsruhe bei einer Absenkung der Heizung um 1 K

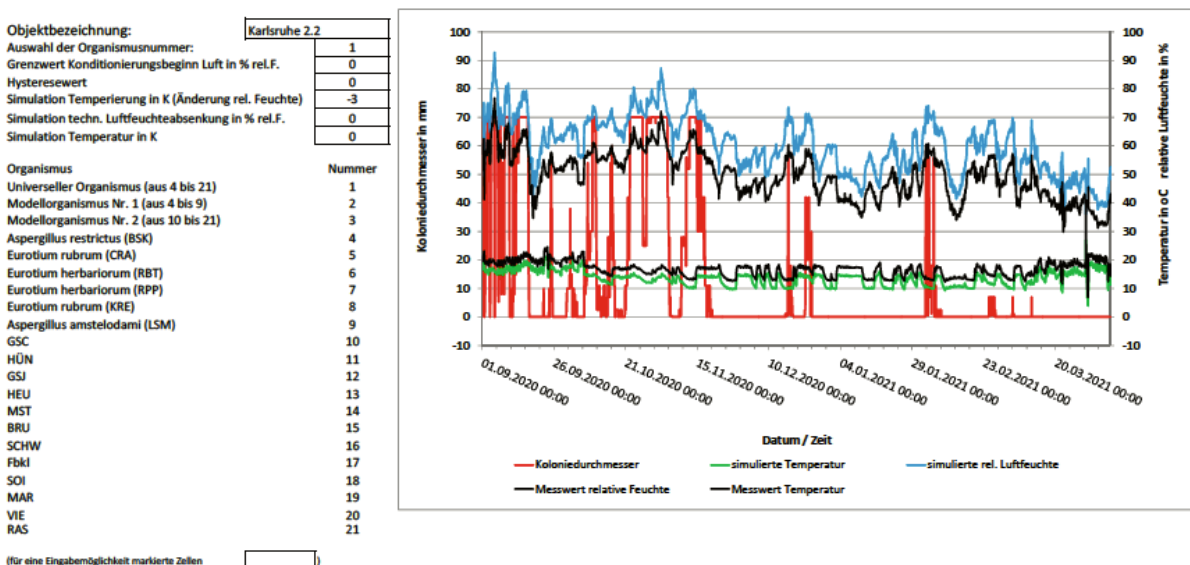


Abb. 57 Simulation der Wachstumsbedingungen in der Christuskirche Karlsruhe bei einer Absenkung der Heizung um 3 K

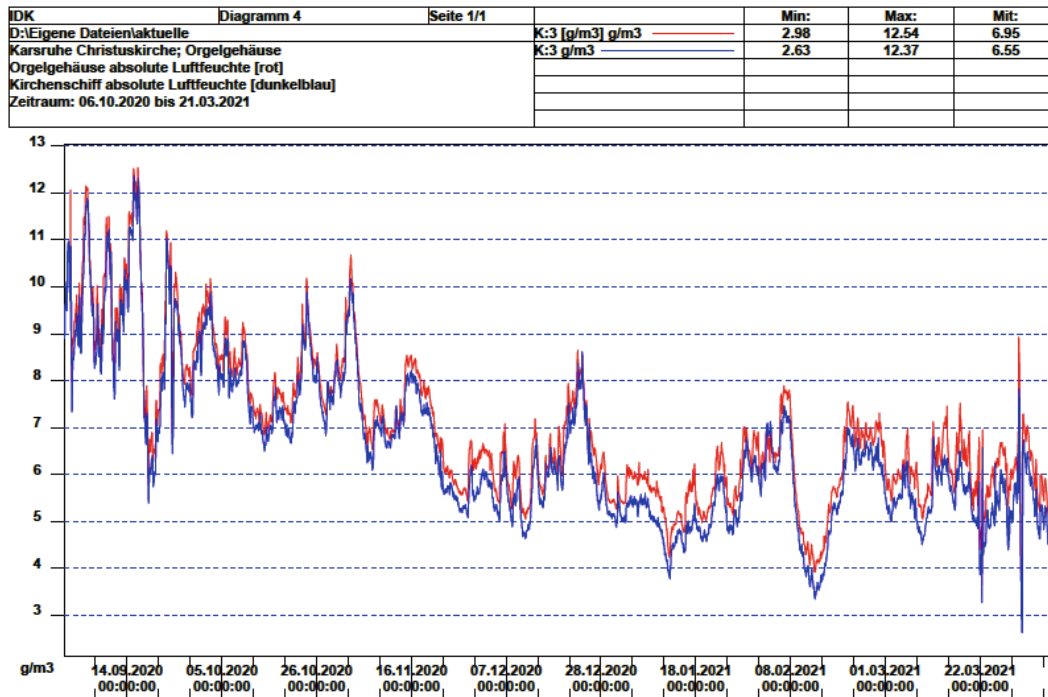


Abb. 58 Vergleich der absoluten Luftfeuchte im Kirchenschiff (blau) und im Orgelgehäuse (rot) in der Christuskirche Karlsruhe

2.2.4 Auswirkung einer Raumlufttemperierung auf die Stimmung einer Orgel am Praxisbeispiel der Orgel im Kloster Michaelstein

Nachdem der in Michaelstein zuständige Orgelbauer Zweifel bzgl. der Brauchbarkeit einer Temperierung angemeldet und die Vermutung geäußert hatte, dass diese mit einer Verstimmung der Orgel durch die Erwärmung der Luft im Orgelinneren einhergehe, wurde versucht, diesen Effekt durch ein gezieltes Anspielen gefährdeter Pfeifen – insbesondere kleine Pfeifen reagieren schneller auf Schwankungen der Lufttemperatur – nachzugehen und die klanglichen Veränderungen durch den Einsatz von elektronischen Stimmgeräten zu messen. Es zeigte sich, dass der Einfluss allenfalls das Ausmaß erreicht, das auch zu beobachten ist, wenn die Luft im Kirchenraum zum Gottesdienst oder Konzert durch eine verstärkte Raumheizung bzw. durch den Aufenthalt von zahlreichen Besuchern erwärmt wird.

Abweichungen bis 10 Cent werden als bereichernd empfunden, bringen im Vergleich zur reinen Stimmung Farbe in die Musik. Mit 15 Cent Abweichung hat man sich schweren Herzens abgefunden. Anders könnte man auf Tasteninstrumenten nicht alle Tonleitern spielen. Fürchterlich klingen Verstimmungen um die 40 Cent. Die durch die Temperierung der Orgel verursachte Verstimmung beträgt ein Zehntel des Toleranzbereiches der als „Couleur“ als willkommen gilt.

Pos.	Kriterium	Pfeife 1	Pfeife 2	Pfeife 3
1	gemessener Ton	a	a ¹	a ²
2	Pfeife	Principal 4`	Principal 4` a ⁰ Prospekt	Oberwerk 2` a ⁰
3	Tonhöhe in Hz, Temp. aus	222,2	444,8	889,3
4	Tonhöhe in Hz, Temp. an	222,8	445,4	891,0
5	Differenz in Hz	0,6	0,6	1,7
6	nächsthöherer Ganzton	h	h ¹	h ²
7	Tondifferenz des Stimmtons zum nächsthöheren Ton (Ganztonschritt) in Hz	26,9	53,9	107,8
8	Differenz in % eines Ganztonschrittes zum nächsthöheren Ton zwischen Heizung an und aus	2,2%	1,1%	1,6%
9	Streuung der Pfeifen 1-3 in der Differenz in % eines Ganztonschrittes zum nächsthöheren Ton und in Cent (Orgelbau) also Hundertstel eines Halbtonschrittes, jeweils zwischen Heizung an und aus (siehe Pos. 10)	1,1% = 2,2 Cent		
10	Streuung der Differenz in % eines Ganztonschrittes zum nächsthöheren Ton und in Cent (Orgelbau) also Hundertstel eines Halbtonschrittes, jeweils der drei Pfeifen untereinander im ungeheizten Zustand	0,7% = 1,4 Cent		

Tab. 6 Ergebnisse des Tonhöhenversuchs in Michaelstein

Der Grad der gemessenen Verstimmung des Instruments lässt sich durch eine noch gleichmäßigere Verteilung der warmen Luft im Orgelinneren sehr wahrscheinlich noch verringern.

2.2.5 Erprobung einer technischen Luftentfeuchtung zur Hemmung des mikrobiologischen Wachstums am Praxisbeispiel Hünhan und Wöllnitz

In **Soisdorf** und **Hünhan** versuchen die örtlich Verantwortlichen seit Jahren mit Entfeuchtern, die Oberflächenfeuchte in der Orgel abzusenken.

Hünhan wurde als Vertiefungsobjekt ausgewählt, weil vermutet wurde, dass der Schimmelbefall durch die technische Entfeuchtung zurückgegangen sei. Eine objektive Überprüfung dieses augenscheinlichen Eindrucks durch ATP-Tests und ein kontinuierliches Klimamonitoring hatte bei Projektbeginn noch nicht stattgefunden.

Bereits seit 2010 werden außerdem ein Fenster im Bereich der Orgelepore (Südseite) und eines im Bereich vor der Orgel (Nordseite) mittels automatischer Lüftungsampel geöffnet, um feuchte Luft aus dem Kirchenraum abzuführen. (Wie oft diese Lüftungssituation in Hünhan eintritt und wie wirksam die Lüftung hier ist, konnte im Projektrahmen nicht berechnet werden). 2016 wurde ein **Luftentfeuchter** in der Orgel aufgestellt, der nach außen entwässert. Das Gerät ist auf einen Zielwert von 60% rel. F. eingestellt.

Bei einem Besuch in Hünhan am 18.02.2019 wurde dennoch eine **hohe Aktivität der Pilze (*Aspergillus glaucus*)** festgestellt. Damals herrschten eine rel. Luftfeuchte von 48 % rel. F. bei 11,5 °C auf der Orgelepore und 50% rel. F. bei 11,3°C im Kirchenschiff. Aus dem Klimadiagramm (Abb. 59) ist ersichtlich, dass die relative Luftfeuchte in der Orgel sehr häufig oberhalb von 60% rel. F. liegt und die Lufttemperatur sich zwischen etwa 8 und 25 °C bewegt. Somit bestehen fast ganzjährig Voraussetzungen für ein Schimmelwachstum, wobei die Situation im Winter kritischer erscheint als jene im Sommer.

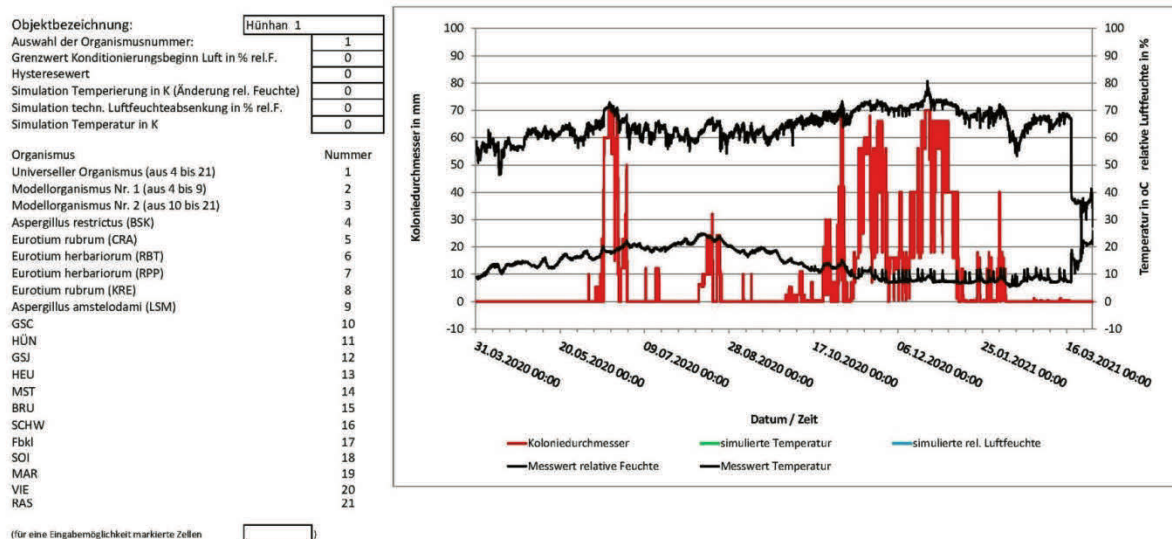


Abb. 59 Klimadiagramm für die Kirche in Hünhan mit den simulierten Wachstumsbedingungen:
vor allem im Winter bestehen gute Voraussetzungen für ein Schimmelwachstum

Die vorhandene technische Entfeuchtung scheint das Schimmelwachstum im Sommer zu hemmen. Laut Auskunft der örtlich Verantwortlichen werden der Raumluft im Laufe eines Jahres tatsächlich mehrere Hundert Liter Wasser entzogen. Vorerst unklar bleibt, welchen Einfluss das zu Lüftungszwecken regelmäßig automatisch geöffnete Fenster hinter der Orgel besitzt und insgesamt die Außenluft.

Objektbezeichnung:	Hünhan 2.2
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	60
Hysteresewert:	2
Simulation Temperierung in K (Änderung rel. Feuchte)	3
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Simulation Temperatur in K	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSJ	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

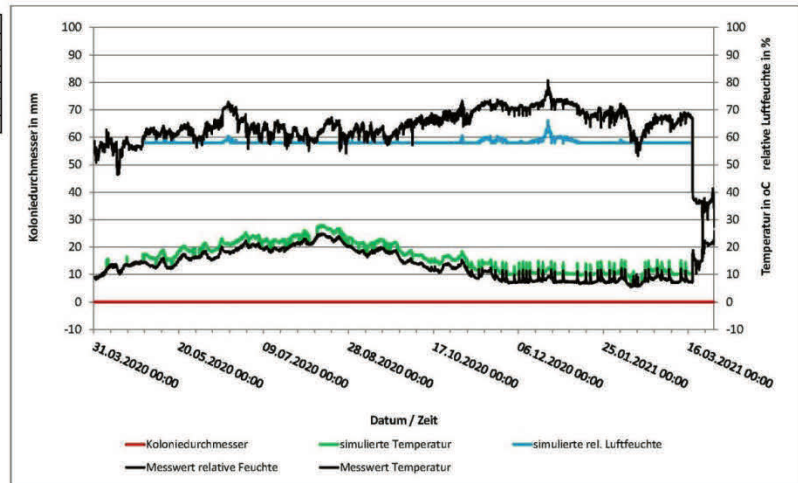


Abb. 60 Klimadiagramm für die Kirche in Hünhan mit den simulierten Wachstumsbedingungen bei einer ganzjährigen Temperierung der Orgel um 3 K. (Die Leistung des vor Ort vorhandenen Entfeuchters wird in der Simulation vernachlässigt).

Die Simulation zeigt auch, dass der Wirkungsgrad des **Entfeuchters im Winter** signifikant nachlässt, weshalb dann günstige Wachstumsbedingungen eintreten. Dies dürfte daran liegen, dass das Entfeuchtungsgerät die Luft zur Entfeuchtung kühlt, was bei geringen Raumtemperaturen weniger gut funktioniert als im Sommer. Für den Winter würde sich deshalb eine geringfügige Temperierung der Orgel anbieten. Zur Verbesserung der Situation könnte zunächst eine mobile Temperierung mit Heizkörpern oder/und Teppichen/Folien erprobt werden, wobei diese als Alternative zur technischen Entfeuchtung (im Winter/ganzjährig) und in Kombination zur Entfeuchtung eingesetzt werden könnte.

Als **Vergleich zu Hünhan** diene ein messtechnisch begleiteter Versuch in **Jena-Wöllnitz**. Mit einem in der Poppe–Orgel aufgestellten Raumlufentfeuchter sollte die relative Luftfeuchte im Orgelgehäuse auf einen definierten Wert abgesenkt und möglichst stabil auf diesen Wert gehalten werden. Dieser Versuch erfolgte im Zeitraum vom 16. September 2020 bis zum April 2021, wobei der Raumlufentfeuchter nur im Zeitraum 16. September bis 16. Dezember 2020 in Betrieb war. Die Orgel in Wöllnitz wurde ausgewählt, weil sie ein im Verhältnis zu anderen Instrumenten geschlossenes Gehäuse besitzt. Das Gerät vom Typ Dehumid 2 der Firma Luftbefeuchtung Proklima GmbH (Brune) war eine Leihgabe des Landesamts für Denkmalpflege Sachsen (LfDS).



Abb. 61 Wöllnitz, links Ortstermin (2016), rechts der Raumlufentfeuchter mit dem Vorschaltgerät für die gezielte Zuschaltung des Entfeuchtungsprozesses in der Orgel (2020)

Als Zielwert wurde zunächst 70 %, ab dem 11.11.2020 65% rel. F. eingestellt. Das Gerät, das bei einer Leistungsaufnahme von 620 W eine Entfeuchtungsleistung von bis zu 0,75 l/h erbringt, wurde hinsichtlich des Ansaugens bzw. Ausblasens der Luft nach Westen ausgerichtet, so dass keine empfindlicheren Teile der Orgel direkt erreicht wurden.

Für einen gezielten und möglichst genauen Schaltvorgang des Raumlufentfeuchters wurde ein sogenanntes **Vorschaltgerät** der Firma PASStec GmbH genutzt. Mit Hilfe dieses Vorschaltgerätes kann der Entfeuchtungsprozess genauer geschaltet werden. Als Zielwert wurde zunächst 70 %, ab dem 11.11.2020 65% rel. F. eingestellt. Der Entfeuchter war außerdem mit einem **Stromzähler** ausgerüstet, um den Energiebedarf zu ermitteln und verblieb an Ort und Stelle bis zum 16.12.2020. Das Ehepaar Fricke, dem an dieser Stelle zu danken ist, besorgte die Leerung des Wasserbehälters des Entfeuchters.

Die Messungen werden bis 16.12.2020 durchgeführt. Eine Zwischenauswertung durch Herrn Löther ist vorgesehen.

Eine regelmäßige Kontrolle des Entfeuchters und Entfernung des Wassers ist erforderlich.

Datum	Feuchte	Wassermenge
16.9.2020	62 %	-
19.9.2020	52 %	-
20.9.2020	57 %	-
~ 21.9.	61 %	-
30.9.	56 %	-
4.10.	56	-
7.10	61 %	-
24.10	62 %	5 l
1.11.20	66 %	> 2 l
7.11.20	60 %	5 l
11.11.20	62 %	- Herr Löther → vtm
18.11.20	66 %	10 l
26.11.20	60 %	~ 8-9 l
5.12.20	60 %	5 l
13.12.20	60 %	3 l
16.12.20	62 %	0,2 l

65 %
60 %

Abb. 62 Protokoll über die während des Entfeuchterversuchs in Wöllnitz angefallene Wassermenge (Fricke). Nach der am 11.11.2020 erfolgten Senkung des Zielwerts von 70% auf 65 % rel. F. fielen bis zu 10 l pro Woche an.

In der Orgel wurden zwei **Datenlogger**, ein weiterer außen über dem Spieltisch positioniert. Als Messtakt für die Erfassung der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchte wurde 15 Minuten festgelegt.



Abb. 63 Wöllnitz, Datenlogger über dem Spieltisch

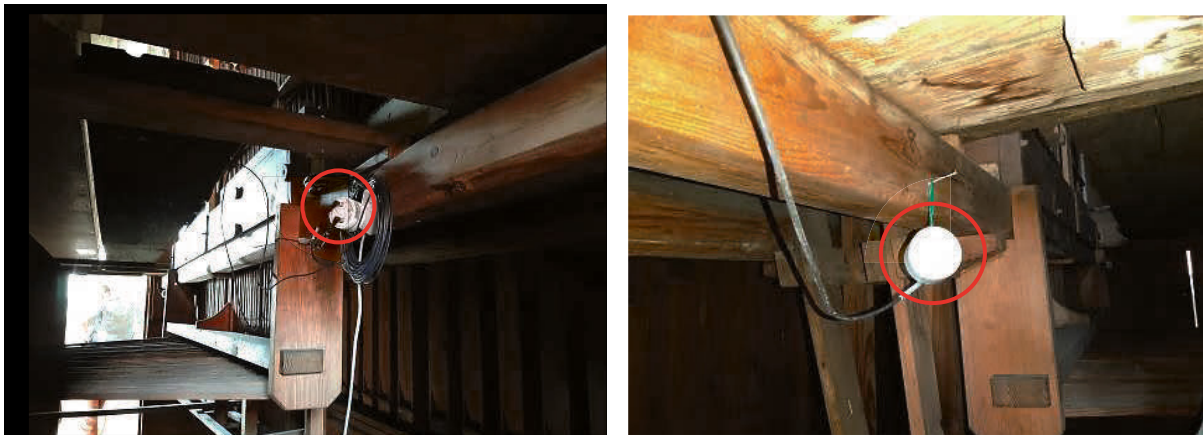


Abb. 64 Wöllnitz, Datenlogger in der Orgel

Die relative Luftfeuchte lag im Versuchszeitraum (16.09./11.11. bis 16.12.2020) zwischen etwa 55% rel. F. und knapp über 70% rel. F. Nach Beendigung der technischen Entfeuchtung stieg die Raumluftfeuchte in der Orgel recht zügig wieder auf Werte über 70 % rel. F. Bis Ende März 2021 bewegten sich die Feuchtwerte in diesem Bereich.

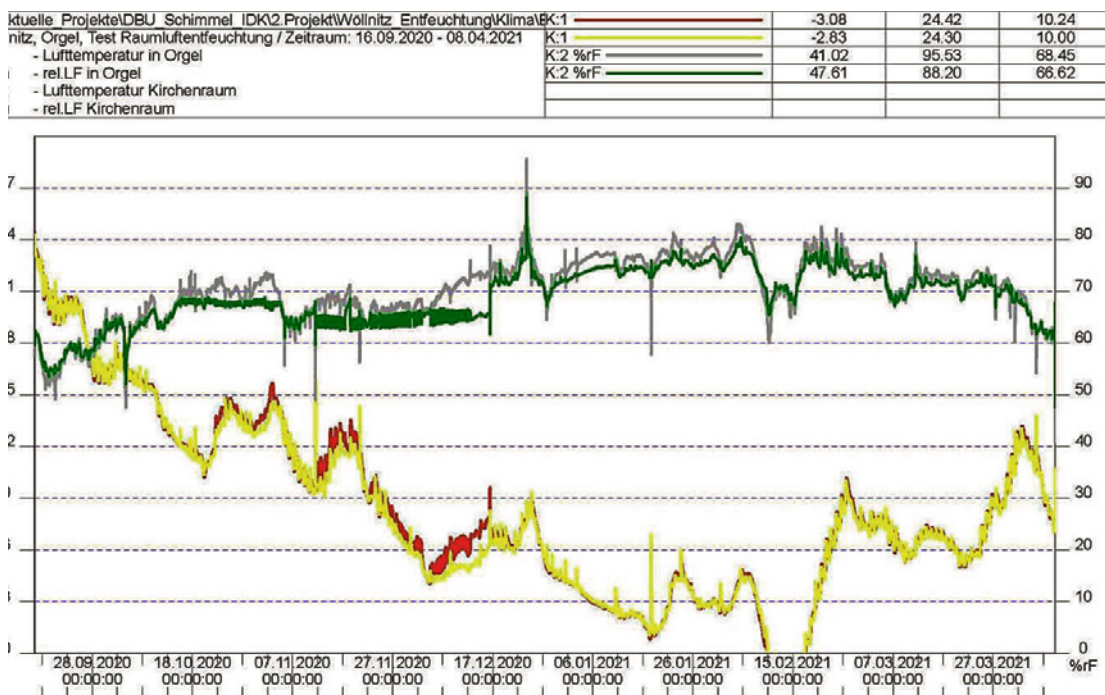


Abb. 65 Klimadiagramm für die Orgel in Wöllnitz für die Zeit während (16.09.2020 – 16.12.2020) und nach dem Trocknungsversuch. Die Betriebsphase und Leistung des Entfeuchters sind an der grünen Kurve sichtbar. Insbesondere zwischen dem 11.11.2020 und dem 16.12.2020, als das Gerät auf einen Zielwert von 65% rel. F. eingestellt war, ist die Reduktion und Stabilisierung der Luftfeuchte erkennbar.

Die Lufttemperatur in der Kirche und der Orgel sank jahreszeitlich bedingt im Untersuchungszeitraum (16.09. bis 16.12.2020) von etwa 20 °C auf 5 °C ab. Im Frühjahr 2021 wurde sogar die Frostgrenze mit -3°C deutlich unterschritten. Auch

wenn zwischen Ende Dezember bis Mitte Februar die Lufttemperaturen fast immer unter 6 °C lagen und es somit für ein Pilzwachstum zu kalt war, wurden ansonsten doch meistens Werte im kritischen Bereich über 6°C gemessen, in dem Schimmelwachstum noch stattfindet. Durch den Betrieb des Entfeuchtungsgerätes kam es im Orgelgehäuse zu einer leichten Temperaturerhöhung von ca. 1 K. Für ATP-Tests wurden Flächen an der Innenseite des Gehäuses (Cis-Seite) untersucht. Die Tests ergaben folgende RLU-Werte pro 4 cm² (1 cm²):

	16.09.2020	16.12.2020
Links der Tür	7.405 (1.851)	940 (235)
Rechts der Tür	3.037 (759)	604 (151)

Tab. 7 Ergebnisse der ATP-Werte in der Wöllnitzer Orgel bei Versuchsbeginn und -ende

Die Aktivität der Pilze konnte durch die Entfeuchtung offenbar reduziert werden (siehe Tab. 7). Allerdings stellt sich die Frage, ob eine leichte Temperierung der Orgel im Zeitraum Oktober bis März nicht günstiger wäre als die technische Entfeuchtung, deren Wirksamkeit bei kühlen Raumtemperaturen nachlässt (vgl. 2.1.5). Im Zeitraum Ende Dezember bis Mitte Februar lagen die Lufttemperaturen fast immer unter 6 °C, es war somit für ein Pilzwachstum zu kalt.

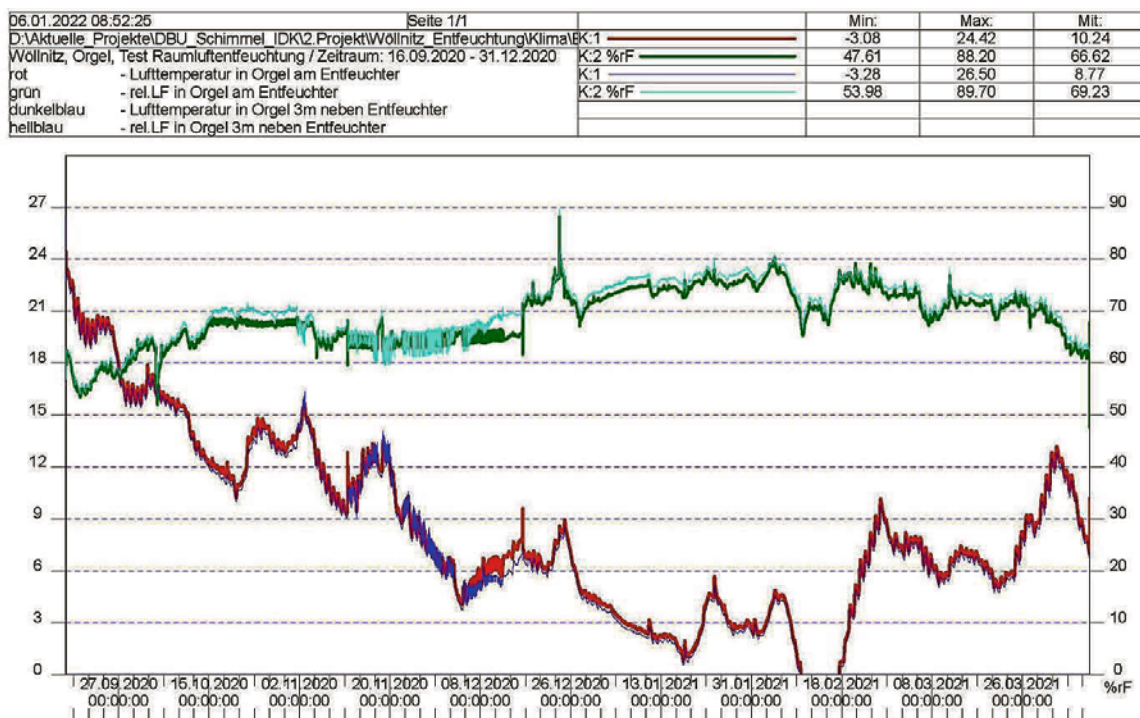


Abb. 66 Klimadiagramm für die Orgel in Wöllnitz mit den Werten der beiden Klimamesspunkte in der Orgel

Die beiden in der Orgel eingerichteten Messpunkte zur Raumklimaerfassung – der eine im Nahfeld des Raumlüftentfeuchters, der zweite ca. 3 m entfernt – lieferten während der technischen Trocknung Raumklimadaten, die sich leicht aber erkennbar unterschieden. Bei größeren oder „verbauteren“ Orgelgehäusen ist von einer größeren Spreizung der Werte auszugehen. Dies gilt es bei der Konzeption eines Klimamonitorings (Anzahl und Positionierung der Datenlogger) zu bedenken.

2.2.6 Bewertung des Energieverbrauchs: Entfeuchter versus Temperierung versus Erhöhung der Grundtemperatur

Der Entfeuchterversuch in **Wöllnitz**, der an den entsprechenden Versuch in Hünhan anschloss, wurde hinsichtlich des Energieaufwandes mit dem Temperierungsversuch in **Michaelstein** näherungsweise verglichen. Außerdem wurden die Gesamtkosten (Anschaffung der Heizelemente oder Entfeuchter samt Steuerung und Stromzähler, Installation, Betrieb) mit den Verbrauchskosten verglichen, die in **Scharfenberg**, wo bislang keine baulichen Veränderungen vorgenommen wurden, in Folge der etwas höheren Grundtemperierung der Kirche (von 8°C auf 11°C) zustande kamen.

Die Verbrauchsdaten aus **Scharfenberg** stellte die Gemeinde der Projektgruppe auf Anfrage zur Verfügung. Es zeigt sich, dass die Gas-Verbräuche seit 2016 etwa 20 bis 25% höher liegen als 2015.

Jahr	Stromverbrauch	Gasverbrauch
2015	3284 kWh	4828 m ³
2016	3506 kWh	5893 m ³
2017	3455 kWh	5816 m ³
2018	3680 kWh	6310 m ³
2019	3999 kWh	5738 m ³

Tab. 8 Energieverbräuche in der Kirche in Scharfenberg vor und nach Erhöhung der Grundtemperatur (2016)

Bei einem Gaspreis von aktuell 0,60 Euro pro m³ (April 2022) ergeben sich aus einem durchschnittlichen Mehrverbrauch von 1.000 m³ Gas in **Scharfenberg** jährlich ca. 600 Euro. Hinzuzurechnen ist der Mehrverbrauch für Strom, wobei für 1 kWh derzeit ca. 0,40 Euro anfallen, für 400kW/h somit ca. 160 Euro anzusetzen sind. Daraus resultieren jährliche Mehrkosten in Höhe von insgesamt 760 Euro.

Eine Beispielrechnung ergab für den Betrieb des Entfeuchters in **Wöllnitz** über durchschnittlich 11 h/Tag ca. 1–2,25 Euro pro Tag. Dabei wird eine Leistungsaufnahme von bei 270W bzw. 620W zugrunde gelegt. Innerhalb eines Jahres

kämen somit ca. 360 bis 700 Euro zusammen. Hinzuzurechnen sind die regelmäßigen Wartungskosten und eine Neuanschaffung nach einer gewissen Laufzeit der Technik. Die Kirche in Wöllnitz verfügt über eine Bankheizung und Elektroheizkörper, die zu Gottesdiensten betrieben werden.

Demgegenüber ergab die Beispielrechnung für **Michaelstein** ca. 5 Euro pro Tag, was jährliche Kosten in Höhe von ca. 1.800 Euro bedeuten. Zu bedenken ist, dass die Kapelle nicht beheizt ist.

Für den **Einbau der Temperierungsanlage** in Michaelstein fielen ca. 2.800 Euro an. Ein leistungsstarker **Entfeuchter**, der auch bei geringen Raumlufttemperaturen eine hohe Entfeuchterleistung aufweist, kostet ca. 1.000 bis 2.000 Euro.

Für die lokale **Temperierung** wie auch die „**optimierte**“ **Beheizung** des Kirchenraums (Scharfenberg) spricht, dass keine regelmäßige Wartung – Leeren des Wasserbehälters, Vermeidung von Wasserschäden durch Aus-/Überlaufen – notwendig sind.

Die Temperierung der Orgel, die sich im Projekt als ganzjährig wirksam erwiesen hat, ist mit den höchsten Kosten verbunden. Der kostengünstigere Entfeuchter hat jedoch den Nachteil, im Winter nicht so wirksam zu sein wie im Sommer. Für technische Entfeuchter, die auch bei kühleren Temperaturen eine hohe Entfeuchterleistung erbringen, entstehen etwas höhere Anschaffungskosten.

Zur Vermeidung von Schimmelbildung an Orgeln dürfte in vielen Fällen eine **Verfahrenskombination** aus Temperierung und Entfeuchtung sinnvoll sein. Die höheren Anschaffungskosten dürften über die Zeit durch einen geringeren Aufwand an Betriebsenergie ausgeglichen werden. An dieser Stelle ist noch einmal festzustellen, dass das hier vorgestellte Projekt das Ziel hatte, zur Vermeidung von Schimmelbefall wirksame Technologien exemplarisch zu erproben. Die energetische Optimierung dieser Verfahren bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Vor dem Hintergrund, dass manche Gemeinden sich gezwungen sehen, Ausgaben für die Anschaffung von Technik wie auch die laufenden Kosten stark zu minimieren, wurde im Projekt auch nach weniger kostenintensiven Alternativen gesucht.

2.2.7 Erprobung der Auswirkung einer Dämmplatte auf die Raumklimasituation in der Orgel in Freiberg

Hinter der kleinen Silbermannorgel, die auf der nördlichen Umgangsempore des **Freiberger Domes** steht, wurde im Februar 2020 eine Dämmplatte angebracht. Auf diese Weise sollte die Orgel von den kalten Außenwänden abgekoppelt werden. Zwar gibt es – entgegen landläufiger Vorstellungen – keine Kältestrahlung von einer kalten Außenwand auf relativ wärmere Objekte, die sich im Inneren vor dieser Wand befinden. Der „Wärmefluss“ bewegt sich in umgekehrter Richtung. Das relativ zur Wand wärmere Orgelgehäuse verliert seinerseits Wärme in Richtung der kalten Wand. Dieser Effekt sollte durch die Dämmplatte unterbunden werden.

Die kleine Silbermannorgel im Freiburger Dom steht vor zwei kalten Außenwänden: die C-Seite an der Nordwand, die Rückseite an der Ostwand.¹² Der Standort an der kalten Außenwand begünstigt die Schimmelbildung: die Orgel kühlt aus, während besonders bei Gottesdiensten und Konzerten mit der relativ wärmeren Raumluft Feuchtigkeit in die Orgel gelangt (siehe Abb. 69), die den Pilzen dann an den Oberflächen zur Verfügung steht. Dieser Effekt – die Abkühlung der Raumluft an den kalten Orgeloberflächen führt zum Ansteigen der rel. Luftfeuchte im Kontaktbereich der Raumluft zur Orgeloberfläche auf kritische Werte – sollte durch den passiven Schirm gemindert, die Voraussetzung für die Schimmelbildung verschlechtert werden.

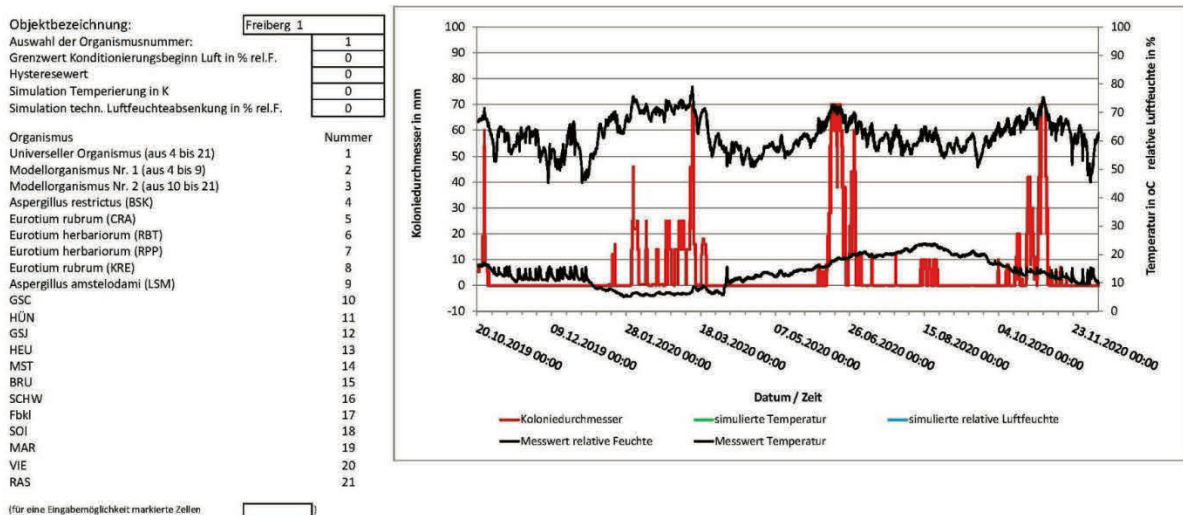


Abb. 67 Klimadiagramm für die Kleine Silbermannorgel in Freiberg mit den simulierten Wachstumsbedingungen Oktober 2019 bis November 2020

¹² Die ursprünglich für eine andere Kirche gebaute kleine Silbermann-Orgel steht seit den 1930er Jahren an diesem Ort. Nach Aussage des Organisten lag damals ein weiteres Angebot vor, das eine aus klimatischer Sicht günstigere Positionierung vorsah, welches aber von den damals Verantwortlichen abgelehnt wurde. Die große Silbermann-Orgel auf der Westempore ist weniger von Schimmelbefall betroffen.

Der messtechnisch begleitete Versuch zur Wirkung einer partiellen Oberflächendämmung der Außenwand erfolgte im Zeitraum von Februar 2020 bis Juli 2021. An der nördlichen Außenwand wurde eine Fläche von 2,16 m² mit einer **Extruderschaum-Dämmplatte** versehen. Dabei handelte es sich um XPS Hartschaumplatten (je 120cm x 60cm x 4cm), deren Wärmeleitfähigkeit der Hersteller mit 0,04 W/mK angibt.

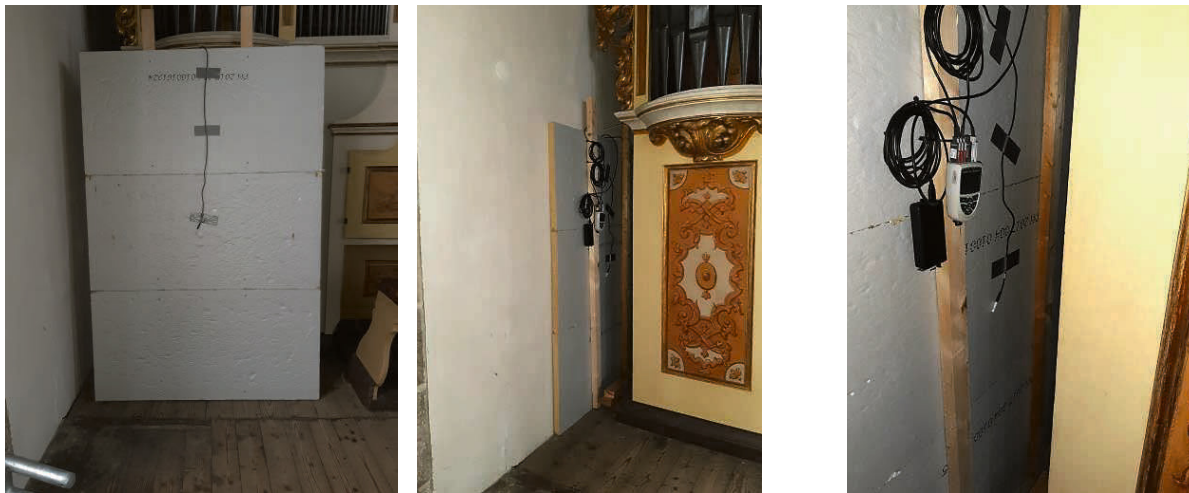


Abb. 68 Links Messfühler (1) auf der Außenseite der Dämmplatte vor deren Positionierung, Mitte: Dämmplatte nach der Positionierung zwischen Außenwand und Orgel, rechts Datenlogger (2) auf der Innenseite

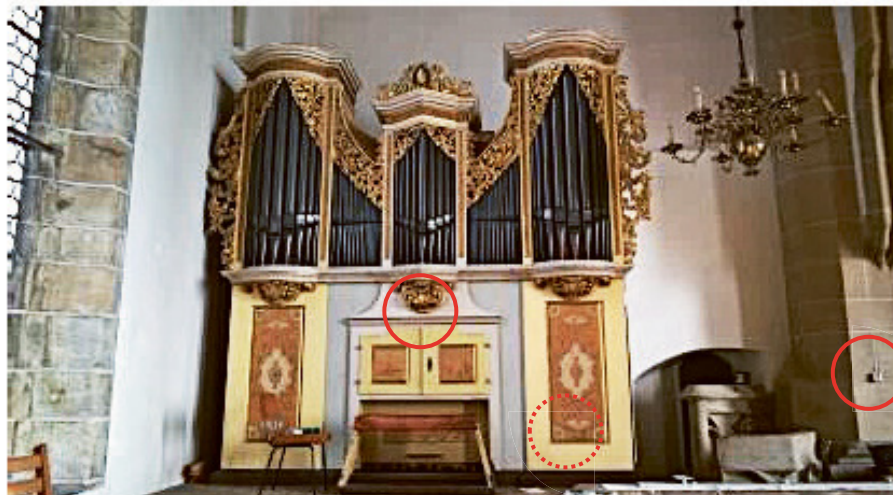


Abb. 69 Messfühler (4) in der Orgel, Messfühler (5) im Kirchenraum im Bereich der kleinen Silbermannorgel

Klimasensoren wurden an fünf Messpunkten installiert: (1) hinter der Dämmplatte auf der der Außenwand zugewandten Seite, (2) auf der der Orgel zugewandten Innenseite der Dämmplatte, (3) direkt vor der Außenwand, (4) in der Orgel und (5) im Kirchenraum. Der Messtakt betrug an den Messpunkten 15 Minuten.

04.12.2021 18:13:30		Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle Projekte\DBU_Schimmel_IDK2.Projekt\Freiberg_Dämmung\Messdate	K.1 °C	4,66	12,90	7,46		
Dom - Freiberg - Versuch Dämmplatte	K.2 %rF	55,50	68,40	62,11		
rot / grün - Klima hinter Dämmplatte	K.3 °C	5,94	17,29	9,58		
d-blau / h-blau - Klima vor	K.4 %rF	45,30	61,10	54,80		
Dämmplatte	K.5 °C	5,60	16,19	8,92		
magenta / gelb - Klima ohne Dämmplatte	K.6 %rF	47,70	61,20	56,13		
grau / lila - Klima in Orgel						

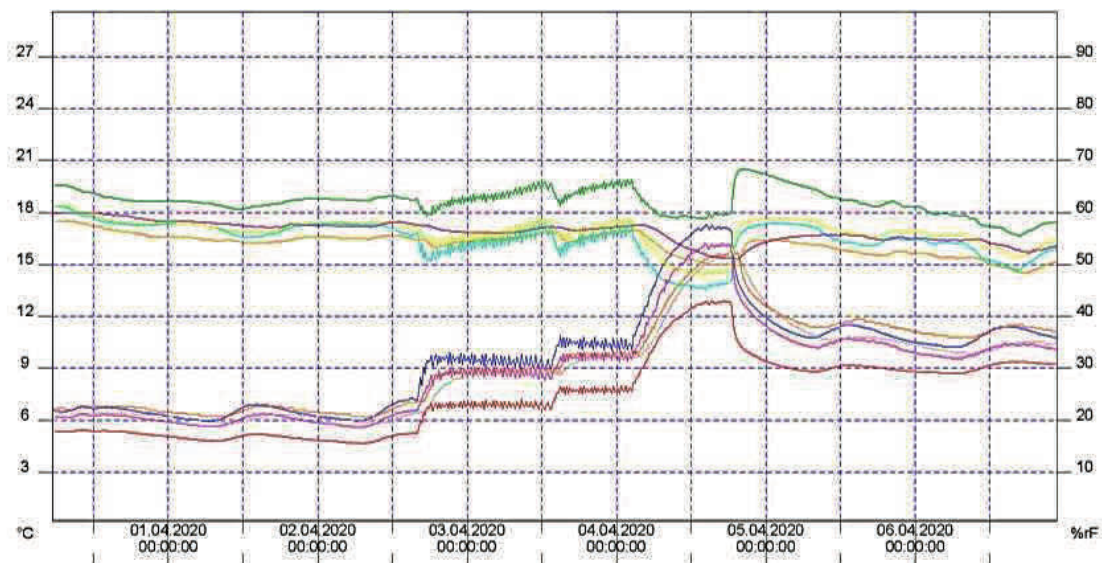


Abb. 70 Klimadaten der Messfühler (1) rot/grün Lufttemperatur/ rel. F. hinter der Dämmplatte, (2) dunkelblau/hellblau vor Dämmplatte, (3) magenta/gelb an der Außenwand (ohne Dämmplatte), (4) grau/lila in der Orgel, (5) orange/ocker im Raum

Die **Klimawerte** hinter der Dämmplatte zeigten im Messzeitraum Februar 2020 bis Juli 2021 die geringste Raumklimabeeinflussung aber auch die „negativsten“ Klimawerte mit geringen Temperaturwerten und demzufolge höheren Werten der relativen Luftfeuchte (Abb. 70). Alle anderen Klimawerte, die vor oder in der Kleinen Silbermannorgel gemessen wurden, waren nahezu identisch. Einzelne Aufheizereignisse durch die vorhandene Warmluftheizung im Kirchenschiff für Veranstaltungen sind in den Messdaten gut erkennbar. Je nach Messpunkt reagieren die Lufttemperaturen verzögert auf diese Warmluft.

Im Zustand **ohne Heizung** sind kaum nennenswerte Unterschiede bei den Klimawerten erkennbar. Der Messpunkt hinter der Dämmplatte (1) stellt jedoch eine Ausnahme dar: hier bleiben die Temperaturwerte kühler (siehe Abb. 71). Die Messpunkte vor der Dämmplatte (2) und vor der nicht gedämmten Außenwand (3) werden folglich mehr vom Raumklima beeinflusst, als von der kühleren Außenwandsituation.

05.12.2021 09:52:52		Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle Projekte\DBU_Schimmel_IDK2.Projekt\Freiberg_Dämmung\Messdate	K.1 °C			4.70	7.88	5.81
Dom - Freiberg, Versuch Dämmplatte	K.2 %rF			67.30	83.40	74.54
rot / grün - Klima hinter Dämmplatte	K.3 °C	d-blau / h-blau - Klima vor		5.64	9.84	6.77
Dämmplatte	K.4 %rF			63.80	80.20	71.45
magenta / gelb - Klima ohne Dämmplatte	K.5 °C	orange / ocker - Raumklima		5.22	8.80	6.28
grau / lila - Klima in Orgel	K.6 %rF			64.90	81.90	72.38

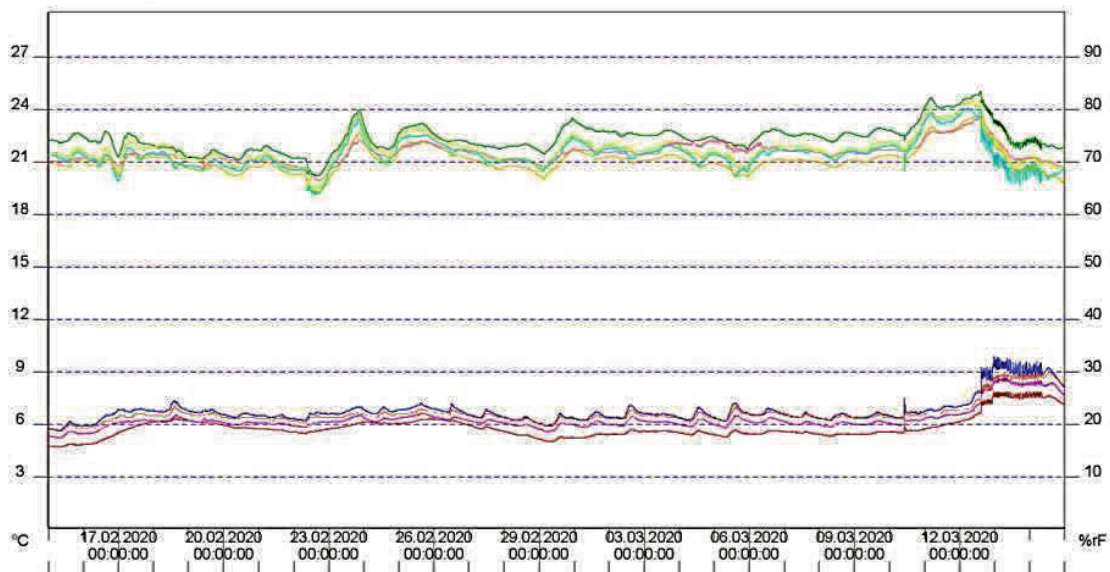


Abb. 71 Klimadaten der Messfühler 1 bis 5 im Zustand ohne Heizung

05.12.2021 09:57:15		Seite 1/1		Min:	Max:	Mit:
D:\Aktuelle Projekte\DBU_Schimmel_IDK2.Projekt\Freiberg_Dämmung\Messdate	K.1 °C			3.86	13.18	6.81
Dom - Freiberg, Versuch Dämmplatte	K.2 %rF			43.60	75.30	62.22
rot / grün - Klima hinter Dämmplatte	K.3 °C	d-blau / h-blau - Klima vor		6.17	17.34	9.16
Dämmplatte	K.4 %rF			33.30	68.10	54.46
magenta / gelb - Klima ohne Dämmplatte	K.5 °C	orange / ocker - Raumklima		5.54	16.53	8.43
grau / lila - Klima in Orgel	K.6 %rF			34.70	69.20	56.01

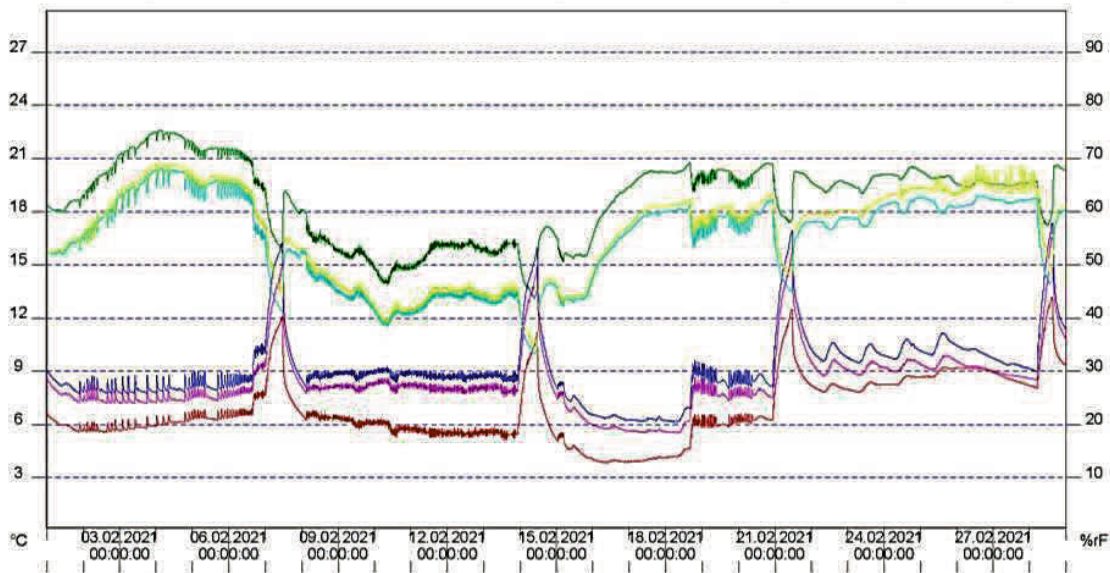


Abb. 72 Klimadaten der Messfühler 1 bis 5 im Zustand mit Warmluftheizung

Bei eingeschalteter **Warmluftheizung** kommt es nur zu geringen Abweichungen bei den Klimawerten vor der Dämmplatte und im nicht gedämmten Messbereich. Die Messwerte hinter der Dämmplatte weichen jedoch deutlich und erwartungsgemäß vom

Raumklima ab. Der Messpunkt vor der Dämmplatte wird mehr vom Raumklima beeinflusst, als von der kühleren Außenwand (Abb. 72).

Auf der Grundlage dieser Messdaten – leider gingen die Daten für Ende August bis Anfang Dezember 2020 durch einen technischen Fehler verloren – wurden die Wachstumsbedingungen auf der der Außenwand zugewandten Außenseite und der dem Kirchenraum zugewandten Innenseite der Dämmplatte simuliert.

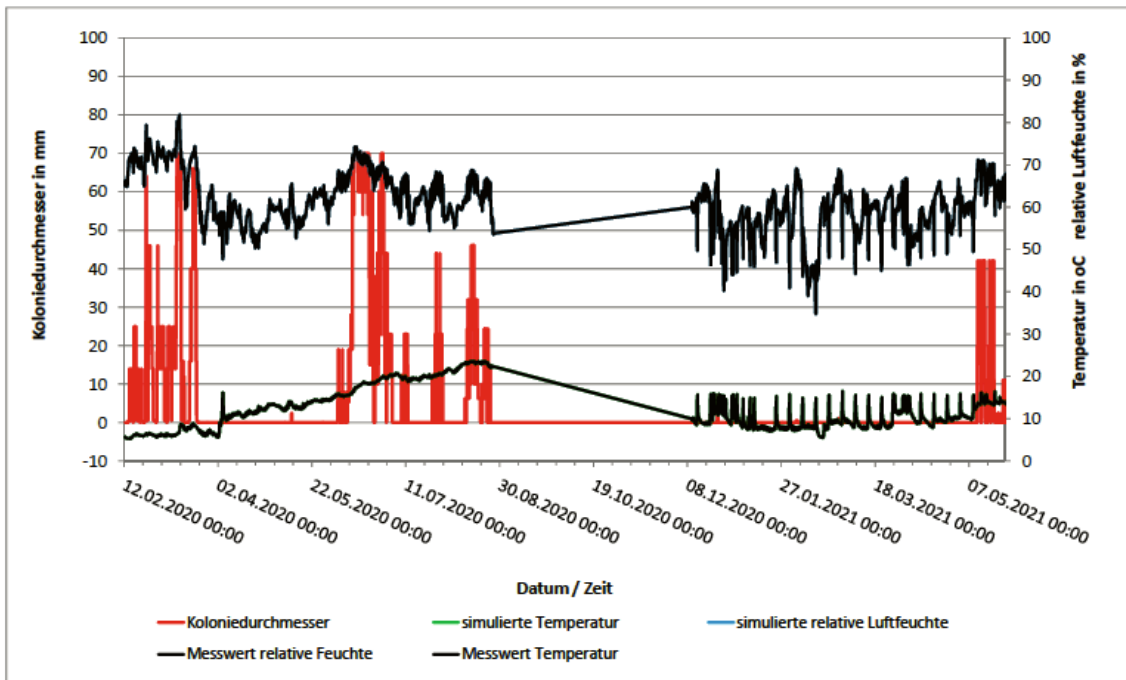


Abb. 73 Simulation der Wachstumsbedingungen auf der Außenseite der Dämmplatte (Datenverlust für den Zeitraum Ende August bis Anfang Dezember 2020)

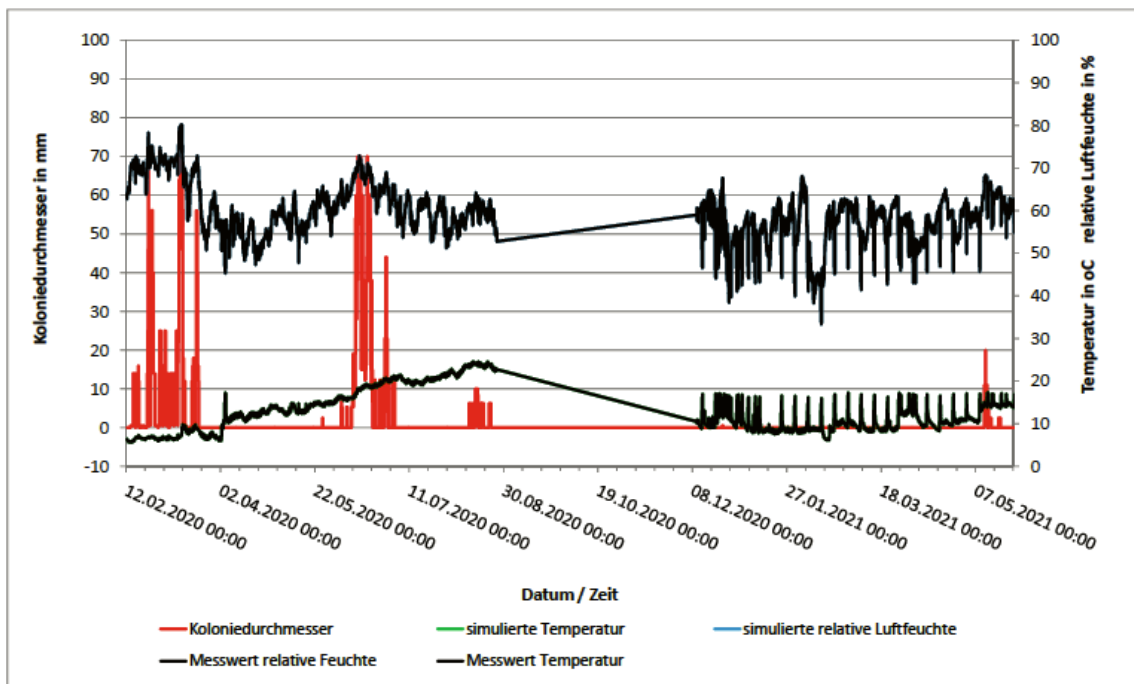


Abb. 74 Simulation der Wachstumsbedingungen auf der Innenseite der Dämmplatte (Datenverlust für den Zeitraum Ende August bis Anfang Dezember 2020)

Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt, dass vor der Dämmplatte insbesondere im Juli und August 2020 sowie im Mai 2021 deutlich seltener Wachstumsbedingungen für die Pilze auftraten. Dieses Ergebnis bedeutet, dass mit dem geringen Aufwand einer Dämmplatte zumindest eine messbare Verbesserung hinsichtlich der Minderung eines Schimmelrisikos zu erreichen ist.

Die **Wirkung der Wärmedämmplatte** vor der kühleren Außenwand im Freiburger Dom wäre vermutlich höher, wenn der Raum eine höhere Grundtemperierung erführe und damit auch die Orgel stärker erwärmt würde. Die Wärmedämmplatte würde die Abgabe der Wärme aus der Substanz der Orgel an die kalte Außenwand verhindern.

Orgeln in konstant beheizten Räumen mit einer geringeren Differenz zwischen Grundtemperierung und Zieltemperatur könnten folglich besonders von einer Dämmung profitieren, etwa wenn sie auf den verhältnismäßig kühleren Westemporen stehen. Auch die Erhöhung der Grundtemperatur ist insbesondere dann sinnvoll, wenn damit Wachstumsbedingungen für den Schimmel vermieden werden. Jedem Eingriff in das bestehende Klimagefüge sollte eine Simulation vorangehen. Eine Temperaturerhöhung führt nicht automatisch zu einer Schimmelhemmung, sondern kann diese in ungünstigen Fällen auch befördern.

2.2.8 Reinigungsmethoden

Wenn an einer Orgel ein Schimmelbefall festgestellt wird, ist ein Teil der folgenden Maßnahmen fast immer die Reinigung des Instruments durch einen Fachbetrieb, meist ein Unternehmen für Orgelbau. Üblich sind **Trockenreinigungsmethoden** wie das Absaugen und einige Radiermethoden. Verwendet werden auch **feuchte Verfahren** mit Wasser und Desinfektionsmitteln. In jedem Fall soll der Schimmel (und Staub etc.) von der Oberfläche entfernt, das Instrument aber nicht beschädigt werden.

In einem Versuch in Michaelstein wurden auf glatten Holzoberflächen der Orgel unterschiedliche Reinigungsmethoden verglichen.¹³ Neben der Wirksamkeit sollten über längere Zeit auch die Neuentwicklung bzw. der Wiederaufbau des Befalls auf den gereinigten Flächen bewertet werden, um die Nachhaltigkeit einer Reinigungsmaßnahme abschätzen zu können.

¹³ Entsprechende Versuche auf rauen Untergründen (z. B. sägeraues Holz) oder auf Leder usw. konnten im Projektrahmen nicht ausgeführt werden.

Am 28.08.2019 wurden an unterschiedlichen Stellen in der Orgel im Kloster Michaelstein drei Probeflächen angelegt, wobei Zwischenergebnisse des Temperierungsversuchs (siehe 2.2.1) berücksichtigt wurden.

Jede Probefläche wurde in sieben Probefelder eingeteilt:

- (A) eine Referenzfläche, die im Folgenden unberührt blieb,
- (B) eine weitere Referenzfläche für ATP-Tests, daneben fünf Flächen, die gereinigt wurden: (C) mit einem Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser, stark ausgewrungen, „nebelfeucht“, (D) einem Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol, (E) einem Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken, (F) einem „akapad“ Papierschwamm weiß, hart, ein gefüllter, chlorfreier, schwefelarmer Latex-Radierschwamm, entwickelt für die Papierrestaurierung und (G) einem Melaminharzschwamm mit Wasser, stark ausgewrungen, „nebelfeucht“.

Probefläche I					
Reinigungs-feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	29421		10834	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	42	0,14%	98	0,90%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	43	0,15%	326	3,01%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	101	0,34%	236	2,18%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	57	0,19%	186	1,72%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	8	0,03%	84	0,78%

Probefläche II					
Reinigungs-feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	27797		22366	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	105	0,38%	50	0,22%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	1024	3,68%	321	1,44%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	893	3,21%	426	1,90%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	1604	5,77%	376	1,68%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	35	0,13%	122	0,55%

Probefläche III					
Reinigungs- feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	33992		34248	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	111	0,33%	196	0,57%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	1325	3,90%	885	2,58%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	3677	10,82%	1465	4,28%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	2595	7,63%	986	2,88%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	271	0,80%	233	0,68%

Tab. 9 Ergebnisse der ATP-Tests der Reinigung am Tag und 7 Monate später

Am zuverlässigsten waren die Reinigungsmethoden C und G: Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser und Melaminharzschwamm mit Wasser mit Rest ATP-Werten von unter 1% direkt nach der Reinigung.

Weitere Messungen folgten nach 7 Monaten, um die Entwicklung des Befalls nach einer Reinigung beurteilen zu können.

Bei Probefläche 1 hatten sich die Aktivitätswerte nach 7 Monaten überwiegend erhöht, während sie sich bei den Probeflächen 2 und 3 überwiegend verringert hatten. Probefläche 1 war der luftfeuchtegesteuerten Heiztechnik abgewandt, während Probeflächen 2 und 3 stärker im Einfluss dieser Klimatechnik standen.

Dies weist darauf hin, dass die Klimatechnik mit ihrer bisherigen Betriebseinstellung in Kombination mit einer Reinigung die mikrobielle Aktivität unter 1% des Ausgangswertes absenken kann und danach sogar eine weitere Absenkung der mikrobiellen Aktivität stattfindet, wenn der Einfluss der Klimatechnik auf das Orgelbauteil groß genug ist.

ATP-Tests aus der Untersuchungsreihe zur Orgeltemperierung haben bestätigt, dass der Bereich um Messstelle 3, an der letzten Holzpfeifenreihe, die der Wand an der Orgelrückseite zugewandt ist, der einzige Bereich ist, der statt sinkender Aktivität eine steigende Aktivität seit dem letzten Messtermin zeigt. Der gleiche Bereich bei den Reinigungsproben (Probefläche III) zeigt als einziger eher steigende Aktivitätswerte seit der Reinigung. Das bedeutet, dass im hintersten Bereich der Orgel eine kühlere Zone entstanden ist, welche die schimmelhemmende Wirkung der Temperierung nicht ausreichend erreicht. Dieses Indiz spricht dafür, dass die Wärme der Temperierung

noch besser verteilt werden muss, um eine gleichmäßigere Wirkung zu erzielen. Es deckt sich mit der Empfehlung aus dem Experiment zur Ermittlung der Tonhöhenverstimmung durch die Temperierung der Orgel (siehe 2.2.4).

Der Versuch zeigt auch, dass der Erfolg der Reinigung in Gefahr ist, wenn nicht eine wirksame Abstimmung der Lebensbedingungen des Schimmelbefalls erfolgt.

Die Kombination von luftfeuchtegesteuerter Heiztechnik und Reinigung verspricht nach diesem Versuch langfristigen Erfolg gegen Schimmelbefall in der Orgel. (Siehe ausführlichen Bericht im Anhang).

2.2.9 Ergebnisse der Entfernung/Ausdünnung von das Schimmelwachstum begünstigenden Beschichtungen

Die Orgel der Kirche St. Katharinen in Braunschweig steht frei im Raum und zeigt außen und innen zahlreiche Flächen mit Schimmelbefall am Holz und auch auf Metalloberflächen. Viele dieser Oberflächen sind mit Anstrichstoffen beschichtet.

Es bestand der Verdacht, dass die Beschichtungen den Schimmelbefall begünstigen. Dies kann an verschiedenen Faktoren der Beschichtung liegen.

1. Die Beschichtung könnte selbst als verwertbarer Nährstoff dienen.
2. Die Beschichtung könnte nach der Adsorption von Luftfeuchtigkeit an der Holzoberfläche verhindern, dass die Feuchtigkeit in die Holzoberfläche eindiffundiert und sich in den oberflächennahen Bereichen des Holzes verteilt. Dadurch entsteht eine Konzentration der Feuchtigkeit an der beschichteten Oberfläche, also eine höhere Materialfeuchte als ohne Beschichtung. Vermutlich liegt die so erreichte oberflächliche Materialfeuchte innerhalb der Wachstumsbedingungen der beteiligten Pilze. Ohne die Beschichtung, bei tieferer Verteilung der Feuchtigkeit im Holz könnte die Materialfeuchte für einen Befall noch nicht erreicht werden.
3. Der begünstigte Befall auf beschichteten Holzoberflächen könnte eine Kombination aus Faktor 1 und Faktor 2 sein.

Ziel des Tests war, herauszufinden, ob sich Hinweise für die Faktoren 1, 2 und 3 finden lassen.

Im Inneren der Orgel befindet sich ein hölzerner Schaltschrank, dessen linke Tür für diesen Versuch als Testfläche ausgesucht wurde. Es handelt sich um eine stabverleimte Tischlerplatte, vermutlich mit Tropenholz furniert und transparenter Beschichtung auf der Holzoberfläche. Die Außenoberfläche der linken Tür ist relativ

gleichmäßig mit weißen Schimmelkolonien bewachsen. Die linke Tür des Schaltschranks wurde beim ersten Ortstermin am 16.03.2020 ausgebaut und zur Bearbeitung mit in die Restaurierungswerkstatt in Hildesheim genommen. Darauf wurden zwei Probeflächen angelegt. Die linke Tür des Schaltschranks wurde beim ersten Ortstermin am 16.03.2020 ausgebaut und zur Bearbeitung mit in die Restaurierungswerkstatt in Hildesheim genommen. Darauf wurden zwei Probeflächen angelegt.



Abb. 75
(links) Rückseite des Orgelgehäuses von Westen aus betrachtet. Hinter der offenen Tür befindet sich der (rechts) Schaltschrank, dessen linke Tür als Probestelle für diesen Test verwendet wurde.

Für die **Probefläche 1** wurde die Oberfläche des Holzes zusammen mit der transparenten Beschichtung mittels einer Zieh Klinge abgetragen. **Probefläche 2** wurde lediglich gereinigt, d.h. ein Großteil der anhaftenden Schimmelpilze wurden mit einem Reinigungsschwamm aus Melaminharz entfernt. Dieser wurden mit Wasser befeuchtet und anschließend stark ausgewrungen, so dass nur noch wenig Feuchtigkeit im Schwamm verblieb. Damit auf der **Probefläche 1** auch einige keimfähige Teile des Schimmelpilzes vorhanden sind, wurde diese mit dem Reinigungsschwamm abgerieben, mit dem **Probefläche 2** gereinigt worden war. Die Fläche wurde also nach dem Abnehmen der Beschichtung mit Keimen der befallenen Nachbaroberfläche angeimpft.

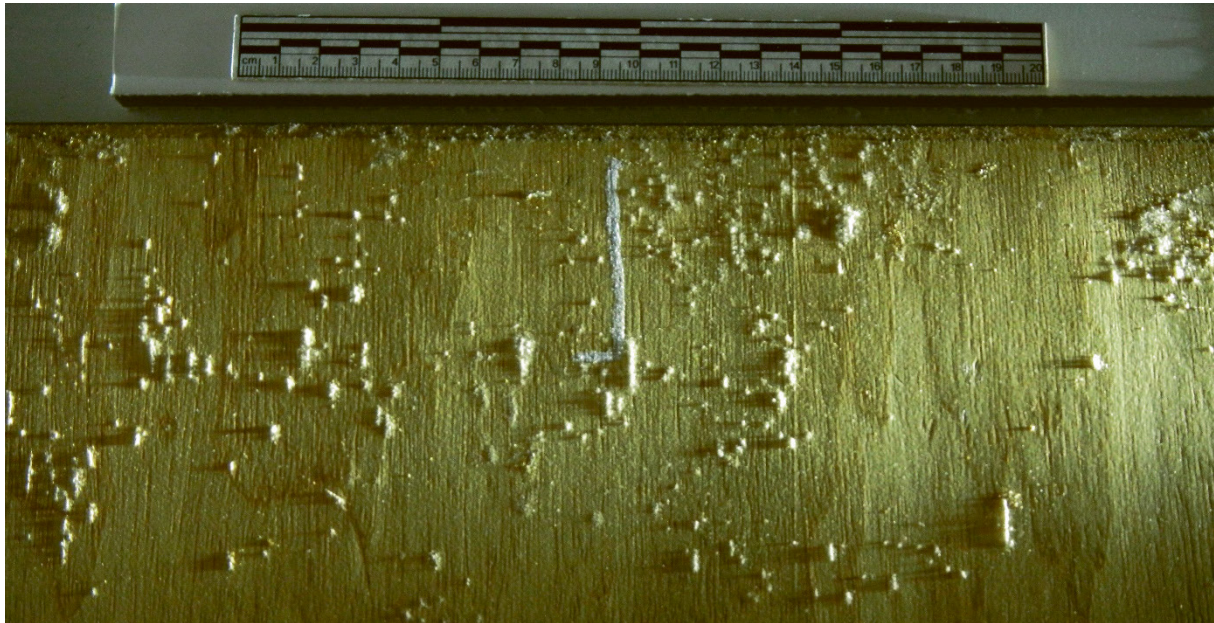


Abb. 76 Befall mit Schimmelpilz im Bereich der Probestelle im Streiflicht, vor Anlage der Probeflächen

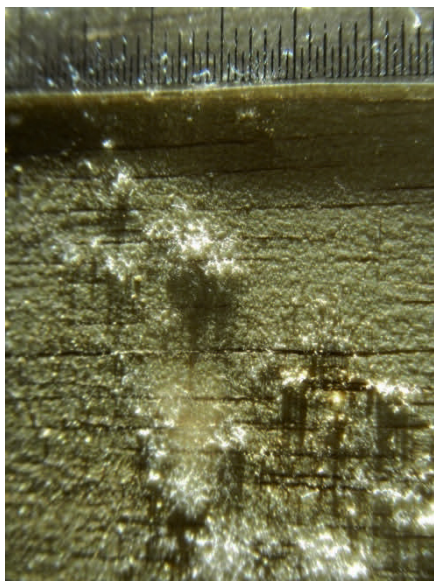


Abb. 77 (links)
Befall mit
Schimmelpilz im
Bereich der
Probestelle im
Streiflicht; **rechts**
derselbe Ausschnitt:
Fluoreszenz bei
Anregung mit UV-
Licht. Ein
Skalenabschnitt
misst 0,5 mm.

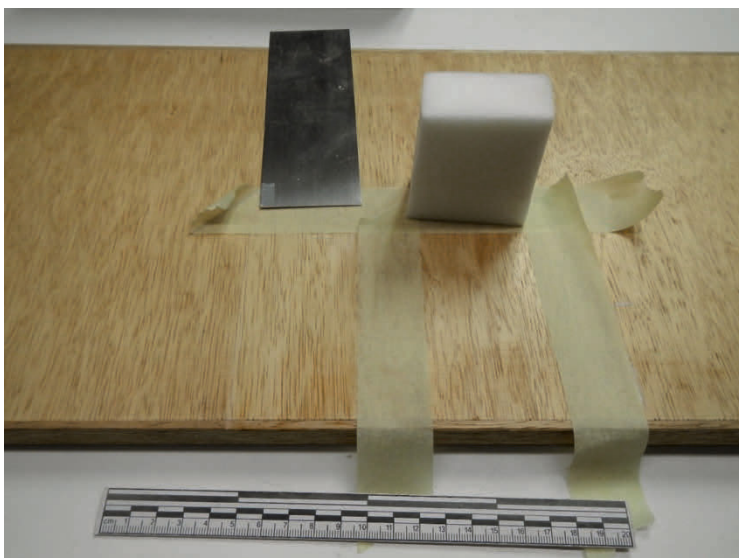
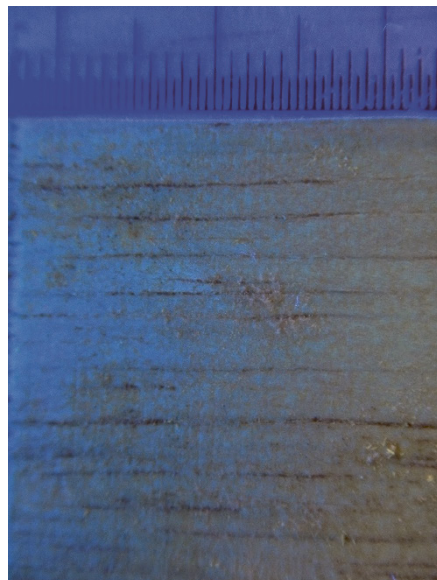


Abb. 78 links Probefläche 1: Oberfläche samt Beschichtung mit einer Ziehklinge entfernt, **rechts Probefläche 2:** Oberfläche vom Großteil der anhaftenden Schimmelpilze mit einem Reinigungsschwamm aus Melaminharz gereinigt.

Für spätere Tests wurden zwei Arten **Materialproben** aus dem Bereich der Probefläche 1 genommen.

Für die **Materialprobe 1** wurden mit einem scharfen Skalpell dünne Späne der Holzoberfläche mit Beschichtung und Pilzbefall abgeschält, um sie in Kunstharz für ein Mikroskopiepräparat einzuschließen und den Querschnitt der Probe zu untersuchen. Die Späne wurden in lichthärtendes Acrylharz eingebettet und angeschliffen.

Ziel war die Untersuchung der Eindringtiefe des Pilzes in die Oberfläche der Probe und die Lokalisierung der orangefarbenen Fluoreszenz, die Pilze in Orgeln häufig auf dem Untergrund hinterlassen, auch wenn kein Befall mehr auf der Oberfläche zu finden ist. Diese charakteristische orangefarbene Fluoreszenz bei Anregung mit ultraviolettem Licht ist auf der hier untersuchten Probefläche im Bereich der Pilzkolonien zu erkennen.

Für die **Materialprobe 2** wurde das obere abgeschabte Material aus Probefläche 1 mit einem hohen Anteil an Pilzmycel und Oberflächenbeschichtungsmaterial in ein Schnappdeckelglas gefüllt und für spätere Untersuchungen als Rückstellprobe aufbewahrt.

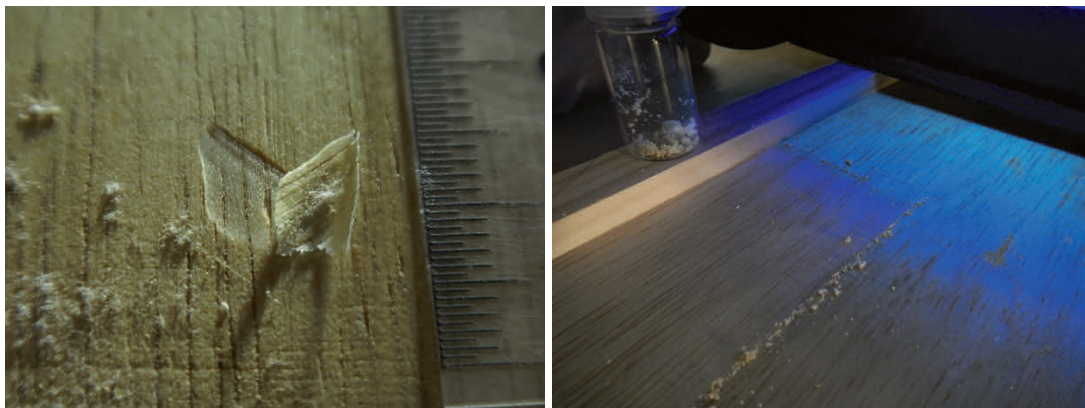


Abb. 79 (links) **Materialprobe 1**: Späne der Holzoberfläche mit Beschichtung und Pilzbefall, (rechts) **Materialprobe 2**: abgeschabtes Material aus Probefläche

Unter dem Mikroskop zeigte sich eine orangefarbene Fluoreszenz. Der Befund spricht dafür, dass die Beschichtung als Nahrung für den Pilz dient. Im Holz selbst sind keine orange fluoreszierenden Pilzhyphen zu finden. Das bedeutet, dass das Holz unter den Bedingungen vor Ort weniger attraktiv für den Befall ist als die Beschichtung.

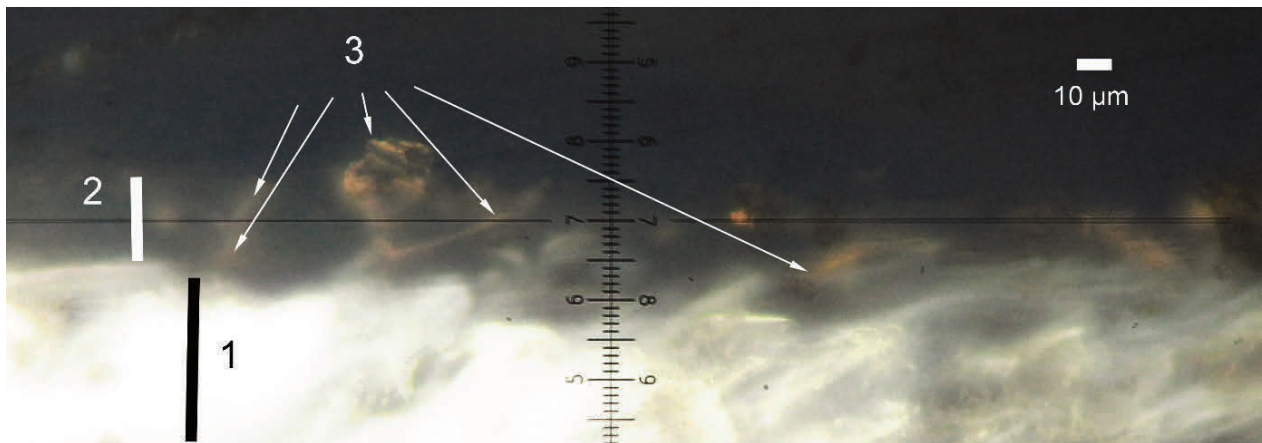


Abb. 80 Mikroskopaufnahme des Querschnitts der beschichteten Holzoberfläche: Fluoreszenz bei Anregung mit UV-Licht, 1: Holz, 2: transparente Beschichtung, 3: stark orange fluoreszierende Pilzhyphen, die innerhalb und auf der transparenten Beschichtung wachsen

Beim zweiten **Ortstermin am 30.11.2021** wurde mittels **ATP-Test** die Zellaktivität auf den angelegten Probestellen mit und ohne Beschichtung in der Orgel und auf zwei unbehandelten Referenzflächen gemessen. Zwischen dem ersten und zweiten Ortstermin hatte die Besiedlung 19,5 Monate Zeit, sich auf den zwei bearbeiteten Testflächen neu aufzubauen.

	Messstelle	1	2	3	4
Datum		Holztür Schaltschrank in Orgel linke Tür 120 cm über Fußboden	Orgel außen, hinten, 2. vertikales Brett links neben Tür, 120 cm über Fußboden	Beschichtung vorhanden aber gereinigt. Holztür Schaltschrank in Orgel linke Tür 120 cm über Fußboden	Beschichtung entfernt. Holztür Schaltschrank in Orgel linke Tür 120 cm über Fußboden
05.03.2020	RLU auf 1cm ²	18708	2130		
30.11.2021	RLU auf 1cm	2307	4645	42	2

Tab. 10 Gegenüber der Messstelle 1 vom 05.03.2020 zeigten die Messstellen 3 und 4 nach 19 Monaten immer noch stark herabgesetzte Aktivität. Bei Messstelle 3 mit transparenter Beschichtung auf der Holzoberfläche blieb die Aktivität auch nach 19 Monaten auf 0,22% des Ausgangswertes. Bei Messstelle 4 ohne Beschichtung auf dem Holz blieb die Aktivität nach 19 Monaten auf 0,01% des Ausgangswertes.

Der Pilzbefall hatte sich auf den beiden Probestellen 1 und 2, also den Messstellen 3 und 4 von der Reinigung 19 Monate vorher nicht erholt. Die gemessenen Werte lagen beide so niedrig, dass sie nicht als eindeutige Aktivität gelten.

Die Referenzflächen Messstelle 1 und 2 zeigten erwartungsgemäß hohe 4-stellige ATP-Werte, die starke Aktivität bedeuten. Messstelle 1 zeigte einen niedrigeren Wert als 19 Monate zuvor. Dies kann durch die Störung des Lebensraums durch vorübergehenden Ausbau, Transport und Bearbeitung der Probestellen in der Werkstatt verursacht worden sein. Die etwas höheren Messwerte auf der

Beschichtung im Vergleich zur Fläche ohne Beschichtung sind ein schwacher Hinweis darauf, dass die Beschichtung den Befall begünstigt. Dieser Effekt sollte in Zukunft überprüft werden. Bei Orgelneubauten sollte deshalb auf Beschichtungen soweit als möglich verzichtet werden.

Das **überraschende und unerwartete Ergebnis** dieses Versuchs ist, dass eine Reinigung der Oberfläche den Befall auch noch nach 19 Monaten so niedrig halten konnte. Offenbar baut sich der Befall in dieser Orgel so langsam auf, dass allein eine Reinigung schon einen langanhaltenden hemmenden Effekt hat.

Aus diesen Beobachtungen ist zu schließen, dass die Oberflächenbeschichtung dieser Orgel vom Pilz durchwachsen wird, diese also auch als Nährstoff dient.

2.2.10 Praxisversuche zum Einsatz von Ozon zur Schimmelbehandlung in Orgeln

In **Geseke** wurde ein neuer Schimmelbefall nach einer 2013/14 vorgenommenen Ozonbehandlung und Modifikationen bei der Belüftung des Kirchenraumes (ausgeführt um 2015) festgestellt.¹⁴ Die Kirche wird über eine luftfeuchtegesteuerte Warmluftheizung temperiert. Die Grundtemperatur liegt bei 10°C, für Gottesdienste wird innerhalb von 6 Stunden auf max. 16°C geheizt. In der Orgel wurden zwischenzeitlich außerdem zwei Luftreiniger aufgestellt, die die Luft ansaugen, filtern und mit UV-C-Licht bestrahlen.

Ein **Nebelversuch** ergab, dass die Tür hinter der Orgel, die bei entsprechenden Außenluftwerten zu Lüftungszwecken automatisch geöffnet wird, weitgehend wirkungslos ist, da die Luft aus dem Kirchenschiff die rückwärtigen Bereiche der Orgel erst sehr verzögert erreicht; der Luftraum der Orgelempore wird von den Luftbewegungen im Kirchenschiff kaum beeinflusst. Ein „Abziehen“ von Innenraumluft durch die Tür hinter Orgel konnte im Nebelversuch nicht beobachtet werden. Dazu passt die Beobachtung, dass der Befall v.a. die „im Windschatten liegende“ Innenseite des Prospektes betrifft. (Zur Wirksamkeit der automatischen Lüftung siehe 2.1.7).

Die **Ozonbehandlung** hat nicht die Ursache des Befalls – zu hohe Luftfeuchtigkeit im Bereich der gefährdeten Oberflächen der Orgel – beheben können. Ihre Wirksamkeit erweist sich folglich als zeitlich begrenzt (vgl. 2.1.7, Abb. 22 und Abb. 35).

¹⁴ Zu den Laborversuchen mit Ozon siehe 2.1.4



Abb. 81 Der historische Prospekt der Orgel in St. Cyriakus zu Geseke ist im Vergleich zu vielen anderen Gehäusen sehr luftdurchlässig

In **Berge** wurde die Orgel 2018 gleichfalls einer Ozonbehandlung unterzogen. Außerdem wurden die Heizung und Lüftung des Kirchenraumes optimiert (2017/18). Hier kam es zu keinem neuen Befall. (Siehe 2.1.7 und 2.2.12).

2.2.11 Bewertung der Praxis der Schwefelbegasung von Orgelgehäusen am Beispiel von Schwarzenberg

Ein Vor-Ort-Versuch im September 2019 in Schwarzenberg, im Rahmen dessen der Küster vier handelsübliche **Schwefelschnitten** in einem in die Orgel gestellten Blecheimer abbrannte, war kurzfristig kaum wirksam. Nach vier Wochen wurde jedoch eine stark reduzierte Aktivität gemessen. Der Versuch wurde zur Verifizierung im Juni 2020 wiederholt. Der Versuch steht in einer Reihe ähnlicher Behandlungen, die die Kirchengemeinde in den letzten Jahren eigenverantwortlich in Analogie zu im Weinbau üblichen Sterilisationsverfahren vorgenommen hatte.



Abb. 82 Schwefel-Versuch: in einem Blecheimer werden Schwefelschnitten abgebrannt

Die Versuche im Jahr 2019 und 2020 wurden durch ATP-Tests begleitet. Es zeigte sich, dass die (symptombezogene) Begasung des Orgelinneren wie auch des Bereichs vor der Orgel in Schwarzenberg teilweise zu einer deutlichen Abnahme der Aktivität der Pilze führte. Sichtkontrollen hinsichtlich der Beeinflussung oder gar Schädigung von Materialien/ Materialoberflächen der Orgel und Objekten in ihrer Umgebung wie Oxidationserscheinungen an Metalloberflächen erbrachten keine Hinweise. In ergänzenden Laborversuchen wurden jedoch Veränderungen an Elfenbein nachgewiesen (s.o.).¹⁵

Probestellen	Beschreibung Ort	Vor dem Schwefeln 24.06.2020, 12.00 Uhr		nach dem Schwefeln 25.06.2020, 10.00 Uhr	
		ATP auf 25 cm ²	ATP auf 1 cm ²	ATP auf 25 cm ²	ATP auf 1 cm ²
1	Cornett, 5-fach, Hauptwerk, Nr. 16	2909	116,36	64	2,56
2	Spitzgambe, Schwellwerk, Nr. 33	631	25,24	522	20,88
6	Schwelle, Eingang Orgelgehäuse Süd	2716	108,64	571	22,84
7	Verschaltung Süd Eingangstür	1207	48,28	68	2,72
9	Sifflett, Schwellwerk, Nr. 46	226	9,04	150	6

Tab. 11 Ergebnisse der Bestimmung der Aktivität der Schimmelpilze (ATP-Wert) vor und nach der Schwefel-Begasung der Orgel in Schwarzenberg 2020, gemessen in RLU/cm²

Aktivitätswerte zwischen 100-500 RLU/cm², wie sie 2020 vor dem Schwefelgasversuch an den Stellen 1 und 6 gemessen wurden, wurden seitens der am Projekt SCHIK Beteiligten, die ihre Messungen mit einem *Photomultiplier*

¹⁵ Vgl. das einen ähnlichen Ansatz verfolgende Projekt an der Hochschule Offenburg: Spangenberg, Bernd/Henninger, Corinna: Bekämpfung des Pilzbefalls an Orgeln, 2019 (Vortrag, noch nicht publiziert).

Lumitester C-100 ausführten, als schwache Aktivität eingestuft. Werte unter 100 RLU/cm² werden seitens der Projektgruppe nicht als Hinweis auf eine eindeutige Aktivität gesehen. Dass die beiden schwachen Aktivitäten durch die Schwefelbegasung in die Kategorie „keine eindeutige Aktivität“ unter 100 RLU/cm² gesenkt wurden, wird als Beleg der Wirksamkeit der Maßnahme gedeutet.

In Schwarzenberg wurden bzgl. eventueller **Nebenwirkungen** der SO₂ Begasung keine negativen Beobachtungen im Sinne von Oberflächenveränderungen gemacht. Um mögliche **Auswirkungen auf Elfenbein** zu erfassen, wurde im Labor eine Schwefelbehandlung durchgeführt, bei der die in der Orgel anfänglich erreichte Konzentration allerdings nur abgeschätzt werden konnte (siehe 2.1.1). Die rechnerisch im Laborversuch eingestellte Schwefeldioxidkonzentration betrug 11,4 ppm die Behandlungsdauer betrug 10 Tage.

Die Beurteilung erfolgte wie für die UV-C Bestrahlung angegeben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die in der Orgel in Folge der Vermischung mit der Kirchenraumlufte keinesfalls in gleicher Konzentration für einen so langen Zeitraum aufrechterhalten worden sein dürfte, die Gefährdung damit als wesentlich geringer einzuschätzen ist.

2.2.12 Beispiele guter Praxis: Berge (Heizung, Lüftung), Wöllnitz (Entfeuchter), Schöppenstedt (Heizung, Lüftung), Scharfenberg (Heizung), Karlsruhe (Heizung), Michaelstein (Temperierung)

In die Kirche in **Berge** wurde 2017 eine automatische Fensteröffnung eingebaut, um feuchte Innenraumlufte in Abhängigkeit von der Luftfeuchte außen gezielt nach außen abzuleiten. D.h., dass technisch entsprechend ausgerüstete Fenster sich öffnen, wenn die Luft außen trockener ist als innen (siehe die Ergebnisse zur Wirkung der Lüftungsanlage 2.1.7). Auch die Warmluftheizung wird seitdem luftfeuchteabhängig gesteuert. Die Anlage speichert die Messdaten. Klimafühler sind außen, im Chor, im Schiff und in der Orgel angebracht. Außerdem wurde die Luftdurchströmung des weitgehend geschlossenen Orgelgehäuses mittels nachträglich hergestellter **Lüftungsschlitze** und kleiner Ventilatoren verbessert (2018). (Wie die Orgel in Geseke wurde auch die Orgel in Berge mit Ozon behandelt, bevor diese an der Ursache des Befalls angreifenden Maßnahmen ergriffen wurden). Das Monitoring wird durch die Verwaltung des Erzbistums Paderborn und die Gemeinde fortgesetzt.

Während der Projektlaufzeit wurde kein neuer Befall an der Orgel festgestellt. Die seitens des Heizungserrichters im Kirchenschiff erhobenen Klimadaten zeigen für den Zeitraum vom 02.03.2020 bis 31.12.2020 einen mittleren Feuchtwert von 58% rel. F. (Abb. 35); außen lag die mittlere rel. Luftfeuchte im selben Zeitraum bei 69,7 %. (Abb. 34).

Die hinsichtlich der Gefährdung durch Schimmel entscheidende Absenkung der rel. Luftfeuchte in der Orgel bzw. insgesamt in der Kirche dürfte, berücksichtigt man die Ergebnisse der Berechnungen zu Wirksamkeit der automatischen Lüftung (Pkt. 2.1.7), primär der verbesserten Heizungssteuerung (einschließlich der geringfügigen Anhebung der Grundtemperierung auf 12°C) geschuldet sein. Die Ventilatoren im Orgelgehäuse sorgen für einen verbesserten Luftaustausch zwischen Kirchenraum und Orgel, wodurch das Temperaturgefälle zwischen Kirchenraum und Orgel gedämpft und die Feuchtigkeit an den Oberflächen der Orgel reduziert wird (siehe 2.1.7, Abb. 33 und Abb. 36).

Kirche und Orgel in **Berge** bilden ein Beispiel einer erfolgreichen Problemlösung.

Die Kirche und Orgel in **Schöppenstedt** (bei Braunschweig) wurde gleichfalls als Beispiel einer gelungenen Problemlösung begleitet und dokumentiert. Die Orgel wurde um 2015 nach Schimmelbefall gereinigt, gleichzeitig wurden Verbesserungen hinsichtlich der Belüftung der Kirche vorgenommen. Wie in Berge wurde eine **automatische Fensteröffnung** zur Lüftung bei entsprechenden Luftfeuchtwerten innen und außen eingebaut. Die **Heizungssteuerung** wurde so optimiert, dass die rel. Luftfeuchte über das Jahr nur selten auf Werte über 65% rel. F. ansteigt. Das Simulationsdiagramm (Abb. 83) zeigt auch, dass im Winter eine Grundtemperatur von etwa 10 °C herrscht (Ausnahme Mitte Februar 2021). ‚Außerdem hat sich die Gemeinde entschieden, die Temperaturwerte zwischen "geheizt" und "ungeheizt" nicht mehr als 5°C differieren zu lassen. Seither bewegt sich das Raumklima relativ konstant zwischen 50 und 60% rel. F.‘ (zitiert nach Kantor Heider).

In der Orgel wurden außerdem zwei handelsübliche **Ventilatoren** aufgestellt, die anspringen, sobald die relative Luftfeuchte dort einen Wert > 62% rel. F. erreicht. Das Gehäuse wurde zudem mit Lüftungsschlitzen versehen. Die Ventilatoren und die Schlitze sorgen für einen Luftaustausch zwischen Orgel und Kirchenschiff und sollen einem Temperatur- und Feuchtegefälle zwischen Kirchenraum und Orgel

entgegenwirken. Außerdem scheint die Luftbewegung zu einer Trocknung der Oberflächen der Orgel beitragen. Wie in Berge sorgen die luftfeuchteabhängig gesteuerte Heizung und die Grundtemperierung auf 10°C dafür, dass in der Kirche selten Bedingungen für ein Schimmelwachstum eintreten. Wie oben für Berge und Geseke (Pkt. 2.1.7) ausgeführt, dürfte im Zusammenspiel der einzelnen Faktoren die automatische Öffnung der Fenster zur Abfuhr von Feuchtigkeit nach außen eine eher untergeordnete Rolle spielen.

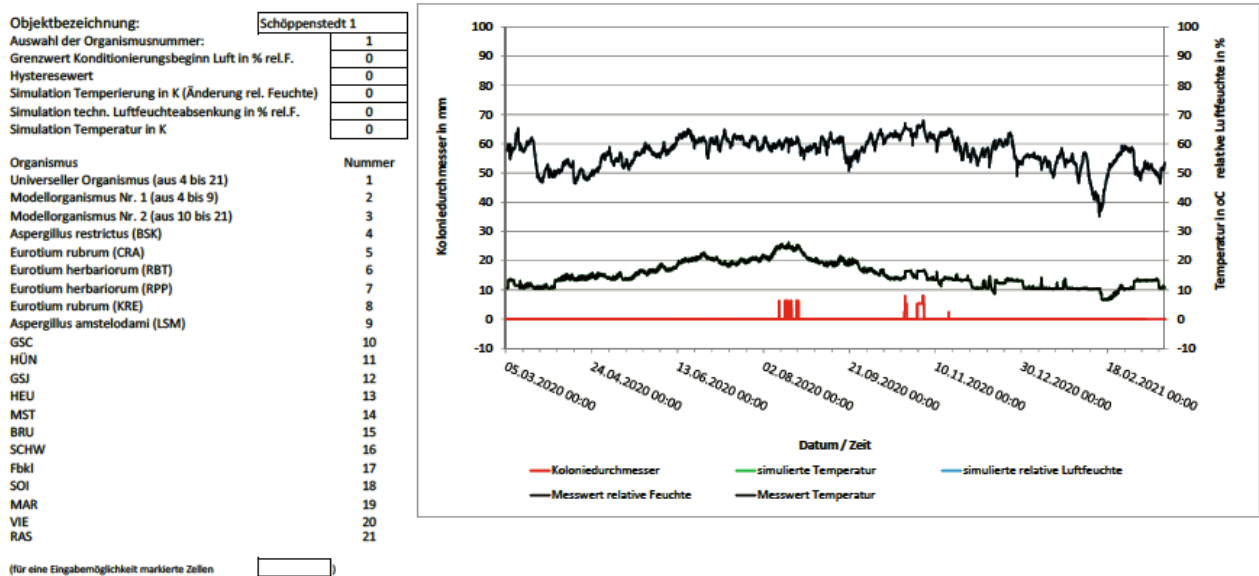


Abb. 83 Klimadiagramm für die Orgel der Kirche in Schöppenstedt mit den für den Modellorganismus simulierten Wachstumsbedingungen, die 2020/21 nur sehr sporadisch und in geringem Ausmaß eintraten.

Die Nachuntersuchung im März 2020 konnte gezielt an den zuvor besiedelten, inzwischen gereinigten Bereichen erfolgen, da sich diese durch eine intensive Fluoreszenz unter UV-Anregung markieren. Die erzielten ATP-Werte und mikroskopischen Untersuchungen schließen einen Wiederbefall derzeit aus.

Probestellen	Beschreibung Ort	ATP auf 25 cm ²	ATP auf 1 cm ²
1	Orgelgehäuse, innen rechts neben Tür auf Rückseite, Südseite, 180 cm Höhe	2684	107
2	Orgelgehäuse, innen rechts neben letzter Windlade, Südseite, 40 cm Höhe	10298	412
3	Abstrakthalteleiste im Inneren der Orgel, nach oben weisende Fläche	4018	201

Tab. 12 Ergebnisse der Aktivitätsmessung (ATP-Test) beim Ortstermin in Schöppenstedt am 05.03.2020, 14.45 Uhr, 11,4 °C, 55% relative Luftfeuchtigkeit

In **Scharfenberg** deuten die Klimadiagramme (siehe Abb. 37–40) darauf hin, dass das Innenraumklima auch hier stark vom Außenklima beeinflusst wird. Nachdem die Gemeinde die Grundtemperierung des Kirchenraums auf 11 bis 12°C angehoben hat, ist der Schimmelbefall signifikant zurückgegangen. Die angestellte, näherungsweise Kostenbetrachtung lässt Scharfenberg trotz neuerdings erheblich gestiegener Gaspreise als ein Beispiel guter Praxis erscheinen (siehe 2.2.6).

Vor dem Hintergrund der für Berge und Geseke berechneten geringen Wirkung einer luftfeuchtegesteuerten Lüftung zur Vermeidung von Schimmel (Pkt. 2.1.7) stellt sich die Frage, was in Scharfenberg mit einer **automatischen Lüftung** erreicht werden, ob über einen überschaubaren Zeitraum tatsächlich genug Feuchtigkeit nach außen abgeleitet werden könnte, um die mikrobiologischen Wachstumsbedingungen signifikant einzuschränken, und ob diese Investition in einem vernünftigen Verhältnis zur Wirkung stünde. Je häufiger Feuchtigkeit nach außen abgeführt wird, desto stärker ist der Effekt. Je effektiver die Absenkung der rel. Raumluftfeuchte erfolgt, umso so stärker ist die hemmende Wirkung auf das mikrobiologische Wachstum.

In der **Christuskirche** in **Karlsruhe** (siehe 2.2.3) zeigte sich, dass die Fußbodenheizung und die 2010 hinter der Orgel eingebaute Wandheizung über die Zeit zu Austrocknungseffekten führten (z.B. Risse in hölzernen Ausbauteilen). Dennoch stellt sich die Frage, ob in das hinsichtlich der Vermeidung von Schimmel funktionierende System eingegriffen werden sollte, was aus klimatischer und wirtschaftlicher Sicht angezeigt sein könnte. Ein entsprechender Versuch der Drosselung der Fußbodenheizung (und evtl. auch der Wandheizung) müsste schrittweise über einen längeren Zeitraum geschehen und messtechnisch begleitet werden. Die Fußbodenheizung stellt ein träges System dar, sodass Folgen von Veränderungen an der Einstellung sich erst nach längerer Zeit zeigen dürften. Im Zuge dieser Optimierung wäre anzustreben, künftig auf Maßnahmen zur Befeuchtung zu verzichten.

Die Analyse der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen für den Modellorganismus veranschaulicht ohne weitere Eingriffe eine eher geringe Gefährdung, die sich auf Zeiten mit hohen Werten der relativen Raumluftfeuchte begrenzt (siehe Abb. 84). Die Simulationen einer Reduktion der Temperaturen (siehe 2.2.3 und Abb. 85) zeigt, dass dieser Eingriff die Gefahr einer Verbesserung der Wachstumsbedingungen mit sich bringt.

Objektbezeichnung:	Karlsruhe 1
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	0
Simulation Temperatur in K (Änderung rel. Feuchte)	0
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Simulation Temperatur in K	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSI	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

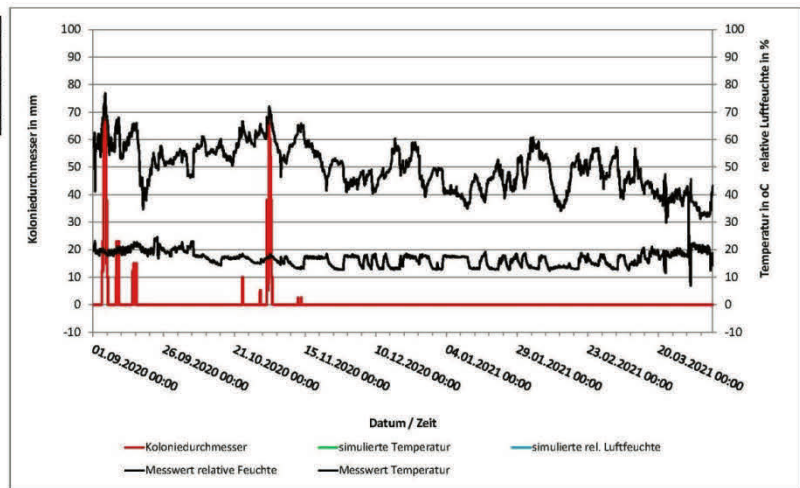


Abb. 84 Simulation der Wachstumsbedingungen in der Orgel der Christuskirche Karlsruhe ohne Änderungen gegenüber dem Ist-Zustand

Objektbezeichnung:	Karlsruhe 2.1
Auswahl der Organismennummer:	1
Grenzwert Konditionierungsbeginn Luft in % rel.F.	0
Hysteresewert	0
Simulation Temperatur in K (Änderung rel. Feuchte)	-2
Simulation techn. Luftfeuchteabsenkung in % rel.F.	0
Simulation Temperatur in K	0
Organismus	Nummer
Universeller Organismus (aus 4 bis 21)	1
Modellorganismus Nr. 1 (aus 4 bis 9)	2
Modellorganismus Nr. 2 (aus 10 bis 21)	3
Aspergillus restrictus (BSK)	4
Eurotium rubrum (CRA)	5
Eurotium herbariorum (RBT)	6
Eurotium herbariorum (RPP)	7
Eurotium rubrum (KRE)	8
Aspergillus amstelodami (LSM)	9
GSC	10
HÜN	11
GSI	12
HEU	13
MST	14
BRU	15
SCHW	16
Fbkl	17
SOI	18
MAR	19
VIE	20
RAS	21

(für eine Eingabemöglichkeit markierte Zellen)

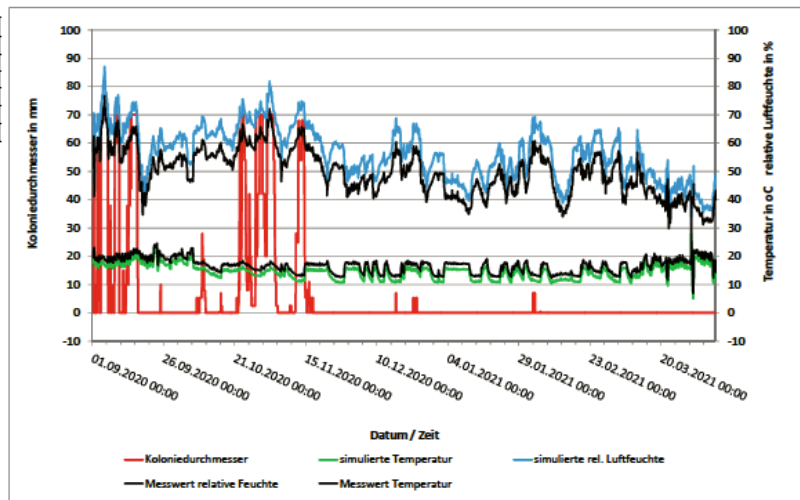


Abb. 85 Simulation der Wachstumsbedingungen in der Orgel der Christuskirche Karlsruhe bei einer Reduktion der Heizung um 2 K gegenüber dem Ist-Zustand

2.2.13 Leitfaden (Werkzeugkasten): Empfehlung zum Umgang mit von Schimmelbefall betroffenen Orgeln

Nachfolgend werden, ausgehend von den Ergebnissen der Forschungsprojekte OSCHI¹⁶ und SCHIK, Empfehlungen für den Umgang mit von Schimmelbefall betroffenen Orgeln gegeben und knapp erläutert (siehe *kursiv gesetzte Passagen*). Der Erfolg der Schimmelbekämpfung hängt stark von der gründlichen **Ursachenermittlung** ab. Es wird nachdrücklich angeraten, **schrittweise** vorzugehen, die einzelnen Maßnahmen nacheinander einzuleiten, sorgfältig zu dokumentieren und die Wirkungen über ein Jahr oder länger zu beobachten, bevor ggf. ein nächster Schritt getan wird. Von Anfang an muss ein **Klimamonitoring** etabliert werden, um die klimatischen Ursachen zu erkennen und zu verstehen und die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen abschätzen zu können (siehe Schritt 3). Grundlegende Voraussetzungen für die Erfassung der maßgeblichen Außen- und Raumklimadaten bestehen darin, dass (1.) die Messpunkte aufgabenbezogen gewählt werden und (2.) qualitativ angemessene und kalibrierte (geeichte) **Messtechnik** zum Einsatz kommt. Die Erfahrung zeigt, dass es trotz eines erheblichen Betreuungsaufwandes zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen kommen kann, wenn Geräte nicht richtig funktionieren.

(1) Grundlagenermittlung (Anamnese)

1. Schimmelbefall wird an der Orgel festgestellt

Es zeigen sich weißliche Beläge oder (im Streiflicht) matte Besiedlungen: Befall fotografisch dokumentieren, Fundstellen beschreiben und ggf. mit Klebezetteln o.ä. kennzeichnen (Wo? Wann?)



Schimmelbefall: links unter UV-Licht, Mitte u. rechts mit bloßem Auge zu erkennen

¹⁶ Siehe den Abschlussbericht zum Projekt OSCHI, 2018, <https://www.baufachinformation.de/ursachen-des-schimmelbefalls-an-orgeln/fb/250046>

Wenn an der Orgel ein Befall festgestellt wird, sollte der ganze Kirchenraum auf Schimmel untersucht werden. Eventuell zeigt sich mit bloßem Auge, im Streiflicht oder im UV-Licht auch an anderen Ausstattungsstücken ein Befall: an den Kirchenbänken (Unterseite Sitzbrett), an Bildern, Skulpturen, am Altar oder den Beichtstühlen. Häufig sind Flächen betroffen, auf denen Staub liegt, die lackiert oder farbig gefasst sind, die ab und zu feucht werden oder auskühlen, weil sie sich vor einer kalten Außenwand befinden, so dass sich an ihnen Feuchtigkeit aus der wärmeren Raumluft abkühlt und niederschlägt. Kühlere Flächen, auf die wärmere Luft auftrifft, sind gefährdet.

Die **Pilze sollten** frühzeitig durch einen Mikrobiologen näher **bestimmt werden**. Bereits jetzt sollte ein Test hinsichtlich der Aktivität der Pilze erfolgen (**ATP-Test**), um sicher zu sein, dass tatsächlich Pilzbefall die Ursache der beobachteten Phänomene ist, und um einen Eindruck von der Intensität des Befalls zu erhalten. Wenn der ATP-Test einen aktiven Befall angibt, sind weitere Maßnahmen angezeigt.

Die Angabe von Grenzwerten für eine Aktivität ist hier nicht sinnvoll, da verschiedene Testkits und Messgeräte auf dem Markt sind und die gemessenen Werte – relative Luminiszenzeinheiten (RLU) – stark davon abhängen, mit welchem System gearbeitet wird. Die Bewertung der Aktivität muss daher von den jeweiligen Fachleuten durchgeführt werden.

2. Vorläufige Einschätzung der Gesundheitsgefährdung, die von den angetroffenen Pilzen ausgeht. Diese Bewertung kann durch die Fachleute (Mikrobiologen) erfolgen, die den ATP-Test vorgenommen und tatsächlich ausgebildeten Arten bestimmt haben.¹⁷

3. Inspektion des Kirchenraumes bzw. des gesamten Gebäudes und seiner Umgebung: **Suche nach Feuchtigkeitsquellen**, ggf. Dach abdichten, Leckage beseitigen.

Mögliche Feuchtequellen: Kondenswasser oder erhöhte relative Luftfeuchte. Kondenswasser entsteht, wenn sich warme (Heizungs-)Luft an kalten Oberflächen abkühlt. Feuchtigkeit kann durch Undichtigkeiten am Dach, Wassereintrag durch Besucher, falsches Lüften im Frühjahr (mit der Folge, dass sich warme Außenluft an den noch kalten Oberflächen im Kirchenraum abkühlt) und beim Reinigen des Fußbodens in den Kirchenraum gelangen. Bei geringem Luftwechsel zwischen dem Innenraum und der Umgebung des Gebäudes (u.a. in Folge zu dichter Fenster oder wegen aufsteigender Feuchte) kann es zu einer Auffeuchtung der Innenraumluft kommen. Evtl. lassen sich erhöhte Feuchtwerte mit bestimmten Ereignissen in Verbindung bringen: z.B. Gottesdienste mit vielen Besuchern in u.U. feuchten Mänteln. Auch unterirdische Heizungsschächte könnten eine Rolle spielen: warme Heizungsluft nimmt ggf. Feuchtigkeit aus dem Schacht auf und transportiert sie in den Kirchenraum. Falls dieser Verdacht besteht, sollte die absolute Luftfeuchtigkeit am Heizungseinlass mit der am Heizungsaustritt verglichen werden, d.h. es müssten Klimadatenlogger auch dort platziert werden. – Für die Beantwortung dieser Fragen müssen unbedingt geeignete Büros hinzugezogen werden!

(2) Voruntersuchungen

4. Installation von Datenloggern zur Messung der Raumluftfeuchte und Lufttemperatur (Klimamonitoring). Erforderlich sind mindestens drei

Klimadatenlogger: (a) in der Orgel, (b) im Kirchenraum, (c) außen auf der Nordseite des Kirchengebäudes (falls keine Messdaten eines Wetterdienstes verfügbar sind¹⁸). Die Messpunkte im Orgelgehäuse müssen an schimmelgefährdeten Stellen positioniert werden. Der Messtakt sollte möglichst 30 Minuten betragen, um auch Auswirkungen von Veranstaltungen aufzuzeichnen. Die interne Datenspeicherung des Klimaloggers sollte wenigstens ein, besser zwei Jahre betragen.

Falls kein Außenklimadatenlogger zur Verfügung steht, können Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden. Die Klimadaten sind kurz nach Inbetriebnahme der Datenlogger und im Abstand von 6 Monaten zu sichern, um die Funktion der Datenlogger sicherzustellen. Die Geräte müssen kalibriert sein. – Die Pilze benötigen Feuchtigkeit, wobei der jeweilige Bedarf auch von der Temperatur abhängt. Das Klimamonitoring ist

¹⁷ Siehe Abschlussbericht OSCHI

¹⁸ Wetterdaten erhältlich über Deutscher Wetterdienst, Kachelmannwetter, Hochschulen u.v.a.

unverzichtbar, um die tatsächlichen klimatischen Bedingungen in der Orgel und im Kirchenraum zu erkennen und zu verstehen. Das ständige Klimamonitoring sollte auch eingerichtet werden, wenn kein Pilzbefall beobachtet wird. Es liefert wertvolle Daten, wenn z. B. die Heizung ausfällt oder mutmaßlich klimatisch bedingt Schäden auftreten. Die Klimadaten werden zwingend benötigt, wenn eine Simulation der Wachstumsbedingungen der Schimmelpilze vorgenommen werden soll (siehe Schritt 8). Klimadaten eines Jahres vor einer Maßnahme sind auch wichtig, um den Erfolg späterer Maßnahmen beurteilen zu können.

5. **Klimamonitoring über wenigstens 1 Jahr.** In dieser Zeit sollen möglichst keine Veränderungen an der Heizung, Lüftung oder Nutzung des Raumes vorgenommen und die betroffenen Oberflächen der Orgel nicht gereinigt werden.
Sinnvoll sind in dieser Zeit Notizen zu besonderen Ereignissen: Konzerte, größere Veranstaltungen, Reinigungsarbeiten, ...
6. Nach einem Jahr: **Auswertung der Klimaaufzeichnung** durch einen in der Denkmalpflege erfahrenen Bauklimatiker.
Betrachtet und bewertet werden die durchschnittliche rel. Luftfeuchte, die durchschnittliche Lufttemperatur, die Häufigkeit von potentiell „kritischen“ Tagen mit Luftfeuchtwerten > 60 % rel. F. wie auch der Klimaverlauf (Schwankungen der Klimawerte, Unterschiede zwischen Klimamesspunkten, Unterschiede zwischen Raum- und Außenklima: absolute Luftfeuchte?).
7. Festlegung von mind. 3 Teststellen in der Orgel: **ATP-Test zum Nachweis der Aktivität der Pilze**, Ergebnisse (RLU/cm²) protokollieren (> vgl. Schritt 1)
8. Nutzung von Klimadaten, die über wenigsten ein Jahr aufgezeichnet wurden zur **Simulation der Wachstumsbedingungen** (mit Modellorganismus).
Die Simulationen kann ein erfahrener Bauklimatiker in Zusammenarbeit mit erfahrenen Biologen vornehmen (z.B. mit dem im Bericht vorgestellten Programm des IDK). In den Forschungsprojekten OSCHI und SCHIK wurden die Wachstumsbedingungen verschiedener Schimmelpilze unter verschiedenen Klimabedingungen untersucht und in ein Simulationsprogramm überführt. Dadurch ist es möglich, die Gefährdung der Orgel hinsichtlich eines Befalls abzuschätzen. (Siehe Abschlussbericht SCHIK 2022).
9. **Simulation der Wachstumsbedingungen bei abgesenkter relativer Luftfeuchte** in Folge leicht erhöhter Temperatur in der Orgel (+ 1 K/ + 2 K/ + 3K) oder mittels technischer Entfeuchtung
10. **Diskussion des Simulationsergebnisses** mit dem Orgelbauer, der Kirchengemeinde, dem Orgelsachverständigen, dem Restaurator, dem Bauverantwortlichen und der Denkmalpflege. Falls es nur um eine geringfügige Absenkung der Luftfeuchte geht, sollten zunächst **Möglichkeiten einer verbesserten manuellen Lüftung** und der **Verminderung des Wassereintrags** (Reinigungswasser) geprüft und erprobt werden. Ggf. kann auch eine klimatische Annäherung des Orgelklimas an das Klima im Kirchenraum erfolgen, indem zunächst versuchsweise die Türen Orgelgehäuses geöffnet bleiben, damit die Orgel möglicherweise weniger auskühlt (siehe Abschlussbericht SCHIK, 2.2.12 Berge). Ansonsten kommt (a) die **Optimierung der Heizungssteuerung**, (b) eine **passive Innendämmung** der Außenwand, vor der die Orgel steht, (c) eine lokale **Temperierung** in der Orgel und (d) eine technische **Entfeuchtung** des Orgelinneren in Frage.
Im Falle der Entscheidung für eine Temperierung der Orgel bzw. technische Entfeuchtung, weiter zu Schritt 14, falls Entscheidung dagegen weiter zu 16.
*Kriterien: (a) Falls die Kirche über eine **luftfeuchtegesteuerte Heizung** verfügt, kann die Heizungssteuerung bzgl. der rel. Luftfeuchte auf einen niedrigeren Zielwert (60–65% rel. F.) eingestellt werden. Dieser Ansatz empfiehlt sich, wenn die gemessene rel. Luftfeuchte im Mittel unter 70-75 % rel. F. liegt (weiter zu Schritt 11). Falls diese Option gewählt wird, ist ein etwas höherer Energieverbrauch zu erwarten. (b) Der Einsatz einer **Innendämmung** kommt v. a. im Falle einer beheizten Kirche in Frage. Zweck der Dämmung ist die Verhinderung der*

Abgabe von Wärme aus der Substanz der Orgel an die kalte Wand, vor der sie steht. (c) Eine **Temperierung** der Orgel empfiehlt sich besonders dann, wenn die Orgel in einer ungeheizten Kirche steht und ein eher geschlossenes Gehäuse besitzt. In diesem Fall kann (d) eine technische **Entfeuchtung** des Orgelinneren im Sommer eine Alternative darstellen. Empfohlen wird die Erprobung dieses Lösungsansatzes mit Hilfe einer **mobilen Temperierungs- bzw. Entfeuchtungsanlage**, wodurch eine angepasste Lösung erreicht und eine Fehlinvestition vermieden werden kann.

(3) Eingriffe

11. **Einfache Maßnahmen**, wenn vorerst keine Temperierung oder technische Entfeuchtung eingebaut werden sollen: (a) Konsequentes **Vermeiden von Wassereintrag**: weniger Wischen, mehr Staubsaugen oder/und (b) sorgfältiges **manuelles Lüften** immer dann, wenn die Außenluft trockener ist als die Innenluft (Lüftungsampel oder -App; Lüftungsprotokoll führen) oder (c) **Optimierung der vorhandenen luftfeuchtgesteuerten Heizung**: Einstellung eines niedrigeren Zielwertes: 60–65% rel. F. oder (d) Einbau einer **passiven Dämmung** an der Wand hinter der Orgel.
Die Wirkung eines jeden Eingriffs ist über wenigstens 12 Monate zu beobachten (Klimamonitoring). Jeder Eingriff muss schriftlich und fotografisch dokumentiert werden.
12. Nach dem Eingriff: Fortsetzung des **Klimamonitorings** über wenigstens 1 Jahr, Nutzung derselben Messpunkte wie für die Voruntersuchung
13. Im Laufe dieser Beobachtungszeit **2 ATP-Tests** (z.B. im Mai und September) zur Überprüfung der Wirksamkeit der getroffenen Maßnahme. **Diskussion der Ergebnisse mit den Fachleuten** (vgl. Schritt 6, 10).
Der Vergleich der Ausgangswerte mit den Kontrollwerten zeigt, ob die Aktivität der Pilze abnimmt oder nicht.
Wenn bereits jetzt ein positiver Effekt erreicht wurde und die Aktivität der Pilze deutlich zurückgegangen ist, kann die **Luftzirkulation** zwischen Kirchenraum und Orgel verbessert und die Orgel gereinigt werden (Schritt 23).
14. Wenn die einfachen Maßnahmen (Schritt 11) nicht ausgereicht haben oder im Blick auf die herrschenden Klimaverhältnisse im Kirchenraum (öfter > 75% rel. F.) und die Stärke des Befalls direkt als nicht erfolgsversprechend bewertet wurden, kommt (a) die Konzeption und der Einbau einer **luftfeuchtabhängig gesteuerten Temperierungsanlage** in die Orgel in Frage, mit dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen und schwankungsarmen Wärmeverteilung in der Orgel.
Die Orgel soll im Winter geringfügig wärmer sein als der Kirchenraum, damit sich die Raumluft nicht in der Orgel abkühlt und dort ihre Feuchtigkeit zurücklässt.
Alternativ kann (b) die Konzeption und der Einbau einer **luftfeuchtabhängig gesteuerten technischen Entfeuchtungsanlage** erfolgen, mit dem Ziel der Absenkung der relativen Luftfeuchte in der Orgel unter einen Wert von ca. 60% rel. F.
Bei einer technischen Luftentfeuchtung sollten im Orgelgehäuse Mindesttemperaturen von 5°C nicht unterschritten oder hochwertige, für niedrige Temperaturen konzipierte Luftentfeuchter eingesetzt werden.
15. Nach dem Eingriff: Fortsetzung des **Klimamonitorings** über wenigstens 1 Jahr, Nutzung derselben Messpunkte wie für die Voruntersuchung.
16. Im Laufe dieser Beobachtungszeit **2 ATP-Tests** (z.B. im Mai und September) zur Überprüfung der Wirksamkeit der getroffenen Maßnahme.
Der Vergleich der Ausgangswerte mit den Kontrollwerten zeigt, ob die Aktivität der Pilze abnimmt oder nicht.
17. Nach einem Jahr: **Bewertung der Zwischenergebnisse** durch Mikrobiologen, Bauklimatiker, Restaurator, Denkmalpfleger und Orgelbauer, evtl. **Nebelversuch**

und/oder **Thermographie** zur Beurteilung der Wärmeverteilung und der Oberflächentemperaturen in der Orgel.

Diese beiden Untersuchungen müssen in der Heizperiode durchgeführt werden. In der Thermographie markieren sich u.U. kalte oder auch zu warme Bereiche. Letztere könnten von Austrocknung bedroht sein.

Bei zufriedenstellendem Ergebnis: Reinigung (Schritt 23).

18. Ggf. Einleitung eines weiteren Schrittes: (a) **Modifikation der Temperierung**, indem z.B. zusätzlich Ventilatoren zur besseren Wärmeverteilung eingebaut werden, oder/ und indem die Heizleistung erhöht oder gedrosselt wird. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse kommt (b) evtl. der zusätzliche Einbau einer **technischen Entfeuchtung** zur Absenkung der relativen Luftfeuchte besonders im Sommer in Betracht. c) Sofern zuerst eine **techn. Entfeuchtung** installiert wurde, kann nun evtl. der zusätzliche Einbau einer **Temperierungsanlage** in der Orgel sinnvoll sein. Sofern bereits Werte erreicht werden konnten, die die Wachstumsbedingungen stark reduzieren, können als nächstes **einfache Maßnahmen** zur weiteren Verbesserung des Raumklimas ergriffen werden (Schritt 11).
19. Nach der Umsetzung des 2. Schrittes weitere **Beobachtungsphase** von wenigstens einem Jahr mit Klimamonitoring und ATP-Tests. **Bewertung der Ergebnisse** durch die Fachleute (vgl. Schritt 10, 17), bei positivem Resultat Reinigung (Schritt 23).
20. Falls kein befriedigendes Ergebnis erreicht wurde, Ergreifung zusätzlicher Maßnahmen: **Optimierung der Lüftung** des Kirchenraums durch den Einbau einer **automatischen Fensteröffnung** zur Ableitung von feuchter Luft. *Diese Option ist dann sinnvoll, wenn außen häufig eine deutlich niedrigere absolute Luftfeuchte herrscht als innen. Ob die gezielte Öffnung von Fenstern/Türen zu einer merklichen Verbesserung der Luftbewegung führen kann, sollte zuvor mit einem Nebelversuch überprüft werden.*
21. Nach diesem Eingriff: **Beobachtungsphase** von wenigstens einem Jahr mit Klimamonitoring und ATP-Tests, **Bewertung der Ergebnisse** durch die Fachleute (vgl. 10, 17), bei positivem Resultat Reinigung (Schritt 23).
22. Falls kein befriedigendes Ergebnis erreicht wurde: Ergreifen zusätzlicher Maßnahmen auf der Basis einer Gesamtbetrachtung des Gebäudes (z.B. **Kapselung der Zuluftschächte der Heizung** zur Vermeidung der Wasseraufnahme aus dem umgebenden Erdreich (falls ein derartiger Wassereintrag nachgewiesen wurde!); Herstellung einer **Drainage** entlang der Außenmauern zur Vermeidung von aufsteigender Feuchte im Innenraum, Entfeuchtung der Luft im Orgelgehäuse mit mobilem Entfeuchter (im Sommer), **Erneuerung der Heizung**, mit dem Ziel, geringerer Schwankungen und trockenerer Luft (40 bis 60% rel. F.).
23. Wenn nach einjähriger **Beobachtungszeit** keine nennenswerte Aktivität der Pilze mehr festzustellen ist, kann die Orgel **gereinigt** werden. *Geeignete Reinigungsmittel/-methoden siehe Abschlussbericht SCHIK.*
24. Falls sich in einem besonders feuchten Jahr das Außenklima so auf den Kirchenraum auswirkt, dass wieder Pilzwachstum beobachtet wird: **Entfeuchten mit mobilen Geräten**. Im Zuge der Reinigung (23) können augenscheinlich besonders anfällige Oberflächen der Orgel **prophylaktisch** imprägniert werden. Oberflächen, die mit dem Schimmelwachstum begünstigenden **Lacken** oder Einlassungen beschichtet sind, sollten **ausgedünnt** und evtl. vorbeugend z. B. mit Jod + Laccase oder Zimtsäure behandelt werden.¹⁹

¹⁹ Siehe SCHIK Abschlussbericht.

Entscheidungshilfe/Kurzfassung

		ja	nein
1	Schimmelbefall wird an der Orgel festgestellt (<i>Leitfaden 1.</i>)	> 2	😊
2	Gibt es weiteren Schimmelbefall in der Kirche? (<i>Leitfaden 1.</i>) Mögliche Feuchtigkeitsquellen identifizieren (<i>Leitfaden 3.</i>): Kondenswasser? Undichtigkeiten am Dach? Wassereintrag durch Mauerwerk/Fußboden, Wassereintrag durch Besucher, Feuchteintrag beim Reinigen des Fußbodens, zu geringer Luftaustausch, Feuchtigkeit aus unterirdischen Heizungsschächten, unklare Feuchtigkeitssituation Feuchtigkeitsquelle abstellen / beheben / gegensteuern (<i>Leitfaden 11, 22</i>)	> 3	> 3
3	Bestimmung des Pilzes (<i>Leitfaden 1.</i>) Nachweis der Aktivität der Pilze (ATP-Test) (<i>Leitfaden 1./7.</i>) Einschätzung der Gesundheitsgefährdung (<i>Leitfaden 2.</i>)	> 4	
4	Installation von kalibrierten Klimadatenloggern an geeigneten Messstellen in der Orgel, im Kirchenraum, außen (<i>Leitfaden 4.</i>), ggf. Rückgriff auf vorhandene Klimadaten Klimamonitoring über wenigstens 1 Jahr (<i>Leitfaden 5., 12.</i>) Auswertung der Klimaaufzeichnung mit Bauklimatiker, Orgelbauer, Kirchengemeinde, Restaurator, Denkmalpflege (<i>Leitfaden 6.</i>)	> 5	
5	Simulation der Wachstumsbedingungen (<i>Leitfaden 8./9.</i>) Diskussion der Simulationsergebnisse mit Orgelbauer, Kirchengemeinde, Restaurator, Denkmalpflege (<i>Leitfaden 10.</i>)	> 6, 7, 8	
6	Simulation ergibt keine Wachstumsbedingungen	> 16	
7	Simulation ergibt sporadische Wachstumsbedingungen	> 9, 10, 11, 12	
8	Simulation ergibt häufig Wachstumsbedingungen	> 11, 12, 13, 14, 15	
9	Gezieltes manuelles Lüften der Kirche (<i>Leitfaden 11.</i>)	> 4	
10	Luftzirkulation zwischen Orgel und Kirchenraum verbessern durch Offenhalten von Gehäusetüren (<i>Leitfaden 10., 13.</i>)	> 4	
11	luftfeuchtegesteuerte Heizung , sofern vorhanden, optimieren, Zielwert < 60/65% rel. F. (<i>Leitfaden 11.</i>)	> 4	
12	Dämmung der Rückseite der Orgel oder der Wand , vor der die Orgel steht (<i>Leitfaden 11.</i>)	> 4	
13	Entscheidung über technische Unterstützung: Temperierung der Orgel [im Winter] (<i>Leitfaden 14.</i>) oder Technische Entfeuchtung der Orgel [im Sommer] (<i>Leitfaden 14.</i>)	> 4	
14	Einbau einer luftfeuchtegesteuerten Heizung (Zielwert < 60- 65 % rel. F.)	> 4	
15	Einbau einer automatischen Fensteröffnung (<i>Leitfaden 20.</i>)	> 4	
16	Reinigung des Schimmelbefalls (<i>Leitfaden 23./24.</i>)	😊	

3. Fazit, Ausblick auf offene Fragestellungen

Ausgehend von den Ergebnissen des Projektes OSCHI, in dem nach den Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln gesucht wurde, wurden im Projekt SCHIK im Rahmen von Versuchen im Labor und an Modellobjekten Eingriffsmöglichkeiten erprobt.

Dabei zeigte sich, dass nur auf der Grundlage eines sorgfältigen und langfristigen Klimamonitorings konkrete Ableitungen hinsichtlich der Beeinflussung der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen am jeweiligen Objekt getroffen werden können. Dem Klimamonitoring kommt somit eine zentrale Bedeutung zu.

Als wirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelbefall erwiesen sich die Optimierung der Heizungssteuerung mit dem Ziel einer Absenkung der rel. Luftfeuchte in der Orgel auf Werte < 60–65%, eine passive Dämmung der Rückseite der Orgel bzw. der Wand, vor der die Orgel steht, die konservatorische Temperierung des Orgelinneren oder/und die technische Entfeuchtung desselben.

In enger Zusammenarbeit der beteiligten Mikrobiologen und Klimafachleute gelang die Entwicklung eines Computerprogramms zur Simulation der mikrobiologischen Wachstumsbedingungen in Abhängigkeit von den örtlich gegebenen Klimabedingungen. Dieses Programm erlaubt auch die Prognose der Wirksamkeit von geplanten Eingriffen.

In einem Folgeprojekt könnten diese Ansätze, die zu vielversprechenden Prototypen geführt haben, verfeinert und zur „Marktreife“ geführt werden, was hinsichtlich der Vielzahl der betroffenen Instrumente wünschenswert erscheint.

Zu den Projektergebnissen gehört auch der an zwei Objekten erhobene Befund, dass eine automatische Lüftung zur Abfuhr von Feuchtigkeit aus dem Innenraum der Kirche nach außen hinsichtlich der Schimmelvermeidung weniger wirksam sein kann, als angenommen, was die Forderung unterstreicht, etwaige Eingriffe nur auf der Basis solider Klimadatenerhebungen zu konzipieren und umzusetzen und auch die Wirksamkeit getroffener Maßnahmen mittels eines Klimamonitorings zu überprüfen.

Die Bekämpfung der Ursachen des Schimmelbefalls standen im Mittelpunkt des Projektes, weshalb die Wachstumsbedingungen der im Allgemeinen an den Orgeln angetroffenen Pilze im Labor weiter erkundet wurden, insbesondere die *minimal time of wettness* (minimale Keimdauer). Im Blick auf eventuell zu ergreifende flankierende

Maßnahmen wurde die Ausrüstung gefährdeter Oberflächen mit verschiedenen Hemmstoffen untersucht. Als erfolgversprechend erwies sich insbesondere die Ausrüstung mit Jod + Laccase wie auch mit Zimtsäure. Auch diese Resultate müssten unter Realbedingungen am Objekt überprüft werden.

Als Empfehlung für betroffene Eigentümer, Bauverwaltungen, Orgelbauer, Denkmalpfleger und Ingenieure wurden ein „Werkzeugkasten“ zusammengestellt und der optimale Ablauf von der Diagnose über die Ursachenermittlung bis zu Behandlung und Nachsorge beschrieben.

4. Öffentlichkeitsarbeit

Im Januar 2019 berichtete der Mitteldeutsche Rundfunk in einem Fernsehbeitrag über das Vorhaben. Das Projekt wurde auf der Tagung „Klimazone Kirche. Präventive Konservierung der Ausstattung“ der HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen vorgestellt (Hildesheim, 16. - 18. Januar 2019), siehe LOETHER et al. 2019.

In der Zeitschrift Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt (DiSA) 2019, H. 1, S. 81–85 erschien der Beitrag „Forschungsprojekt zu Schimmelbefall an Orgeln in Kirchen: Prävention und Bekämpfung (SCHIK)“, (HENNEN et al. 2019).

Zur VOD-Tagung in Erfurt fand am 12.06.2019 ein Workshop für Orgelsachverständige statt, an dem ca. 50 Personen teilnahmen. Der auf der Basis der Ergebnisse des Projektes OSCHI entwickelte Forschungsansatz wurde vorgestellt, in die Mess- und die Testverfahren eingeführt. In der Marienkirche Bad Berka wurden Nebelversuche vorgeführt, Klimamesstechnik vorgestellt und Möglichkeiten der Simulation der Wachstumsbedingungen präsentiert. Die Probennahme vor Ort und die mikroskopische Bestimmung der Pilze wurden demonstriert.

Das Projekt sollte beim „Tag der Wissenschaft 2020“ in Wittenberg vorgestellt werden. Die Veranstaltung des Netzwerks „Wissenschaft in Wittenberg“ musste pandemiebedingt verschoben werden; sie wird im Herbst 2022 nachgeholt.

Zur Denkmalmesse 2022 in Leipzig ist eine Tagung geplant, um die Projektergebnisse zu präsentieren.

Der Abschlussbericht soll bis dahin publiziert werden.

5. Literaturverzeichnis

- BACHEM, Martin: Gefahr in der Luft? in etem 06.2016 (www.weiblen.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/ETEM_Schimmel_im_Orgelbau.pdf, 08.04.2022)
- 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, 08.04.2022)
- BÖER, Simone: Untersuchung der Mykotoxinfreisetzung aus ausgewählten Schimmelpilzen unter besonderer Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte.– Diplomarbeit FB7 Dipl.-Biol., Universität Oldenburg, 2004
- BROCK, Thomas: Zu Ulrich Schmelz, "Pilzbefall in Orgeln", Ars Organi 51. Jahrgang, Heft 3, Sept. 2003, S. 88–91.
- CONTRAT-PROJEKT.DE: Grenzwerte für Schimmel (www.schimmel-schimmelpilze.de/grenzwerte-schimmelpilze.html, 08.04.2022)
- CONTRAT-PROJEKT.DE: Risikoeinstufung von Schimmelpilzen (www.schimmel-schimmelpilze.de/risikoeinstufung-schimmelpilze.html, 08.04.2022)
- EV.-LUTH. KIRCHE IN BAYERN, Hrsg.: Schimmelpilze in Orgeln (www.arbeitssicherheit-elkb.de/sites/arbeitssicherheit-elkb.de/files/d7docs/OrgelundSchimmel.pdf, 08.04.2022)
- 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: solving Fungal Problems in Heritage collections, 2002.
- 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)
- GÖGSEL, Manfred: Bauphysik für Baupraktiker, Schall-, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz, Wiesbaden/Berlin 1987
- GOETHE, Burkhardt: Schimmelbildung in Pfeifenorgeln Wissensstand 2014, (www.weiblen.de/top/kundenservice/fachberichte/, 08.04.2022)
- HENNEN, I.C., KALISCH, U., KERSTEN, H., KLOCKE, J., LÖTHER, Th., PETERSEN, K., ZIMMERMANN Ch. im Auftrag der Evangelischen Kirche in Mittel-deutschland (EKM) als Projektträgerin, Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln, 2018 (Abschlussbericht OSCHI) <https://www.baufachinformation.de/ursachen-des-schimmelbefalls-an-orgeln/fb/250046>

HENNEN, I.C., PETERSEN, K., KALISCH, U., LÖTHER, Th., KLOCKE, J., ZIMMERMANN Ch.: Forschungsprojekt zu Schimmelbefall an Orgeln in Kirchen: Prävention und Bekämpfung (SCHIK), in: Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt (DiSA) 2019, H. 1, S. 81–85.

HEYN, Christiane: Mikrobieller Angriff auf synthetische Polymere : Untersuchungen im Rahmen der Denkmalpflege, Diss. Univ. Oldenburg, 2002

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

LÖTHER, Th., HENNEN, I.C., KALISCH, U., KERSTEN, H., KLOCKE, J., PETERSEN, K., ZIMMERMANN, Ch.: Der Einfluss klimatischer Umgebungsbedingungen auf das Schimmelwachstum in Orgeln – Ergebnisse des DBU/BBR Projekts, in: Klimazone Kirche – Präventive Konservierung der Ausstattung, Tagungsband des Hornemann Institutes Hildesheim, Band 20, 2019, S. 145-162.

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, K./FRITZ, U.-M./KRÜGER, G.: 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, K./KLOCKE, J.: Understanding the deterioration of paintings by microorganisms and insects. In: *Conservation of Easel Paintings*, (Eds. Stoner, J. H., Rushfield, R., Routledge,) Series in Conservation and Museology, London, New York, 2012, p. 693-709.

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

PETERSEN, Karin/KALISCH, Uwe/KERSTEN, Henning, LINDEMANN, Ralf, ZÖTZL, Matthias: Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung aufgrund anthropogenen Handelns bedingter Schimmelbesiedlungen auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodell-Halle der Moritzburg in Halle, Abschlussbericht zum Förderprojekt 31440/01 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2018.

PLASCHKIES, K., FLADE, Ph., HENZLER, T., HARTNAGEL, M., LÖTHER, Th.: Neue Lösungsansätze zur Vermeidung von Schimmelpilzen in Kirchenorgeln, in: *Fachzeitschrift: Holztechnologie*, Heft 5/ 2019, S. 32-38.

PLASCHKIES, K., FLADE, Ph., HENZLER, T., HARTNAGEL, M., LÖTHER, Th.: Entwicklung technischer Verfahren zur Vermeidung der biogenen Schadstoffbelastung in Kirchenorgeln, Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18891 60/1, 2019.

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*, Ecomed-Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg/Lech 1990.

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

SCHMELZ, Ulrich: Schimmelpilzinfo (Vortrag) (www.weiblen.de/top/kundenservice/fachberichte/, 4.2.2015).

SCHÖNFELDER, Kaja; Überlegungen zu Elfenbein und Elfenbeinersatzmaterialien unter konservatorischen und restauratorischen Gesichtspunkten. Master Thesis HAWK, Hildesheim, 2020.

SCHUBERT, M./ENGEL, J./THÖNY-MEYER, L./SCHWARZE, F.W.M.R./HESSEN, 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).

SPANGENBERG, Bernd/HENNINGER, Corinna: Bekämpfung es Pilzbefalls an Orgeln, 2019 (Vortrag, noch nicht publiziert).

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

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

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

TOEPFER, I. /PETERSEN, K.: 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, 08.04.2022)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Gebäuden (www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf, 08.04.2022)

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

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

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

6. Abbildungsverzeichnis

Jens Klocke: Titel links, rechts, 17, 46–48, 52, 59, 75–80, Leitfaden, links, rechts

Insa Christiane Hennen: Titel Mitte, 1, 54, 61 links, 62, 81, 82, Leitfaden Mitte

Karin Petersen: 2–16

IDK: 18–45, 49–51, 55–61 rechts, 63–74, 83–85

Katrin Käuper: 53

7. Kontaktadressen

Dr. Insa Christiane Hennen, Wittenberg

hennen.hennen@t-online.de

Dipl. Ing. Uwe Kalisch, Halle

kalisch@idk-denkmal.de

Dipl. Rest. Jens Klocke, Hildesheim

jca.klocke@freenet.de

Prof. Dr. Karin Petersen, Jever

karin.petersen-intox@t-online.de

Dipl. Ing. Thomas Löther, Dresden

loether@idk-denkmal.de

Christoph Zimmermann, Erfurt

christoph.zimmermann@ekmd.de

8. Anhang

Tests zur Verwendung flacher Heizelemente zur luftfeuchtegesteuerten
Temperierung in Kirchenorgeln

ATP-Testreihe Entwicklung Aktivität des Befalls in der Orgel des Klosters

Michaelstein, Testlauf Luftfeuchtereulierte Temperierung in der Orgel

Anlegen von Probeflächen für die Bewertung verschiedener

Reinigungsmethoden in der Orgel in Kloster Michaelstein

JENS KLOCKE

DIPLOMRESTAURATOR (FH)



KÖNIGSTRASSE 7
31139 HILDESHEIM
TEL.:
05121 / 134189
FAX:
05121 / 2849457
MOBIL:
01608432178
E-MAIL:
jens.klocke@freenet.de

**Forschungsprojekt
Schimmelbefall an Orgeln in Kirchenräumen –
Entwicklung und Erprobung von Strategien zur
Prävention und Bekämpfung (SCHIK)**



DBU AZ 34554/01-45

Tests zur Verwendung flacher Heizelemente zur luftfeuchtgesteuerten Temperierung in Kirchenorgeln

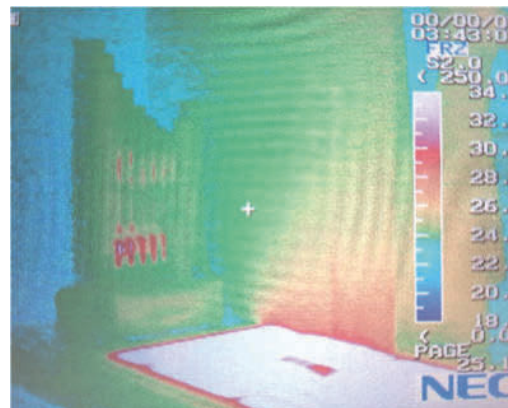
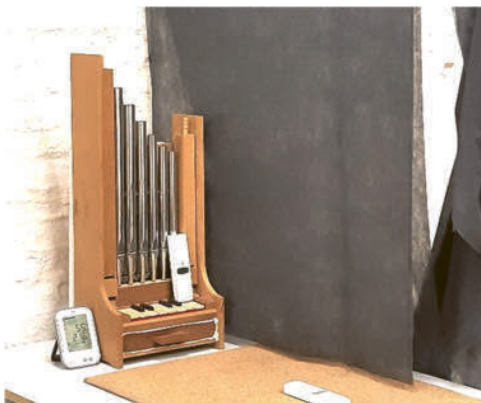


Abb. 1
Aufbau Orgel hinter Teppich mit Thermographiebild

14.04.2022

Inhalt

1 Fragestellung.....	3
2 Testaufbau.....	3
2.1 Ohne Orgelgehäuse.....	3
2.1.1 Heizteppich.....	3
2.1.2 Simulation Kirchenorgel.....	3
2.1.3 Messen	4
2.1.3.1 Luftfeuchte und Temperatur	4
2.1.3.2 Aufheizung	6
2.1.3.3 Energie	7
2.1.3.4 Luftbewegung.....	7
2.2 Mit Orgelgehäuse.....	8
2.2.1 Heizteppich.....	8
2.2.2 Simulation Kirchenorgel mit Orgelgehäuse	9
2.2.3 Messen	10
2.2.3.1 Luftfeuchte und Temperatur	10
2.1.3.2 Thermographie	12
2.1.3.3 Energie und Energiekosten	13
2.1.3.4 Luftbewegung.....	14
2.1.3.5 Luftfeuchtegesteuerter Heizteppich	15
Feuchtegeregelter Heizbetrieb auf einen Blick.....	16
3 Ergebnisse.....	17
3.1 Feststellungen.....	17
3.1.1 Es funktioniert prinzipiell.....	17
3.1.2 Es funktioniert nicht überall	17
3.1.3 Temperaturverteilung	17
3.1.4 Energiekosten	18
3.1.5 Energieleistungsverteilung bei Einbau in einer Kirchenorgel.....	18
3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	18
4 Projektplan für den Einbau der Technik in einer Orgel	19
4.1 Welche Geräte in welcher Menge sollen in welche Orgel mit entsprechender Grundfläche und Rauminhalt eingebaut werden?	19
4.2 Welche Anforderungen und Parameter sind an die Schaltwerte und Platzierung der Sensoren der Regeltechnik zu stellen?.....	19
4.3 Welche Regeltechnik und Elektro-Peripherie wird benötigt?.....	19
4.4 Welche Messtechnik wird zur Überprüfung des Erfolgs gebraucht? Welche Messintervalle sind sinnvoll?.....	19
4.4.1 Klimadatenlogger an 5-6 Stellen neben und in der Orgel.....	19
4.4.2 Thermographie-Untersuchungstermine	19
4.4.3 Nebeltests	20
4.5 Laufzeit	20

1 Fragestellung

Lassen sich Heizelemente wie Heizteppiche, Flächenheizkörper oder Infrarot-Heiztapeten für die luftfeuchtegesteuerte Temperierung in Kirchenorgeln verwenden?

2 Testaufbau

Testaufbau 2.1.1 ist die erste Versuchsanordnung. Ergebnis war, dass man durch das fehlende Orgelgehäuse die Energie des Heizteppichs im Raum so stark verliert, dass der Effekt der Entfeuchtung nicht eintritt.

Da Orgeln ein Orgelgehäuse haben, muss auch der Testaufbau mit einem Orgelgehäuse den Effekt des Heizteppichs beisammen halten um die Anwendung bei einer großen Orgel darstellen zu können.

Testaufbau 2.2 ist mit einem simulierten Orgelgehäuse.

2.1 Ohne Orgelgehäuse

2.1.1 Heizteppich

Der Heizteppich wurde in Absprache mit Küster Windisch aus der Kirche in Schwarzenberg geliehen. Der Heizteppich hat ein 220V Kabel mit Netzstecker und ist nicht regelbar.

2.1.2 Simulation Kirchenorgel

Als Orgelmodell wurde ein Orgelportativ mit Metall- und Holzpipen verwendet. Ein Tisch, der an eine Keller-Außenwand herangerückt ist, dient als Simulation der Orgelempore. Der Heizteppich liegt auf dem Tisch und unter der Orgel.

Abb. 2
Simulation Orgelempore



2.1.3 Messen

2.1.3.1 Luftfeuchte und Temperatur

Mit einem Klimadatenlogger werden an 5 Stellen Luftfeuchte und Temperatur gemessen

I : neben Orgel, neben Teppich,
Zentraler Datensammler

1 : auf Orgeltasten

2 : hinter Orgel

3 : über Orgel an der Wand

4 : auf Heizteppich vor Orgel

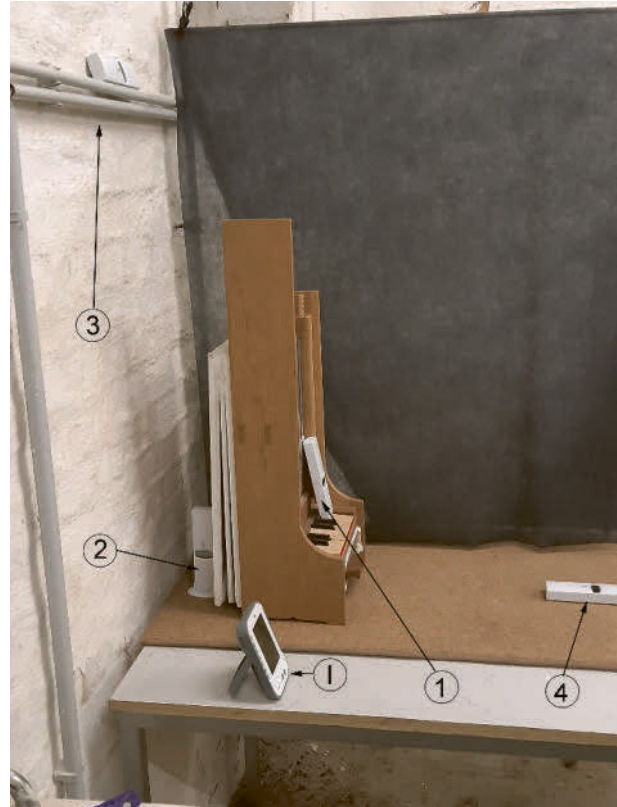
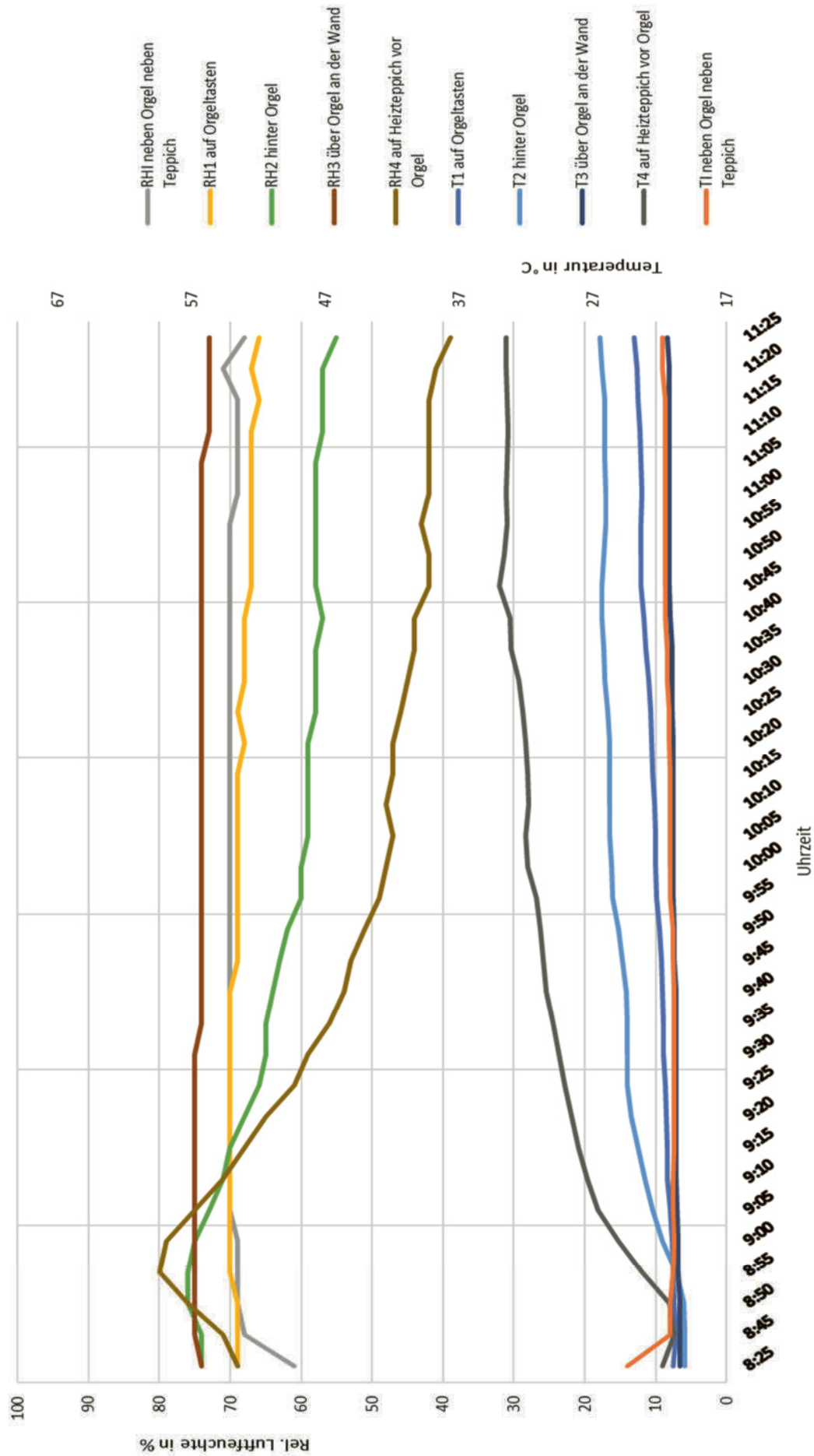


Abb. 3
Positionen der Klimamesspunkte

Heizteppich unter Orgel 1



2.1.3.2 Aufheizung

Mit einer Thermographiekamera werden die Oberflächentemperaturen vor, während und nach dem Aufheizen des Heizteppichs sichtbar gemacht. Ein dünner dunkelgrauer Stoffvorhang macht die Wärmeverhältnisse in der Luft vor der Orgel und über dem Heizteppich mit der Thermographiekamera sichtbar.

Abb. 4
Vor dem Aufheizen

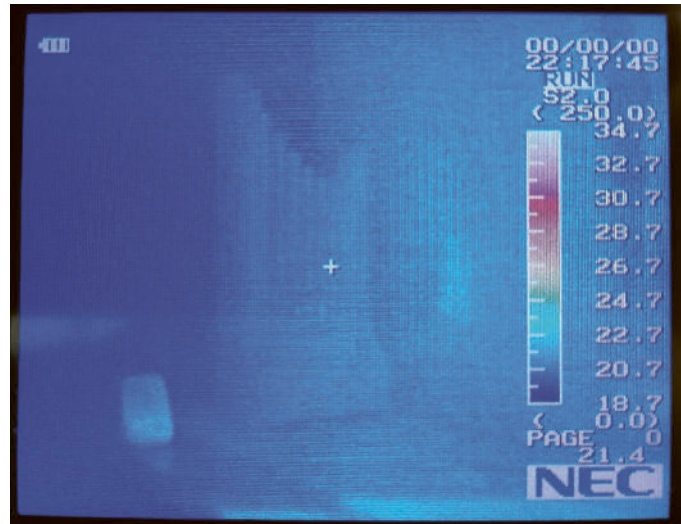


Abb. 5
während des Aufheizens

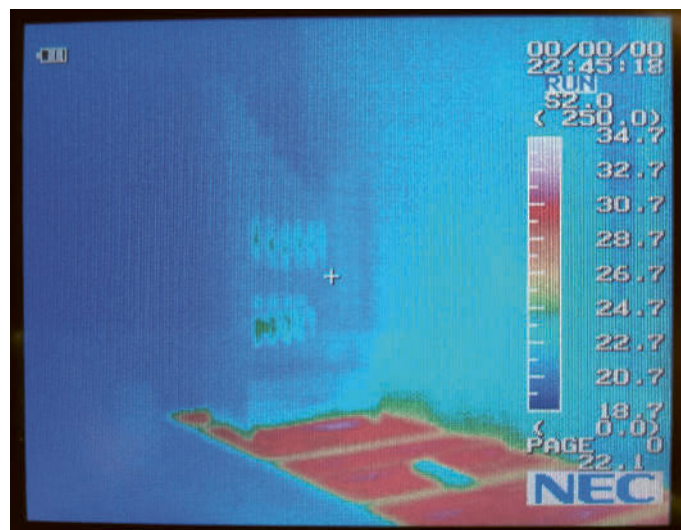
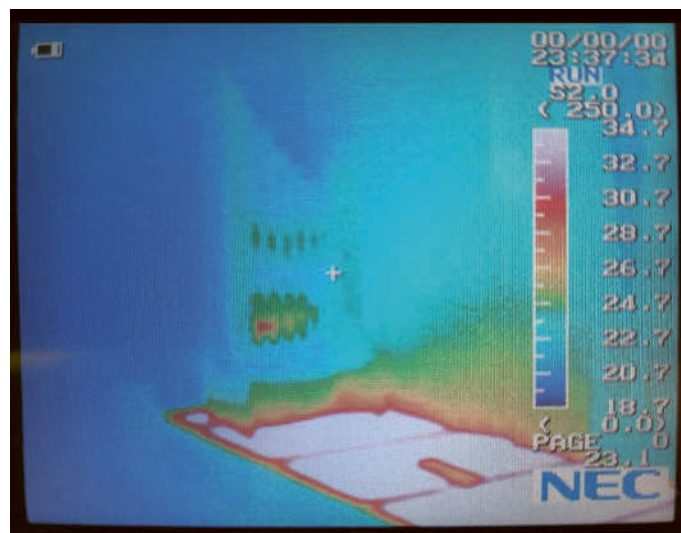


Abb. 6
Heizteppich in vollem Heizbetrieb



2.1.3.3 Energie

Ein Messgerät zeichnet den Energieverbrauch des Heizteppichs in kWh (Kilowattstunden) auf, um im Idealfall eine Annäherung an den Energieverbrauch der Heizung bei einer Kirchenorgel berechnen zu können.

Abb. 7
Messgerät für Stromverbrauch nach etwa 1 Stunde Betrieb des Heizteppichs



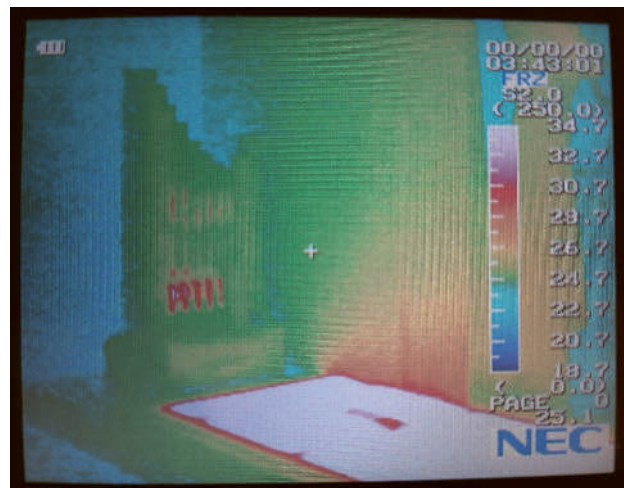
2.1.3.4 Luftbewegung

Mit Hilfe eines Nebelgerätes können auf Video die Luftbewegungen innerhalb des Versuchsaufbaus sichtbar gemacht werden.



Abb. 8
Standbild eines Videos zum Nebelversuch

Abb. 9
Auf dieser Abbildung eines Vorversuchs ist zu sehen, wie die warme Luft vom Rand des Heizteppichs zur Mitte hin die Luft erwärmt und auf dem Stoffvorhang für die Thermographiekamera sichtbar wird.



2.2 Mit Orgelgehäuse

Der erste Test hat gezeigt, dass die Wirkung des Heizteppichs schon auf den Orgeltasten, also 10 cm entfernt im Hinblick auf die Senkung der Luftfeuchte sehr gering ausfiel.

Die Wirkung verliert sich im Raum.

Um die typische Orgel in einer Kirche abzubilden fehlt diesem Modell das Orgelgehäuse, welches die Wirkung eines Heizteppichs trotz aller Undichtigkeiten mehr beim Instrument hält.

Daher wurde ein Orgelgehäuse zum Modell hinzugefügt.

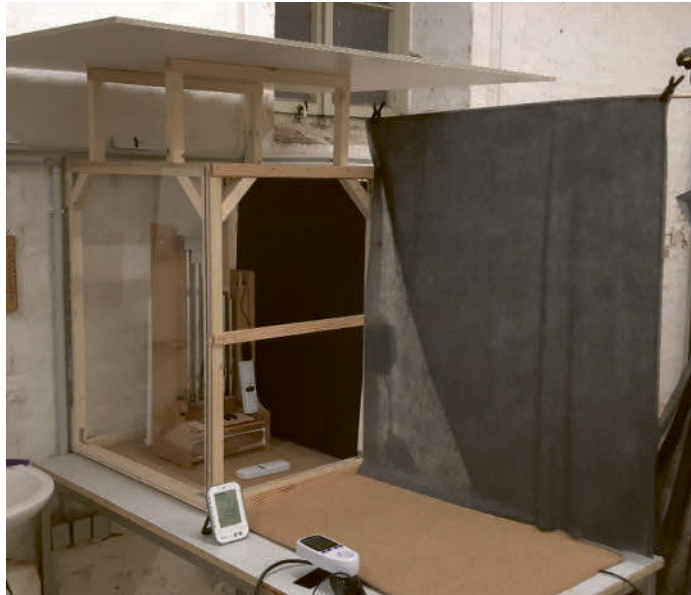


Abb. 10 Testaufbau mit Orgelgehäuse und Heizteppich auf dem Tisch. Dieser Aufbau wurde für den Vorversuch verwendet, bei dem der Heizteppich 6 Stunden lang durchgehend heizt.

Später beim Test mit luftfeuchtegeregelter Heizung wurde der überstehende Teil des Heizteppich zur Seite gedreht, so dass es nicht mehr Tisch und Vorderseite des Orgelgehäuses aufheizt. Siehe Abb. 11, S. 9.

2.2.1 Heizteppich

Es wurde der gleiche Heizteppich verwendet wie zuvor.

Typ: Kirchenheizteppich KHT 55/15

Nennleistung 210 W,

Spannung: 230 V

Schutzklasse II

Maße: Breite: 55 cm, Länge, 150 cm = 0,825 m²

Hersteller:

Hedratherm

Hauptstraße 126

08428 Langenbernsdorf

Er wurde so in das Orgelgehäuse gelegt, dass die überstehende Hälfte auf der, der Kamera abgewandten Seite heraussteht und den Versuch möglichst wenig beeinflusst. Dadurch muss bei der Berechnung der verbrauchten Heizenergie nur etwas weniger als die Hälfte für den Teppich im Orgelgehäuse berechnet werden darf. Der übrige Teppich stand neben dem Versuchsaufbau heraus und spielt keine Rolle.

Der Heizteppich wurde in Absprache mit Küster Windisch aus der Kirche in Schwarzenberg geliehen. Der Heizteppich hat ein 220V Kabel mit Netzstecker und ist nicht regelbar.

2.2.2 Simulation Kirchenorgel mit Orgelgehäuse

Als Orgelmodell wurde das gleiche Orgelportativ mit Metall- und Holzpfeifen verwendet, wie zuvor.

Dazu kam in diesem Versuchsaufbau noch das Orgelgehäuse.

- Maße: H: 85 cm B: 60 cm T: 70 cm, also 0,357 m³ Rauminhalt
- an den Seiten und nach vorn geschlossen.
- hinten zur feuchten und kühleren Kellerwand offen
- nach oben offen und 20 cm höher mit einer Simulation der Kirchendecke abgedeckt. Diese besteht aus 10 mm dicker Kapa-Plast-Platte
- auf einer Seite kann man aufklappen und vorn kann man in zwei Segmenten die Platten aufschieben um mit der Thermographiekamera die Wärmeverteilung rasch nach dem Öffnen aufzunehmen.
- die andere Seitenwand wurde innen mit schwarzer Fotokarton-Pappe belegt, um statt der Innenreflexion der Plexiglasscheibe ein gutes Thermographieergebnis zu bekommen, wenn das Orgelgehäuse für die Thermographie geöffnet wird

2.2.3 Messen

2.2.3.1 Luftfeuchte und Temperatur

Mit einem Klimadatenlogger werden an 5 Stellen Luftfeuchte und Temperatur gemessen

l : (interner Sensor)
außerhalb, neben
Orgelgehäuse,
neben Teppich,
zentraler
Datensammler

1 : auf Orgeltasten

2 : hinter Orgel, kein
Teppich drunter

3 : über Orgel an
der Wand

4 : auf Heizteppich
vor Orgel

a : Kapa-Plast-
Platte, simuliert die
Kirchendecke

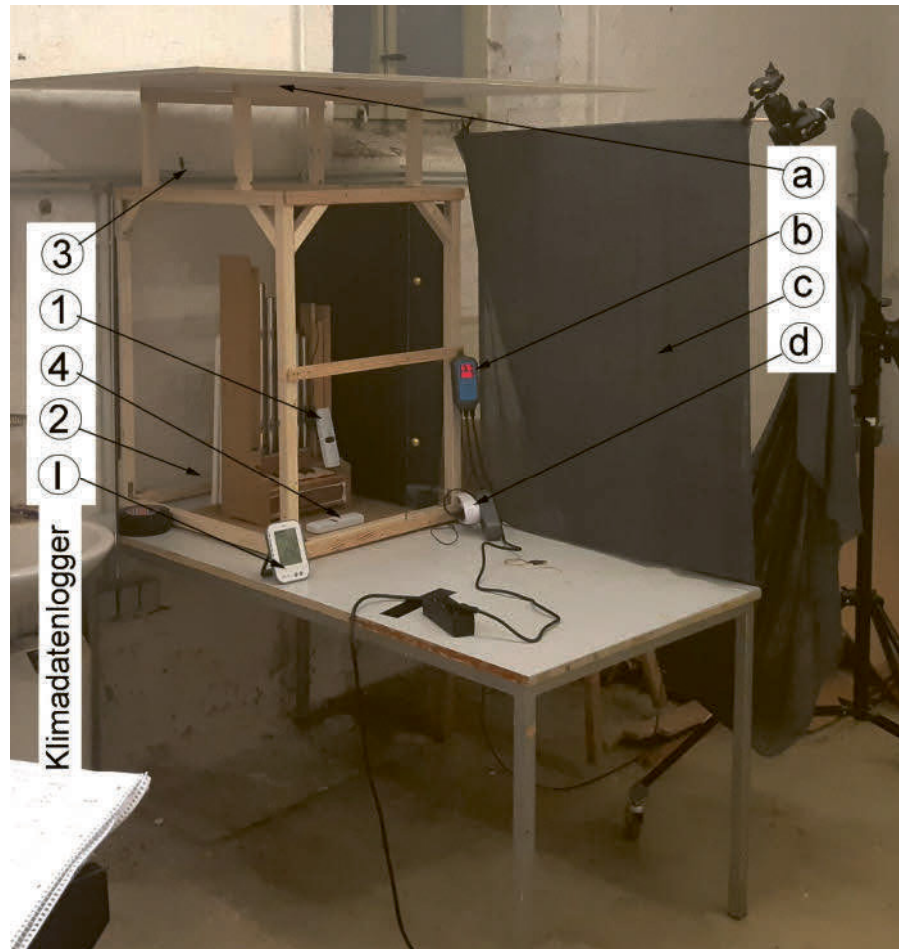
b : Steuergerät für
die Schaltung des
Heizteppichs über
die Luftfeuchte in der Orgel

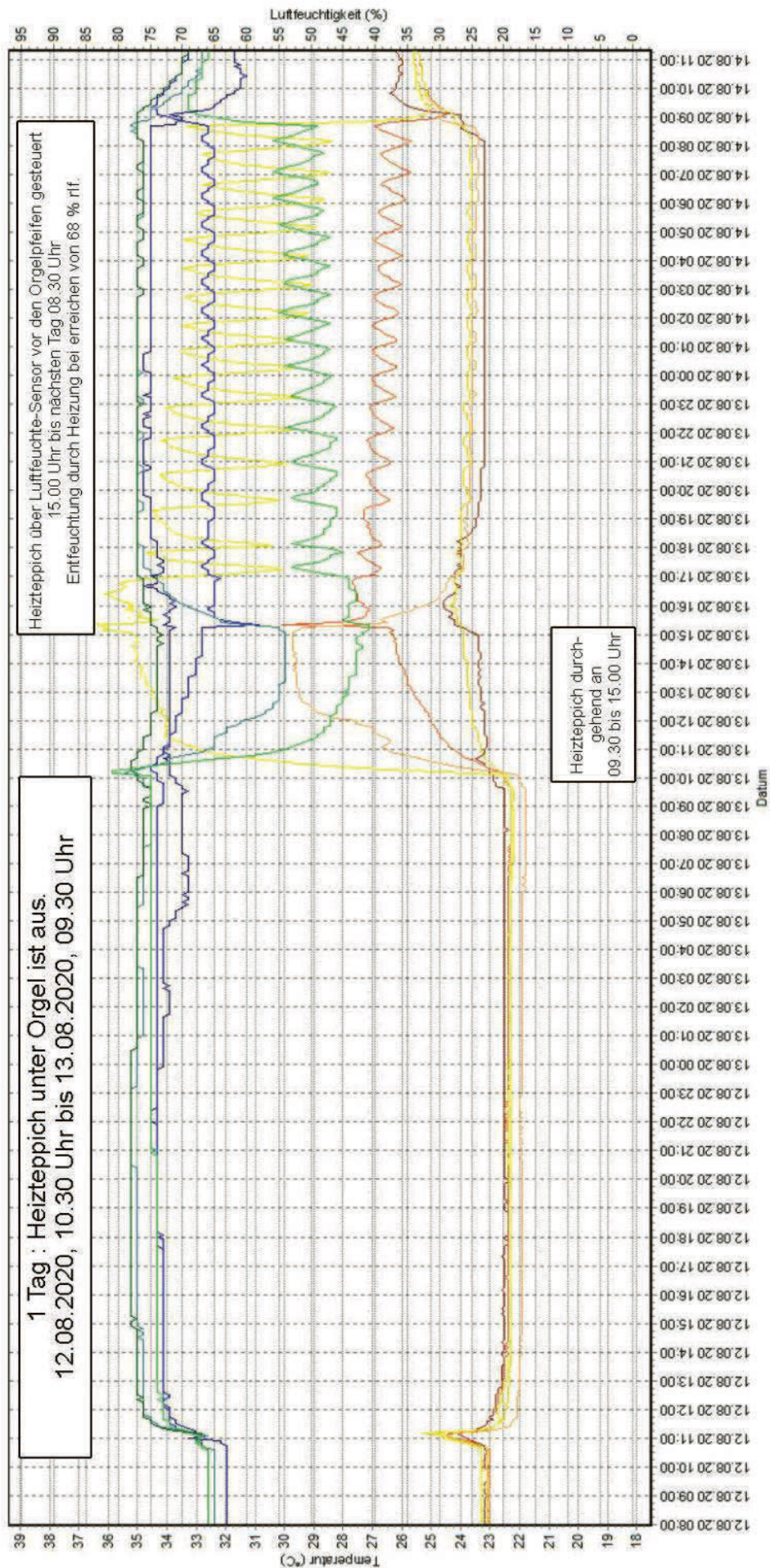
b' : Luftfeuchtesensor des Steuergeräts
(schwarz), vor der rechten Metallpfeife

c : Textilvorhang vor dem Orgelgehäuse um die
Lufttemperatur mit der Thermographie abbilden zu
können

d : Energieverbrauchs-Speichergerät misst den
Energieverbrauch des Heizteppichs und dessen
Betriebsdauer.

Abb. 11 (oben) und 12 (rechts)
Positionen der Klimamesspunkte weiterer
und Versuchselemente





Sensoren

- Interner Sensor
 - Temperatur █
 - Luftfeuchtigkeit █
- [1] - 70ED
 - Temperatur █
 - Luftfeuchtigkeit █
- [2] - 686B
 - Temperatur █
 - Luftfeuchtigkeit █
- [3] - 0588
 - Temperatur █
 - Luftfeuchtigkeit █
- [4] - 74E1
 - Temperatur █
 - Luftfeuchtigkeit █

Abb. 12
Klimadaten des 2. Versuchs mit Orgelgehäuse

2.1.3.2 Thermographie

Mit einer Thermographiekamera werden die Oberflächentemperaturen sichtbar gemacht.

Ein dünner dunkelgrauer Stoffvorhang macht die Wärmeverhältnisse in der Luft vor der Orgel mit der Thermographiekamera sichtbar.

Für die Thermographieaufnahmen werden kurz zuvor die beiden Plexiglasscheiben an der Front des Orgelgehäuses aufgeschoben und die Seitenscheibe des Orgelgehäuses geöffnet, damit die Kamera die Temperaturen im Inneren erfassen kann. Die Plexiglasscheiben sind nicht durchsichtig für die Thermographie. Die gegenüber liegende Seitenscheibe wurde innen mit schwarzem Karton belegt, um die Reflexion der glatten Plexiglasscheibe bei der Thermographiemessung hier zu vermeiden.

Abb. 13
Versuchsaufbau am Tag zuvor aufgebaut und an das Klima im Kellerraum gewöhnt.
Vorversuch:
Heizteppich durchgehend in Betrieb,
13.08.2020,
Foto: 09.30 Uhr
Spreizung der Temperaturskala:
21,6 °C - 33,6 °C
Kaum Kontrast, da Wand 23°C und Luft 24,5°C

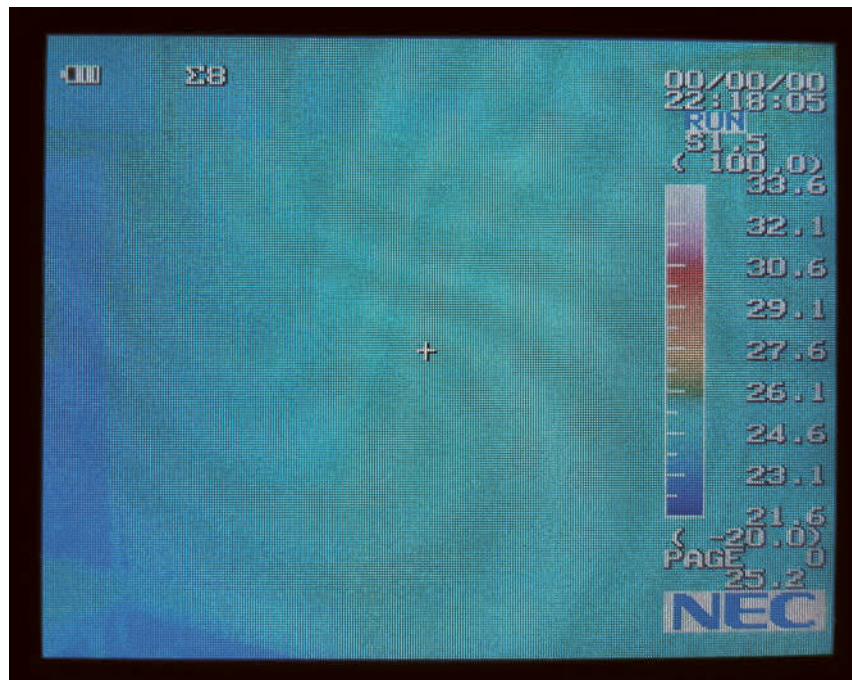


Abb. 14
Vorversuch:
Heizteppich durchgehend in Betrieb,
13.08.2020,
09.30 – 15.00 Uhr
Foto: 15.00 Uhr
Spreizung der Temperaturskala:
21,6 °C - 33,6 °C



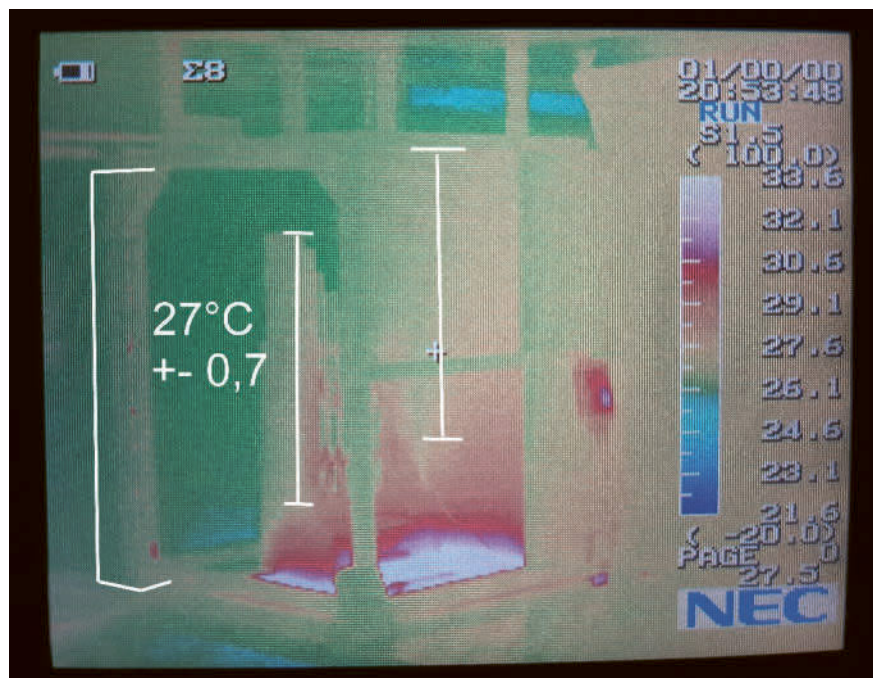
Abb. 15
während des Betriebs
mit
luftfeuchtegesteu-
tem Heizteppich,
13.08.2020 15.00 Uhr
bis
14.08.2020 08.30 Uhr
Foto:
14.08.2020 08.30
Spreizung der
Temperaturskala:
21,6 °C - 33,6 °C



Die Temperaturverteilung nach dem luftfeuchtegeregelten Betrieb (Abb. 15) ist deutlich gleichmäßiger, als nach dem Dauerbetrieb des Heizteppichs (Abb. 14).

Entlang der vertikalen Orgelgehäuse-Stütze links im Bild, sowie entlang der linken Orgelwange und der linken Holzpfeife, sowie entlang der oberen 70 % der rechten Orgelgehäuse-Innenwand ist eine recht gleichmäßige Temperaturverteilung von 27°C +/- 0,7°C zu finden. Dies liegt 2 °C über den durchgehenden 23°C außerhalb des Orgelgehäuses (Abb. 16).

Abb. 16
wie Abb. 15 mit
eingezeichneten
gleichmäßigen
Temperaturstrecken



2.1.3.3 Energie und Energiekosten

Ein Messgerät zeichnet den Energieverbrauch des Heizteppichs in kWh (Kilowattstunden) auf, um im Idealfall eine Annäherung an den Energieverbrauch der Heizung bei einer Kirchenorgel berechnen zu können.

Im Regelbetrieb mit einer Dauer von 17,5 Stunden zeigt das Messgerät eine Betriebszeit des Heizteppichs von 10,5 Stunden, in denen 2,04 kWh (Kilowattstunden) verbraucht wurden. Das sind 60% Heiz-Zeit.

Die Leistung des Heizteppichs liegt laut Messgerät zum Zeitpunkt des Ablesens um 180 W. Rechnet man den gemessenen Verbrauch zurück, liegt die Leistung im Schnitt bei 194 W.

Bei diesem Versuch wurde nur eine Fläche von 55 cm x 60 cm von dem Teppich genutzt, also 40%.

Der Versuchsaufbau hat also tatsächlich weniger Energie verbraucht, weil 60 % des Teppichs nicht wirksam für den Versuch verbaut waren.

In den Versuch wirkten bei Heizbetrieb also etwa 78 W ein, also 218 W / m³ bzw. 186 W / m².

Vermutlich wird auch die Hälfte oder ein Viertel der hier aufgewendeten Leistung wirksam sein.

Tatsächlich wurden also 0,816 kWh in 10,5 Stunden im Modellorgelgehäuse verbraucht. Das entspricht etwa 1,87 kWh am Tag für 0,357 m³ Rauminhalt des Orgelgehäuses.

Das entspricht 5,24 kWh pro m³ pro Tag durchgängigem Betrieb.

Der Rauminhalt eines durchschnittlichen Orgelgehäuses ergibt bei 5x5x6m =150m³.

Ein Tag durchgehender Heizbetrieb verbraucht bei diesem größer skaliertem Versuch dann rechnerisch 786 kWh.

Beim Strompreis 2020 von 0,31 € /kWh brutto kostet das pro Tag durchgängigem Heizbetrieb 243,66 € brutto.

Bei 60% Heiz-Zeit- Anteil wie im Modellversuch sind es noch 146,20 € brutto.

Geht man von 20% der Tage eines Jahres aus, in der die Anlage witterungsbedingt anspringt, ergeben sich Heizkosten von 10.672,31 €.

Selbst wenn man statt 8% Verringerung der rel. Luftfeuchte nun nur 2 % anstrebt und dafür grob durch 4 teilt ist man bei 2668,01 € brutto pro Jahr.

2.1.3.4 Luftbewegung

Mit Hilfe eines Nebelgerätes können auf Video die Luftbewegungen innerhalb des Versuchsaufbaus sichtbar gemacht werden.

Die Luftbewegung wurde in drei verschiedenen Zuständen im Inneren des Orgelgehäuses beobachtet:

1. Ruhezustand, ohne Heizung
2. Heizteppich durchgehend 6 Stunden angeschaltet
3. Heizteppich über Luftfeuchte gesteuert

In allen drei Situationen stieg die Luft vor der Orgel hoch, wandert über die Pfeifen hinter die Orgel und fällt dort zwischen Orgel und kühler, feuchter Wand wieder herunter, zieht dann neben der Orgel am Boden wieder nach vorn, um dort erneut aufzusteigen.

Im Heizbetrieb drehte sich die Luftwalze nur deutlich schneller.

2.1.3.5 Luftfeuchtigkeitsgesteuerter Heizteppich

Mit einem Steuergerät der Firma Inkbird kann eine Steckdose angeschaltet werden, wenn ein bestimmter Luftfeuchtigkeitswert am Sensor überschritten wird.

Dieser Wert wird am Gerät eingestellt.

Die Luftfeuchtigkeit am Testtag betrug um die 74% rel. Luftfeuchte.

Am Gerät wurde der Sollwert (HS) von 68 % Luftfeuchte eingestellt und der Entfeuchtung-Differenzwert von 1% rel. Luftfeuchte. Über 69 % rel. Luftfeuchte wird also geheizt bis 68 % erreicht sind.

Das Steuergerät hat eine Ist-Wert- und eine Soll-Wert-Anzeige und zwei Steckdosen für Entfeuchtung („Work 2“) und für Befeuchtung („Work 1“). Für diesen Versuch wird nur Entfeuchtung („Work 2“) gebraucht und dort der Heizteppich mit dem Stromverbrauch-Messgerät angeschlossen.

Das Steuergerät (Abb. 17, siehe: b) hat einen Feuchtigkeitsfühler (Abb. 17, siehe: b`).

Abb. 17

b : Steuergerät für die Schaltung des Heizteppichs über die Luftfeuchte in der Orgel

b` : Luftfeuchtesensor des Steuergeräts (schwarz), vor der rechten Metallpfeife

unten das Messgerät für Stromverbrauch gibt nach 10:35 Stunden einen Stromverbrauch von 2,044 kWh (Kilowattstunden) an



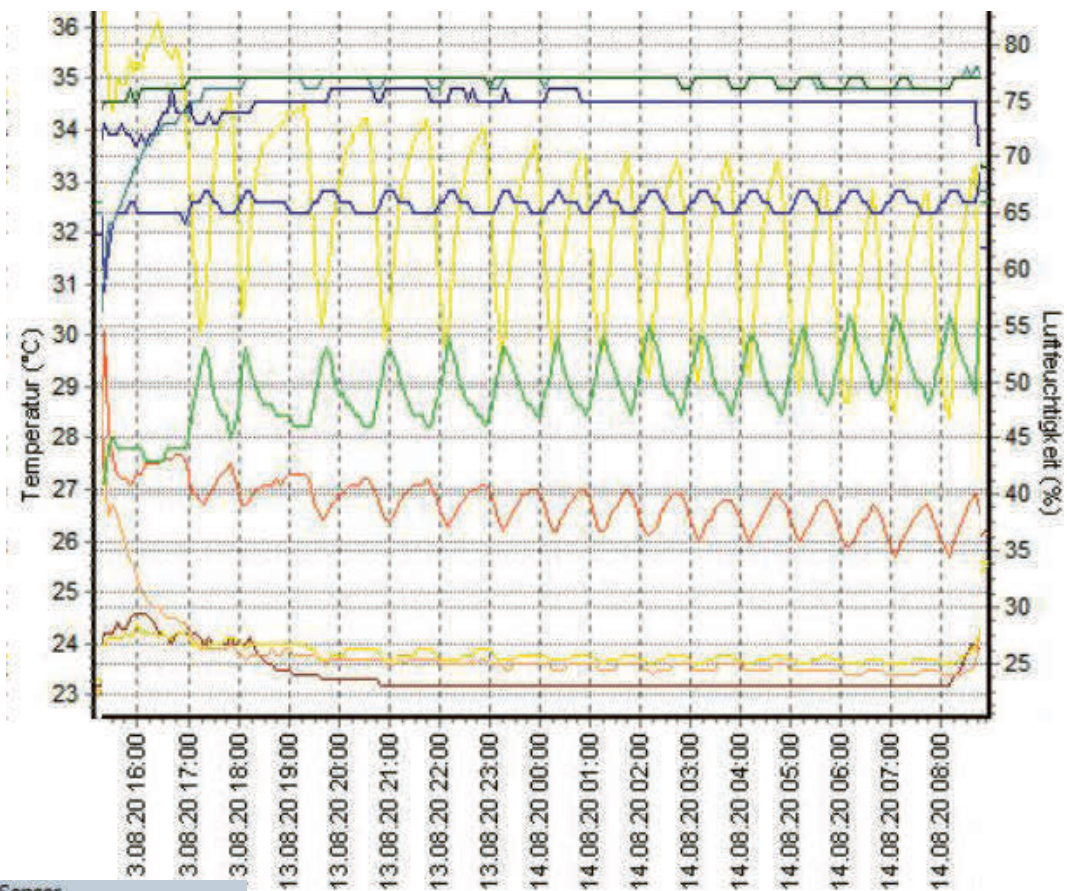
Feuchtegeregelter Heizbetrieb auf einen Blick

während des Betriebs mit luftfeuchtegesteuertem Heizteppich, 13.08.2020 15.00 Uhr bis 14.08.2020 08.30 Uhr



Abb. 18
Foto: 14.08.2020 08.30
Spreizung der Temperaturskala:
21,6 °C - 33,6 °C

Abb. 19
Klimadaten



Interner Sensor	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatur	<input type="text" value=""/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value=""/>
[1] - 70ED	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatur	<input type="text" value=""/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value=""/>
[2] - 686B	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatur	<input type="text" value=""/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value=""/>

I S : Außerhalb,

3 : über Orgel an Wand

1 : auf Orgeltasten

4 : auf Heizteppich

2 : hinter Orgel,
kein Teppich drunter

[3] - 0588	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatur	<input type="text" value=""/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value=""/>
[4] - 74E1	<input checked="" type="checkbox"/> Temperatur	<input type="text" value=""/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value=""/>

3 Ergebnisse

Fragestellung zu diesem Test war:

„Lassen sich Heizelemente wie Heizteppiche, Flächenheizkörper oder Infrarot-Heiztapeten für die Luftfeuchtgesteuerte Temperierung in Kirchenorgeln verwenden?“

3.1 Feststellungen

3.1.1 Es funktioniert prinzipiell

Das Klima an Messstelle 1, auf den Orgeltasten zeigt, dass sich die Temperatur im Modell um 3 °C (im Durchschnitt) anheben ließ, während sich die relative Luftfeuchtigkeit um 8% (im Durchschnitt) senkte.

Fazit: Das System funktioniert im Prinzip. Wenn man die Steuerelektronik auf geringere Feuchtereduktion und kürzere Schaltintervalle einstellt, so mildern sich die Ausschläge der Messkurven vermutlich auf ein wünschenswertes Maß.

3.1.2 Es funktioniert nicht überall

Bei Messstelle 2, auf der Rückseite der Orgel, wo der Heizteppich nicht mehr lag, in der Nähe der etwas kälteren und feuchteren Mauer war die Temperatur im Heizbetrieb nur ein halbes °C höher und die relative Luftfeuchtigkeit entsprach in etwa dem gleichen Wert, wie vor der feuchten Wand (Messstelle 3).

Fazit: Die Heizelemente müssen gleichmäßig ausgelegt werden. Wo kein Heizelement liegt, dort kann ein Bereich ohne entfeuchtende Wirkung in der Orgel bestehen bleiben. Eventuell ist es wichtiger in den kälteren Bereichen zu heizen als in den wärmeren, also eher hinter der Orgel als vor der Orgel. Hier kommt wieder die optionale schwache Ventilation in den Blick des Versuchs am Originalobjekt. Die Ventilatoren sollen die Wärme im Orgelgehäuse verteilen, nicht aber die warme Luft hinausblasen.

3.1.3 Temperaturverteilung

Abb. 16 zeigt vertikale Strecken im Orgelgehäuse, bei denen die Temperaturverteilung bei etwa 2-3°C über Außentemperatur dennoch recht gleichmäßig ist. Direkt über dem Heizteppich ist die Temperaturspreizung stärker und damit ungünstiger.

Fazit: Eine relativ gleichmäßige Temperaturverteilung im Orgelgehäuse scheint möglich. Die Heizelemente sollten nicht direkt in Kontakt mit empfindlichen Bauteilen montiert werden. Die Montage unter dem Instrument oder zumindest im Fußbodenbereich um das Instrument herum innerhalb des Orgelgehäuses scheint prinzipiell eine sinnvolle Montage für gleichmäßige Temperaturverteilung zu sein. Etwas Abstand nach oben wäre gut.

3.1.4 Energiekosten

Die hier aufgestellte, annähernde Rechnung des Energieverbrauchs in einer Orgel anhand dieses Modells deutet darauf hin, dass ein 4-stelliger Betrag im Jahr für Betriebsenergie zusammenkommen kann.

Fazit: Dies sollte nicht verhindern, diese Technik in der Praxis zu prüfen. Dabei müssen die tatsächlichen Energiekosten gemessen werden und die gemessenen Abweichungen zur hier angestellten Modellrechnung herausgefunden werden. Danach erst wird ein neues Modell zur Schätzung der Energiekosten erstellt um die Technik bepreisen zu können. Dann erst sollten die Energiekosten dieser Technik vor dem Hintergrund ihres Nutzens bewertet werden.

3.1.5 Energieleistungsverteilung bei Einbau in einer Kirchenorgel

In Abschnitt 2.1.3.3 wird hergeleitet, dass im Modellversuch $218 \text{ W} / \text{m}^3$ bzw. $186 \text{ W} / \text{m}^2$ angewendet wurde. Schätzungsweise 25% davon könnten auch schon wirksam sein. Beim Rauminhalt eines durchschnittlichen Orgelgehäuses ergibt sich bei $5 \times 5 \times 6 \text{ m} = 150 \text{ m}^3$ Rauminhalt auf 30 m^2 Grundfläche.

Für den Einbau in eine Orgel dieser Größe braucht man also nach dieser Schätzung eine Leistung von

- $8.175 \text{ W} - 32.700 \text{ W}$ gerechnet nach m^3 oder
- $1.395 \text{ W} - 5.580 \text{ W}$ gerechnet nach m^2 .

Die niedrigste Schätzung (1395 W) ergibt den Einbau von 7 Heizteppichen der Firma Hedratherm, Größe $1050 \times 2100 \text{ mm}$, Nennleistung von je ca. 440 Watt in eine Orgel mit 30 m^2 Grundfläche. Damit wären $15,4 \text{ m}^2$ der Grundfläche von 30 m^2 mit Heizteppich belegt.

3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Heizelemente wie Heizteppiche, lassen sich für die luftfeuchtegesteuerte Temperierung in Kirchenorgeln verwenden.

Ein Einbau dieser Technik an einer Orgel soll zeigen, ob die Modellberechnungen die Wirklichkeit abbilden konnten.

4 Projektplan für den Einbau der Technik in einer Orgel

4.1 Welche Geräte in welcher Menge sollen in welche Orgel mit entsprechender Grundfläche und Rauminhalt eingebaut werden?

Für den Einbau in eine Orgel von 5x6x5m Größe braucht man nach oben errechneter Schätzung eine Leistung von

- 8.175 W - 32.700 W gerechnet nach m³ oder
- 1.395 W – 5.580 W gerechnet nach m².

Das ergibt z.B. den Einbau von mindestens 7 Heizteppichen der Firma Hedratherm, Größe 1050 x 2100 mm, Nennleistung von je ca. 440 Watt

4.2 Welche Anforderungen und Parameter sind an die Schaltwerte und Platzierung der Sensoren der Regeltechnik zu stellen?

Das hängt von den Verbesserungen ab, die das projekteigene Prognose-Excel-Tool für die betreffende Orgel nahelegt. Größenordnung wird vermutlich etwa 2 % rel. Luftfeuchte und / oder 2 °C sein.

4.3 Welche Regeltechnik und Elektro-Peripherie wird benötigt?

Dies ist mit einem Elektriker zu ermitteln. Die Erfahrungen aus der Regelanlage im Kloster Michaelstein und die betreuende Elektrofirma sollten herangezogen werden. Die Mess- und Regeltechnik aus dem Laborversuch stehen auch für die Anwendung zur Verfügung, wenn dies sinnvoll erscheint.

4.4 Welche Messtechnik wird zur Überprüfung des Erfolgs gebraucht? Welche Messintervalle sind sinnvoll?

4.4.1 Klimadatenlogger an 5-6 Stellen neben und in der Orgel.

- Erfassen des Zustands mindestens 1 Woche lang direkt vor Inbetriebnahme der Technik.
- Testhalber erstes Auslesen der Daten vor Inbetriebnahme der Technik, um sicherzustellen, dass die Aufzeichnung funktioniert.
- Zweites Auslesen nach 12- 24 Stunden Laufzeit der Technik am nächsten Tag und ggf. ändern und optimieren der technischen System-Einstellungen.
- Drittes Auslesen nach einem Monat und ggf. ändern und optimieren der technischen System-Einstellungen.

4.4.2 Thermographie-Untersuchungstermine

- Erster Termin vor Inbetriebnahme und bei Inbetriebnahme (1 Tag).
- Zweite Thermographie nach 12-24 Stunden Laufzeit am nächsten Tag.
- Dritte Thermographie nach einem Monat zusammen mit dem Auslesen der Klimadaten.

4.4.3 Nebeltests

- Erster Nebeltest vor Inbetriebnahme und bei Inbetriebnahme (1 Tag).
- Zweiter Nebeltest nach 12-24 Stunden Laufzeit am nächsten Tag.
- Dritter Nebeltest nach einem Monat zusammen mit dem Auslesen der Klimadaten.

4.5 Laufzeit

Idealerweise läuft der Betrieb mindestens ein Jahr, nach einer Anlaufphase, in der die Parameter zufriedenstellend angepasst sind und in diesem Zeitraum die möglichen Klimakorridore ausreichend erfasst werden können. Das bedeutet etwa eine Laufzeit von ca. 1,5 Jahren.

JENS KLOCKE

DIPLOMRESTAURATOR (FH)



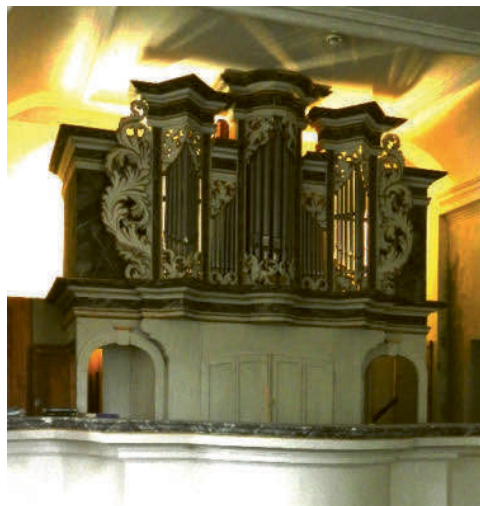
KÖNIGSTRASSE 7
31139 HILDESHEIM
TEL.:
05121 / 134189
FAX:
05121 / 2649457
MOBIL:
01608432178
E-MAIL:
jens.klocke@freenet.de

**Forschungsprojekt
Schimmelbefall an Orgeln in Kirchenräumen –
Entwicklung und Erprobung von Strategien zur
Prävention und Bekämpfung (SCHIK)**



DBU AZ 34554/01-45

- 1. ATP-Testreihe Entwicklung Aktivität des Befalls in der Orgel des Klosters Michaelstein, Testlauf Luftfeuchterregulierte Temperierung in der Orgel**
- 2. Anlegen von Probeflächen für die Bewertung verschiedener Reinigungsmethoden in der Orgel in Kloster Michaelstein**



Orgel im Kloster Michaelstein

14.04.2022

Seite 1 von 18

Inhalt

1 ATP-Testreihe Entwicklung Aktivität des Befalls in der Orgel des Klosters Michaelstein, Testlauf Luftfeuchteregulierte Temperierung in der Orgel.....	3
1.1 Fragestellung	3
1.2 Testaufbau.....	3
1.3 Der ATP-Test	6
1.4 Probestellen.....	7
1.5 Testergebnisse.....	10
1.6 Fazit.....	12
2 Anlegen von Probeflächen für die Bewertung verschiedener Reinigungsmethoden in der Orgel in Kloster Michaelstein	13
2.1 Fragestellung.....	13
2.2 Testaufbau.....	13
Probeflächen.....	13
Reinigungsprobenfelder:.....	13
2.3 Testergebnisse.....	16
2.4 Fazit.....	17

1 ATP-Testreihe Entwicklung Aktivität des Befalls in der Orgel des Klosters Michaelstein, Testlauf Luftfeuchteregulierte Temperierung in der Orgel

Testbeginn: am 30.08.2018

Letzte Messung ATP: am 06.10.2020

1.1 Fragestellung

Lässt sich der Pilzbefall in einer Orgel durch eine Luftfeuchteregulierte Temperierung in der Orgel bekämpfen?

Wenn dieser Ansatz Erfolg zeigt, wie müssen die Regelparameter und die Konfiguration der Heizelemente beschaffen sein, damit Pilzbefall gestoppt und die



Spielbarkeit der Orgel davon nicht beeinträchtigt wird?



Abb. 1 / 2 Kloster Michaelstein, Kapelle

1.2 Testaufbau

In der Orgel in Michaelstein wurden Heizkörper aufgestellt, die bei Überschreiten einer bestimmten relativen Luftfeuchte in der Orgel beginnen zu heizen, um die relative Luftfeuchte dadurch in der Orgel zu senken.

Wird ein eingestellter Zielwert der relativen Luftfeuchtigkeit in der Orgel unterschritten, schaltet die Heizung wieder ab.

Die Regeleinstellung wurden von Projektpartner Herrn Dipl.-Ing. Uwe Kalisch, IDK Halle konfiguriert.



Abb. 3 oben
Heizkörper im vorderen Bereich des Orgelgehäuses



Abb. 4 oben rechts
Mobiler, weißer Schaltkasten im hinteren Bereich des Orgelgehäuses

Abb. 5 rechts
Heizkörper in der Mitte der Orgel



An mehreren Terminen wurde die Aktivität des mikrobiellen Befalls an drei verschiedenen befallenen Stellen auf Holzoberflächen in der Orgel mit einem ATP-Test gemessen. Dadurch werden Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der luftfeuchtgesteuerten Heizung des Orgelinneren gegen den mikrobiellen Befall möglich.

Die erste Messung fand vor Installation der Heizung statt. Drei weitere Messungen fanden während der Laufzeit der Heizanlage statt. Weitere Messungen sind in Zukunft vorgesehen.

Abb. 6

Probennahme mit dem ATP-Teststäbchen



1.3 Der ATP-Test

Das ATP (Adenosintriphosphat) ist ein Stoff, der in lebenden Organismen, so auch in Pilzen und Bakterien als Energieträger dient, um dann unter Abgabe von Energie zu Adenosindiphosphat oder –monophosphat zu zerfallen (ADP /AMP).

Die Menge an enthaltenem ATP in einer mit Mikroorganismen belasteten Probe kann als Maß für die Aktivität des Befalles dienen. Zur ATP-Bestimmung dient ein Verfahren, welches sich das Phänomen der Biolumineszenz zunutze macht.

Das hier verwendete Gerät ist der Photomultiplier Lumitester C-100 mit den Teststäbchen LuciPac II¹.

An verschiedenen Stellen wurden jeweils 4 cm² Fläche mit dem trockenen Teststäbchen abgerieben.

Die Teststäbchen wurden auf der Oberfläche sehr vorsichtig jeweils 20-mal hin und her gerieben und dann erneut in 90° verdrehter Richtung jeweils 20-mal hin und her gerieben.

Maßeinheit ist Relative Light Units (RLU). RLU ist eine gerätinterne Größe, „Relative Light Units“ und proportional zu der im Reaktionsgefäß emittierten Lichtmenge.

Werte zwischen 100 und 500 RLU/cm² definiert der Verfasser bei einem Oberflächenbefall als schwache Aktivität, Werte zwischen 500 und 1000 RLU/cm² als deutliche Aktivität, sowie Werte ab ca. 1000 RLU/cm² aufwärts als starke Aktivität. Eine dünne Staubschicht auf einer Metalloberfläche kann bei 70% relativer Luftfeuchte z.B. 65 RLU/cm² ergeben. Daher werden Werte unter 100 RLU/cm² nicht als Hinweis auf eindeutige Aktivität gesehen.

¹ produziert von der Firma: Kikkoman Corporation, 250 Noda, Noda City, Chiba Pref. 278-8601 Japan
Seite 6 von 18

1.4 Probestellen

Messstelle 1

Windlade, Oberseite, zwischen letzter und vorletzter Reihe Holzpfifen vor der Orgelraum-Rückwand, C-Seite

Diese Messstelle hatte bei der ersten Untersuchung am 30.08.2019 noch die Bezeichnung „MST 1“.

Messstelle 2

Windlade, Endstück, Hirnholz, vertikale Fläche mit verschimmelter Leimfuge, ca. 180 cm Höhe über Fußboden, C-Seite

Diese Messstelle hatte bei der ersten Untersuchung am 30.08.2019 noch die Bezeichnung „MST 4“.

Messstelle 3

Umlenkholzer 50 cm hinter dem Spieltisch, fluffiges Mycel auf der Oberseite der Hölzer.

Diese Messstelle hatte bei der ersten Untersuchung am 30.08.2019 noch die Bezeichnung „MST 5“.

Messstelle 4

Oberseite Pfeifenstock über Windlade mit Metallpfifen, 100cm über Fußboden, C-Seite

Diese Messstelle hatte bei der ersten Untersuchung am 30.08.2019 noch die Bezeichnung „MST 3“.



Abb. 7 und 8
Probestelle Messstelle 1, Windlade, Oberseite, zwischen letzter und vorletzter Reihe von Holzpfеifen vor Orgelraum-Rückwand



Abb. 9 und 10
Details, Probestelle Messstelle 1, Windlade, Oberseite, zwischen letzter und vorletzter Reihe von Holzpfеifen vor Orgelraum-Rückwand

Abb. 11
Probestelle Messstelle 2,
Windlade, Endstück,
Hirnholz, vertikale Fläche mit
verschimmelter Leimfuge,
ca. 180 cm Höhe über
Fußboden, C-Seite



Abb. 12
Probestelle Messstelle 3,
Umlenkholzer 50 cm hinter
Spieltisch, fluffiges Mycel
auf Oberseite



Abb. 13
Probestelle Messstelle 4,
Oberseite Pfeifenstock über
Windlade mit Metallpfeifen,
100cm über Fußboden, C-
Seite



1.5 Testergebnisse

ATP-Testfläche, die mit dem Teststäbchen abgerieben wurde, ist jeweils ca. 4 cm² groß. Bei einer späteren Probennahme der gleichen Messtellenummer wird eine neue Testfläche direkt neben der Testfläche des vorigen Testtermins verwendet, da bei der Probennahme Pilzmycel und Staub von der Oberfläche abgenommen wird und sich beides erst langsam wieder aufbaut. Eine neue Testfläche bei jedem weiteren Termin zur Probennahme im Bereich der jeweiligen Messtelle ergibt daher die besser vergleichbaren Messergebnisse.

Testfläche 2x2 cm = 4 cm² trocken abgeriebene Fläche,
Maßeinheit: Relative Light Units (RLU)

Die Messwerte werden in diesem Test nicht auf RLU pro cm² umgerechnet.

Es sind in dieser Tabelle Werte von RLU pro 4 cm².

Orgel Michaelstein ATP auf 4 cm ²					
Datum	Messtelle				Anmerkungen
	1	2	3	4	
30.08.2018	146534 RLU		79554 RLU	37556 RLU	
28.03.2019	90245 RLU		25669 RLU		neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testflävche vom 30.08.2018
	5711 RLU		2907 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
29.08.2019	27736 RLU	56882 RLU	28647 RLU	27797 RLU	neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testflävche vom 28.03.2019
	702 RLU	301 RLU	2605 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
	11206 RLU	nicht gefunden	1888 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 28.03.2019 erneut abgerieben
14.01.2020	16181 RLU	24583 RLU	7729 RLU		neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testflävche vom 29.08.2019
26.05.2020	10869 RLU	19392 RLU	18234 RLU	22985 RLU	neue 4 cm ² Testfläche direkt neben der Testflävche vom 14.01.2020
	1321 RLU	873 RLU	888 RLU		alte 4cm ² Testfläche vom 30.08.2018 erneut abgerieben
06.10.2020	11612 RLU	12620 RLU	17272 RLU		neue 4 cm ² Testfläche

Die Grafik auf dieser Seite zeigt die Messwerte von jeweils zuvor unberührten, also noch nicht in einem früheren Messtermin beprobten Flächen im Bereich der jeweiligen Messstelle von 2 x 2cm (=4 cm²) Größe.

Die Messstellen zeigen alle erkennbare Schimmelkolonien und wurden zuvor nicht gereinigt

Folgende Messstellen wurden untersucht (siehe Abschnitt 1.4):

Messstelle 1

Windlade, Oberseite, ca. 100 cm Höhe über Fußboden, zwischen letzter und vorletzter Reihe Holzpfeifen vor der Orgelraum-Rückwand, C-Seite

Messstelle 2

Windlade, Endstück, Hirnholz, vertikale Fläche mit verschimmelter Leimfuge, ca. 180 cm Höhe über Fußboden, C-Seite

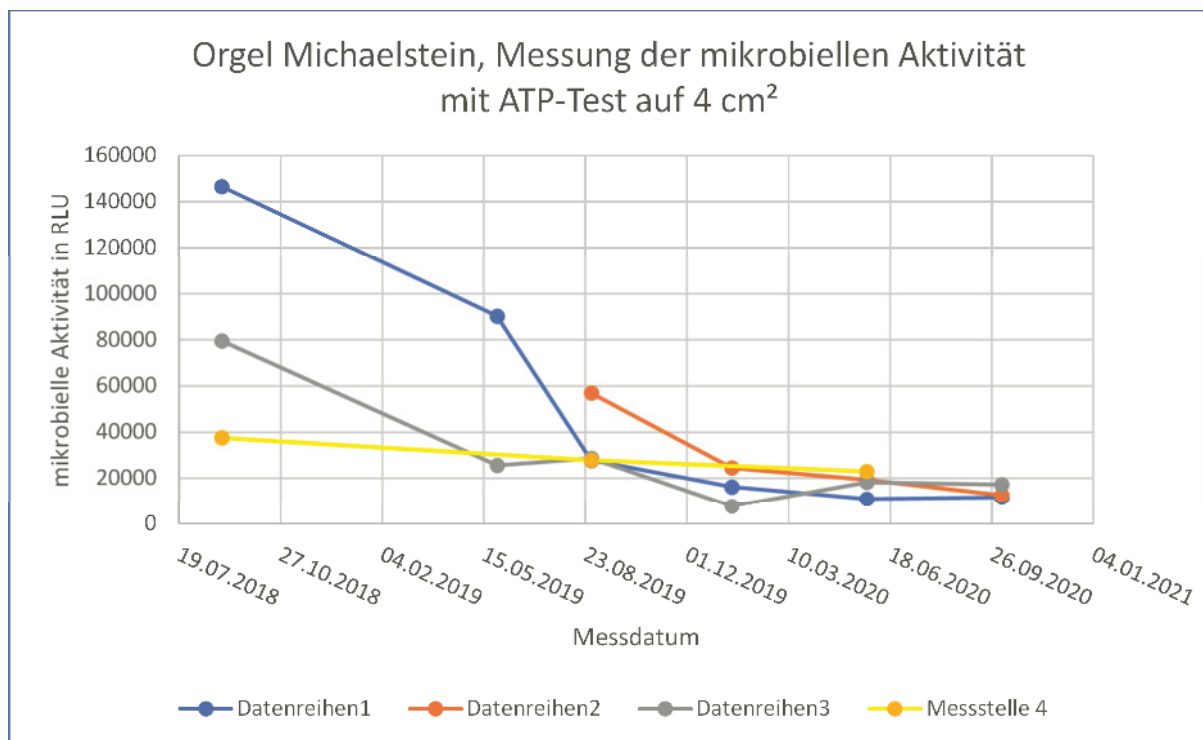
Messstelle 3

Umlenkhälzer 50 cm hinter dem Spieltisch, ca. 100 cm Höhe über Fußboden, fluffiges Mycel auf der Oberseite der Hölzer.

Messstelle 4

Oberseite Pfeifenstock über Windlade mit Metallpfeifen, C-Seite, 100cm über Fußboden, C-Seite

Messstelle 2 und 4 wurden nicht durchgehend gemessen. Im Bereich von Messstelle 4 ist seit 28.08.2019 der Probestellenbereich für verschiedene Reinigungsmethoden (Siehe nächstes Protokoll unten, Abschnitt 2).



1.6 Fazit

Als Zusammenfassung der Ergebnisse nach 15 Monaten Betrieb der luftfeuchteregulierten Temperierung in der Orgel kann folgendes festgestellt werden.

Die Messstellen 1 und 3 lassen sich über die längste Zeitspanne hinweg beurteilen.

Die Messstellen 2 und 4 zeigen ähnliche Tendenzen.

Bei Messstelle 1 hat sich die mikrobielle Aktivität um 93% reduziert.

Bei Messstelle 3 hat sich die mikrobielle Aktivität am 14.01.2020 um 90% reduziert. Dann hat die Aktivität an diesem einzigen von 4 Messpunkten zugenommen, so dass der Rückgang der mikrobiellen Aktivität seit Beginn der Messung nun nur noch bei 77% liegt.

Orgel Michaelstein ATP auf 4 cm²		
Datum	Messstelle	
	1	3
30.08.2018	146534	79554
06.10.2020	11612	17272
Restaktivität	8 %	22 %
Rückgang Aktivität	92 %	78 %

Die Grafik auf der vorhergehenden Seite deutet darauf hin, dass sich die Aktivitätskurve des alten Befalls nach deutlichem Abfallen zu Beginn der Testphase nun eher abflacht und stabilisiert.

Für das Ansteigen der Kurve an Messstelle 3 gibt es bei der Untersuchung der Reinigungsproben (Abschnitt 2, unten) eine Parallele. Auch Probefläche III im gleichen Bereich legt an Aktivität als einzige zu. Dieser Bereich hinter der letzten Orgelpfeifenreihe, direkt vor der Wand wird durch die Temperierung nicht ausreichend erreicht, bleibt vermutlich zu kühl und zu feucht. Der Bereich verlangt nach einer besseren Verteilung der Wärme aus der Temperierung.

Das bedeutet, dass eine klimatische Verschiebung zu Ungunsten der Lebensbedingungen der Schimmelpilze im hier erzielten Umfang zu deutlicher Verringerung der Aktivität eines ausgeprägten Befalls führt. Dadurch wird aber der Befall nicht inaktiv oder absterben. Also muss eine solche Maßnahme zur Klimatisierung mit einer Entfernung des Schimmels einhergehen, um einen lang anhaltenden Erfolg in der Schimmelbekämpfung zu erreichen.

Die nachfolgende Untersuchung in Abschnitt 2 soll klären, ob dies für eine gereinigte Orgel bedeutet, dass sich beim Betrieb der luftfeuchteregulierten Temperierung in der Orgel kein Befall mehr aufbaut oder dass sich nach einer Reinigung ein Befall auf niedrigerem Aktivitätsniveau erneut aufbauen wird.

2 Anlegen von Probeflächen für die Bewertung verschiedener Reinigungsmethoden in der Orgel in Kloster Michaelstein

2.1 Fragestellung

Mit der Anlage von Probeflächen zu verschiedenen Reinigungsmethoden soll die Wirksamkeit der Reinigungsmethoden miteinander verglichen werden. Über längere Zeit soll auch die Neuentwicklung bzw. der Wiederaufbau des Befalls auf den so gereinigten Flächen bewertet werden um die Nachhaltigkeit einer Reinigungsmaßnahme abschätzen zu können.

2.2 Testaufbau

Am 28.08.2019 wurden in der Orgel im Kloster Michaelstein drei Probeflächen auf horizontalen Holzflächen auf Bauteilen der Orgel angelegt (I bis III).

Probeflächen

I: Windlade, Oberseite, letzte Reihe Holzpfeifen der Orgelraum-Rückwand zugewandte Seite, C-Seite

II: Pfeifenstock über Windlade mit Metallpfeifen, C-Seite

III: Rahmenholz in der Nähe von Messstelle 3 (siehe oben, Abschnitt 1.4), 50 cm hinter dem Spieltisch, fluffiges Mycel auf der Oberseite der Hölzer.

Jede Probefläche besteht aus 7 nebeneinander angelegten, quadratischen Reinigungsproben-Feldern (A bis G). Jede Reinigungsprobe misst 5 x 5 cm = 25 cm². In dem Feld einer Reinigungsprobe lassen sich 4 x je eine 2x2 cm große Fläche für ATP-Tests abreiben.

Reinigungsprobenfelder:

A: wird als Rückstellprobe nicht gereinigt und nicht für ATP-Tests verwendet.

B: wird als Rückstellprobe nicht gereinigt und wird zum Vergleich mit gereinigten Flächen für ATP-Tests verwendet.

C: Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser, stark ausgewrungen, „nebelfeucht“

D: Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol

E: Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken

F: „akapad“ Papierschwamm weiß, hart, gefüllter, chlorfreier, Schwefelarmer Latex-Radierschwamm, entwickelt für die Papierrestaurierung

G: Melaminharzschwamm mit Wasser, stark ausgewrungen, „nebelfeucht“

Abb. 14 rechts
Probefläche I: Windlade, Oberseite,
letzte Reihe Holzpfeifen der Orgelraum-
Rückwand zugewandte Seite, C-Seite

Abb. 15 / 16 unten links und rechts
Probefläche II: Pfeifenstock über
Windlade mit Metallpfeifen, C-Seite



Abb. 17

Probefläche III: Rahmenholz in der Nähe von Messstelle 3 (siehe oben, Abschnitt 1.4), 50 cm hinter dem Spieltisch, fluffiges Mycel auf der Oberseite der Hölzer

Das Heizgerät wurde wegen Anpassung des Versuchsaufbaus zwischen den Probenahmeterminen 26.05.2020 und 06.10.2020 von dort entfernt.



Abb. 18

Probefläche III, Detail



2.3 Testergebnisse

Werte in RLU auf 4 cm²

Gemessen wurde jeweils am 28.08.2019 der obere linke 2 x 2 cm - Quadrant des 5 x 5 cm großen Reinigungsfeldes. Weitere 3 Quadranten stehen für spätere Messungen zur Verfügung.

Probefläche I					
Reinigungs- feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	29421		10834	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	42	0,14%	98	0,90%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	43	0,15%	326	3,01%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	101	0,34%	236	2,18%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	57	0,19%	186	1,72%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	8	0,03%	84	0,78%

Probefläche II					
Reinigungs- feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	27797		22366	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	105	0,38%	50	0,22%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	1024	3,68%	321	1,44%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	893	3,21%	426	1,90%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	1604	5,77%	376	1,68%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	35	0,13%	122	0,55%

Probefläche III					
Reinigungs- feld	Beschreibung	Tag der Reinigung		7 Monate nach der Reinigung	
		Messdatum	Rest-ATP	Messdatum	Rest-ATP
		28.08.2019		26.05.2020	
B	nicht gereinigt	33992		34248	
C	Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser	111	0,33%	196	0,57%
D	Mikrofaser-Reinigungstuch mit 70%-igem Ethanol	1325	3,90%	885	2,58%
E	Einweg-Mikrofasertuch Marke: „Spontex“, trocken	3677	10,82%	1465	4,28%
F	„akapad“ Papierschwamm weiß	2595	7,63%	986	2,88%
G	Melaminharzschwamm mit Wasser	271	0,80%	233	0,68%

2.4 Fazit

Am zuverlässigsten sind die Reinigungsmethoden C und G, Mikrofaser-Reinigungstuch mit Wasser und Melaminharzschwamm mit Wasser mit Rest ATP-Werten von unter 1% direkt nach der Reinigung.

Weitere Messungen folgten nach 7 Monaten um die Entwicklung des Befalls nach einer Reinigung beurteilen zu können.

Bei Probefläche 1 haben sich die Aktivitätswerte nach 7 Monaten überwiegend erhöht, während sie sich bei den Probeflächen 2 und 3 überwiegend verringert haben. Probefläche 1 ist der luftfeuchtegesteuerten Heiztechnik abgewandt während Probeflächen 2 und 3 stärker im Einfluss dieser Klimatechnik stehen.

Dies weist darauf hin, dass die Klimatechnik mit ihrer bisherigen Betriebseinstellung in Kombination mit einer Reinigung die mikrobielle Aktivität unter 1% des Ausgangswertes absenken kann und danach sogar die weitere Absenkung der mikrobiellen Aktivität stattfindet, wenn der Einfluss der Klimatechnik auf das Orgelbauteil groß genug ist.

Die Kombination von luftfeuchtegesteuerter Heiztechnik und Reinigung scheint nach diesem Versuch langfristig erfolgreich zu sein.

Beim ATP-Test in Abschnitt 1, oben in der Tabelle auf S. 9 und in der Grafik auf Seite 10 ist der Bereich Messstelle 3 an der letzten Holzpfeifenreihe, die der Wand an der Orgelrückseite zugewandt ist, der einzige Bereich, der statt sinkender Aktivität eine steigende Aktivität seit dem letzten Messtermin zeigt. Dies passt dazu, dass der gleiche Bereich bei den Reinigungsproben (Probefläche III) als einziger eher steigende Aktivitätswerte seit der Reinigung aufweist.

Das bedeutet, dass im hintersten Bereich der Orgel eine kühlere Zone entstanden ist, welche die schimmelhemmende Wirkung der Temperierung nicht ausreichend

erreicht. Dieses Indiz spricht dafür, dass die Wärme der Temperierung noch besser verteilt werden muss um eine gleichmäßigere Wirkung zu erzielen. Es deckt sich mit der Empfehlung aus dem Experiment zur Ermittlung der Tonhöhenverstimmung durch die Temperierung der Orgel.

Die Wärme muss gleichmäßiger verteilt werden.

Reihe Wissenschaft

ISBN 978-3-7388-0755-4

