



*Maßnahmen zur Verminderung von  
Bleikorrosion an Orgelpfeifen*



***Entwicklung von innovativen Maßnahmen zur  
Verminderung von Bleikorrosion an Orgelpfeifen aus  
dem 17. Und 18. Jhdt. am Beispiel ausgewählter  
national wertvoller Kulturgüter von Arp Schnitger***

Laufzeit: 01.10.2016 – 31.12.2018  
Förderkennzeichen: Az. 33580  
Bremen, 2018

Bearbeitung:

MPA Bremen /  
Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT

Dr. Herbert Juling

Hochschule für Künste Bremen

Prof. Dr. Manfred Cordes  
Koos van de Linde

Jürgen Ahrend Orgelbau, Leer

Hendrik Ahrend

Gebr. Hillebrand GmbH Orgelbau KG, Isernhagen

Martin Hillebrand

Orgelbauwerkstatt Bartelt Immer, Norden

Bartelt Immer

Rowan West Orgelbau, Altenahr

Rowan West

# Inhalt

|  |    |
|--|----|
| Zusammenfassung  | 1  |
| 1. Einleitung  | 2  |
| 2. Untersuchungsobjekte  | 4  |
| 2.1. Ev.-luth. Kirchengemeinde St. Vitus in Belum                        | 4  |
| 2.2. Ev.-luth. Marienkirche in Marienhaf                                 | 4  |
| 2.3. Warnfried-Kirche Osteel   | 5  |
| 2.4. Ev.-luth. Kirchengemeinde St. Wulphardi in Freiburg / Elbe          | 5  |
| 2.5. Stadtkirche St. Marien Celle  | 6  |
| 2.6. Klosterkirche Rumbek  | 7  |
| 3. Klima   | 8  |
| 3.1. Messsysteme   | 8  |
| 3.2. Zusammenhang Lufttemperatur, relative und absolute Luftfeuchtigkeit | 9  |
| 3.3. Situation Sommer-Winter   | 10 |
| 3.4. Wechselwirkung Kirchenraum-Orgel                                    | 11 |
| 3.5. Lüftung   | 12 |
| 3.6. Einfluss der Motorbox auf das Klima im Windsystem                   | 16 |
| 3.7. Windtrocknung   | 19 |
| 3.8. Windflussmessungen  | 20 |
| 4. Holz  | 24 |
| 4.1. Oddy-Test zur einfachen Holzbeurteilung                             | 24 |
| 5. Pfeifenmaterial   | 27 |
| 5.1. Phasendiagramm Pb-Sn  | 27 |
| 5.2. Elementverteilung von Zinn (Sn) und Antimon (Sb) in Blei            | 28 |
| 5.3. Zinndiffusion an Lötflächen   | 30 |
| 6. Bleikorrosion   | 31 |
| 6.1. Chemismus   | 31 |
| 6.2. Darstellung des Korrosionsverlaufs                                  | 31 |
| 6.3. Messung der Korrosion   | 33 |
| 6.4. Live-Messung in Belum   | 35 |
| 7. Neuverwendung alter Pfeifen   | 39 |
| 7.1. Reinigung der Pfeifen   | 39 |
| 7.2. Künstliche Passivierung von Blei                                    | 39 |
| 8. Innenbeschichtung der Holzflächen                                     | 42 |
| 8.1. Neutralisation mit Kalk und Kreide                                  | 42 |
| 8.2. Rezeptur eines traditionellen Bindemittels                          | 46 |
| 8.3. Kalkulation der Umsetzung von Essigsäure in Calciumacetat           | 49 |
| 9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen                                   | 51 |
| 10. Projektkoordinierung   | 53 |
| 10.1. Zusammensetzung des Fachbeirats                                    | 53 |
| 10.2. Projekttreffen   | 53 |
| 11. Öffentlichkeitsarbeit  | 53 |
| 11.1. Orgelbauer-Workshop  | 53 |
| 11.2. Veröffentlichungen / Vorträge / Tagungen                           | 54 |
| 11.3. Internetforum Orgelkorrosion                                       | 54 |
| Literaturverzeichnis   | 55 |
| Abbildungen  | 56 |

## Zusammenfassung

Der Auslöser für die Korrosion von Orgelpfeifen aus reinem Blei ist Essigsäure, die entweder aus dem verwendeten Holz oder ungeeigneten Klebern emittiert wird. Die Korrosion der Pfeifen läuft in Zyklen ab, die bei ungünstigen klimatischen Bedingungen ablaufen.

Entscheidend dafür ist die absolute Feuchtigkeit im Windsystem. Diese kritischen Bedingungen treten vornehmlich in den Sommermonaten auf.

Dem kann aber sehr gut und effektiv mit einer geeigneten Lüftungsstrategie begegnet werden, die aber individuell für jede Kirche erarbeitet werden müssen. Entscheidend ist aber, dass für die Ermittlung von geeigneten Lüftungszeitpunkten die absolute Feuchtigkeit herangezogen wird.

Bei der Wiederverwendung von alten, bereits korrodierten Pfeifen sollten die Korrosionsprodukte möglichst vollständig entfernt werden. Das gilt auch vor der Einlagerung von alten Pfeifen zur späteren Wiederverwendung. Die Lagerung sollte zudem trocken erfolgen und im besten Fall sogar unter CO<sub>2</sub>-Ausschluss.

Erste Experimente in diesem Projekt haben gezeigt, dass die Behandlung von Bleioberflächen (gereinigte oder neue) mit Schwefelsäure einen effektiven Schutz gegen Essigsäurekorrosion bilden kann. Schwefelsäure bildet auf der Bleioberfläche eine schützende Passivierungsschicht.

Mit einem einfachen vereinfachten Test wird den Orgelbauern ein Verfahren an die Hand gegeben, mit dem sehr schnell und empirisch die Qualität von Holzmaterial hinsichtlich seiner Essigsäureemission ermittelt werden kann.

Eine effektive Maßnahme zur Verminderung der Essigsäureemission ist die Beschichtung der Innenwände von Windkanälen und/oder Windladen mit Calciumhydroxid (Kalk). Es konnte eindeutig gemessen und bewiesen werden, dass damit die Emission von Essigsäure aus dem Holz um das 15 bis 20fache vermindert wird.

Bremen, November 2018

## 1. Einleitung

Orgeln spielen und spielten für die Entwicklung der Europäischen Kultur eine wichtige Rolle. Sie bilden damit einen herausragenden Gegenstand der Europäischen Denkmalpflege, sind aber keine Museumsobjekte, sondern bis heute in der aktiven Kulturpraxis der Gegenwart (Konzerte, Gottesdienste) verankert. Die historischen Instrumente stellen ein unwiederbringliches Zeugnis unserer Geschichte dar, denn sie sind eng verbunden mit ästhetischen und stilistischen Traditionen ihrer jeweiligen Entstehungszeit und spiegeln in hervorragender Weise die Handwerkskunst verschiedener Epochen wider. Mehr als 10.000 historische Instrumente existieren noch in ganz Europa. Im Nordwesten Deutschlands befindet sich die weltweit größte Ansammlung spielbarer historischer Orgelinstrumente. Diese wertvollen Instrumente mit originalen Pfeifenbeständen aus dem 16. bis 18. Jahrhundert stellen gewissermaßen das Klanggedächtnis einer Zeit dar, in der die norddeutsche Orgelkultur eine führende Rolle in Europa innehatte. Zentrale Figur ist dabei der bekannte und überaus produktive Orgelbauer Arp Schnitger (1648 – 1719) [http://www.orgel-owl.de/as/ind\\_aska.htm](http://www.orgel-owl.de/as/ind_aska.htm).

In den letzten Jahren häufen sich Meldungen über Korrosionsschäden an diesen wertvollen Kulturgütern. Korrosive Umweltgase gefährden bzw. zerstören die Metallpfeifen, die die zentrale Grundeinheit einer Orgel bilden. Ein zentrales Problem stellen dabei klimatische Veränderungen der letzten Jahrzehnte in und außerhalb der Instrumente dar. Diese führen zu sehr hohen Luftfeuchtigkeiten nicht nur im Kirchenraum, sondern auch in den Windsystemen der Orgeln. Gleichzeitig liegen in den Instrumenten hohe Konzentrationen an Essigsäure vor, die durch den Einsatz frischen Eichenholzes bei vergangenen Restaurierungen und auch die Verwendung von modernen Acetatleimen hervorgerufen werden.

„Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Maßnahmen, sowohl die Luftfeuchtigkeit als auch die Essigsäurekonzentration in den Orgelinstrumenten durch geeignete Maßnahmen zu vermindern und den Einfluss auf die fortschreitende Korrosion der Bleipfeifen zu verifizieren. Im Projekt sind neben den Material- und Konservierungswissenschaftlern der MPA/IWT Bremen auch die Musikhochschule Bremen mit ausgewiesenen Experten für Orgel und Orgelbau des 17. und 18. Jahrhunderts, und insbesondere vier Orgelbau-Firmen, die mit der Pflege und Restaurierung dieser bedrohten Orgelinstrumente beschäftigt und beauftragt sind.“ (Zitat aus dem Antrag)

Die Ursachen und die einzelnen Faktoren für diese bedrohliche Entwicklung (z.B. Umwelteinflüsse in der Umgebungsluft, Veränderungen im Heiz- oder Isolierungssystem der Gebäude, Emissionen aus neu verwendetem Holz oder Leim, allgemeine Klimaerwärmung) und deren Zusammenwirken sind größtenteils unbekannt. Es hat in der Vergangenheit bereits einige Projekte gegeben, die diese Problematik aufgegriffen haben.

Als ein wichtiges Projekt für die grundlegenden Fragestellungen sind Arbeiten im Zuge des EU-Projektes „COLLAPSE“ anzusehen, in dem erste Erfahrungen zur Korrosion von Orgelpfeifen gesammelt werden konnten [1]. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Grundlagen für das Verstehen der Korrosionsvorgänge gelegt, insbesondere die Rolle der Essigsäure ist seitdem unumstritten.

Im Februar 2018 wurde ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und dem Bundesinstitut für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördertes Projekt zur Erforschung von „Schimmel an Orgeln in Mitteldeutschland abgeschlossen [2].

Als Vorbereitung für das hier beschriebene Vorhaben diente ein Pilotprojekt, das u.a. mit maßgeblicher finanzieller Unterstützung seitens der „Metropolregion Bremen-Oldenburg“ durchgeführt werden konnte [3]. An zwei wichtigen Orgelinstrumenten wurden exemplarisch systematische Untersuchungen vorgenommen:

- Belum – historische Pfeifensubstanz aus dem 16. und 17. Jahrhundert
- Mariendrebber (bei Diepholz) – 17. und 18. Jahrhundert (Berendt Hus/Christian Vater)

Lösungsstrategien, wie z.B. die Beschichtung der Orgelpfeifen mit traditionellen Methoden oder modernen Oberflächenbearbeitungen bekämpfen nur die Symptome der Korrosion und nicht die Ursachen. Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen sind diese Ursachen ganz eindeutig auf die hohe Luftfeuchtigkeit (möglicherweise auch bedingt durch die globale Erwärmung) und der teilweise sehr hohen Konzentration an korrosiven Gasen, insbesondere Essigsäure, zurückzuführen. Als Quelle der Essigsäure sind hauptsächlich Eichenhölzer, aber auch moderne Leime (Acetatleim, Weißleim) anzusehen, die in Unkenntnis der Problematik verwendet wurden.

Man darf nicht vergessen, dass die hier betrachteten Orgelinstrumente z.T. 300 Jahre überstanden haben, ohne existentiellen Materialverlust zu erleiden. Erst in den letzten 20 Jahren wird über dramatische Verluste von historischem Orgelpfeifenmaterial berichtet. Und diese Berichte stammen vorwiegend von Orgelbauern, die mit der Pflege und Wartung beauftragt sind, aber z.T. hilflos dem Schadensprozess zusehen müssen. In diesem Bericht werden grundlegende Zusammenhänge erläutert und die Ergebnisse genutzt, um pragmatische Lösungen zu entwickeln, die ohne außergewöhnlich hohen technischen Aufwand denkmalgerecht umgesetzt werden können.

## 2. Untersuchungsobjekte

### 2.1. Ev.-luth. Kirchengemeinde St. Vitus in Belum

Die Orgel in Belum war bereits Gegenstand intensiver Untersuchungen im Vorprojekt. Über 1,5 Jahre wurden an 10 verschiedenen Messpunkten im Kirchenraum und im Instrument Klimamessungen hinsichtlich der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Zusätzlich wurde an Messsonden die Belastung des Windsystems durch Essigsäure ermittelt. Der Orgelbauer Rowan West war für die Restaurierung der Orgel im Jahre 2001 ver-



antwortlich und hat nach eigenem Bekunden frische Eichenhölzer und auch Acetatileim verwendet. Es liegen daher gute Informationen über die Umfeldbedingungen dieser Orgel vor. Heute leidet die Orgel unter massiven Korrosionsproblemen.

#### Historie:

- bereits vor 1600 war eine Orgel vorhanden war (Scherer-Schule?)
- 1717 Reparatur durch Rudolf Meyer (Schnitger-Geselle)
- 1741 Arbeiten durch Dietrich Christoph Gloger
- 1783 bis 1786 Neubau durch Georg Wilhelm Wilhelmy unter Wiederverwendung der Prospektpfeifen aus dem 16. und 17.(?) Jhdt.
- 1844 Umbau durch Philipp Furtwängler aus Elze
- 1905 Neubau einer Kegelladenorgel durch Furtwängler & Hammer
- 2001 u. 2004 Neubau hinter dem alten Wilhelmy-Prospekt durch Rowan West unter Verwendung der alten Prospektpfeifen aus dem 16. und 17.(?) Jhdt.

### 2.2. Ev.-luth. Marienkirche in Marienhäfe

Die Pfeifen der von Georg von Holy 1713 gebauten Orgel sind weitgehend aus Blei gefertigt, deshalb ist die Marienhafer Holy-Orgel eines der Instrumente, deren Pfeifen vom sogenannten „Bleifraß“ bedroht sind. Bei einer Orgelrestaurierung im Jahre 2010 durch die Orgelbauwerkstatt Ahrend mussten 160 Pfeifenfüße erneuert werden, der klanglich relevante Teil konnte in fast allen Fällen gerettet werden. Die Windladenrahmen wurden neu gebaut, die alten Pfeifenstöcke konnten wiederverwendet werden. Auf Anraten des Orgelbauers Arend wird das Windsystem seit 2009 durch eine Apparatur mit Gewichten auf den Tasten durchgespült. Diese Maßnahmen sollen im Rahmen dieses Projektes klimatechnisch begleitet und ggfls. optimiert werden.



### Historie:

- 1710–1713 Neubau der alten Orgel durch Gerhard von Holy
- 1761 Renovierung durch Johann Adam Berner
- 1781 und 1797 Reparatur durch Johann Friedrich Wentthin
- 1828 Abbau und Lagerung im Turm
- 1831 Wiederaufbau auf der Westempore durch Joh. Gottfr. Rohlf
- 1886 Veränderung durch Johann Diepenbrock
- 1966/1969/1988/2010 Renovierungen durch Ahrend

### **2.3. Warnfried-Kirche Osteel**

Der Ort Osteel liegt als Nachbargemeinde in unmittelbarer Nähe zur Kirche in Marienhaf und diente als Vergleichsobjekt mit Korrosion an den Prinzipalpfeifen. Die Orgel wird ebenfalls von der Orgelwerkstatt Ahrend betreut wird, es wurde aber noch keine umfangreiche Restaurierung durchgeführt.



### Historie:

- 1619 erbaut durch Edo Evers unter Verwendung älterer Pfeifen
- 1761 Umbau durch Joh. Adam Berner/Joh. Friedr. Constabel
- 1808 Reparatur durch Gerhard Janssen Schmitt
- 1830 Verlagerung auf die Ostempore durch Joh. Gottfr. Rohlf
- 1890 Verlagerung auf die Westempore durch Joh. Diepenbrock
- 1929 Reparatur durch Max Maucher
- 1957 Reparatur durch Alfred Führer
- 1994 Restaurierung durch Jürgen Ahrend in den Urzustand unter Beibehaltung einiger Veränderungen aus dem 18. Jhd

### **2.4. Ev.-luth. Kirchengemeinde St. Wulphardi in Freiburg / Elbe**

Die Orgel wurde 1986 von der Orgelbauwerkstatt Führer auf den Zustand von 1791 gebracht. Sie enthält sechs Register aus dem 16. Jahrhundert, elf Register wurden von Alfred Führer rekonstruiert. Das Instrument wird von der Orgelbauwerkstatt Bartelt Immer alle zwei Jahre gewartet. Bei der letzten Wartung sind einige Bleipfeifen versuchsweise mit einer Beschichtung versehen worden. Die Klimabedingungen sind nicht bekannt und sollen im Rahmen dieses Projektes ermittelt werden.



Aufgrund der Wartungsarbeiten des Orgelbauers Immer kann der Korrosionsfortschritt sehr gut verfolgt werden. Es werden bereits Durchlüftungsmaßnahmen des ortsansässigen Küsters vorgenommen und dokumentiert.

### Historie:

- 1581/82 eine Orgel bezeugt (Erbauer unbekannt)
- 1619 u. 1620 Reparatur durch Hans Scherer d.J.
- 1640 Reparatur durch unbenannten Hamburger Orgelbauer
- 1676 Umbau durch Arp Schnitger
- 1818 Reparatur durch Joh. Georg Wilh. Wilhelmy
- 1837/38 Abbau und Verlagerung auf die Westempore des Kirchnerneubaus durch Peter Tappe, Verden
- 1899 großer Umbau Heinrich Röver, Stade
- 1986 Restaurierung durch Führer, Wilhelmshaven
- 2013 Instandsetzung durch Bartelt Immer

## **2.5. Stadtkirche St. Marien Celle**

In den Jahren 1997 bis 1999 wurde das Orgelgehäuse als Rekonstruktion der Vater-Orgel von 1687 mit originalem Pfeifenmaterial wieder hergestellt. Die Kirche wird heute als touristisches Bauwerk stark genutzt und beheizt. Die Orgelbauwerkstatt Gebr. Hillebrand GmbH wird die Orgel in naher Zukunft restaurieren und die Schäden aufnehmen und dokumentieren. Die Messung der klimatischen Bedingungen ist eine einmalige Gelegenheit, den Schadensverlauf zu interpretieren und bei der Restaurierung entsprechende Maßnahmen zu erarbeiten. Der Orgelbauer Hillebrand hat in seiner Werkstatt bereit eigenständig Versuche zur Beurteilung von Bleikorrosion in Abhängigkeit von Essigsäuregehalt und Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Hier wird eine wissenschaftliche Begleitung benötigt, die auch die konkrete Umsetzung am Instrument koordinieren kann.



### Historie:

- vor 1400 erste Erwähnung einer Orgel im nördl. Seitenschiff
- 1550 Neubau durch Meister Harmen, Braunschweig
- 1858 Umbau
- 1653 Neubau von Hermann Kröger / Berend Huß
- 1685 Hauptwerk, Rückpositiv, Pedalwerk von Martin Vater
- 1834 Umbau durch Ernst Wilhelm Meyer, Hannover
- 1913 Neubau durch eine Furtwängler & Hammer, Hannover
- 1948 Renovierung durch Hermann Hillebrand, Altwarmbüchen
- 1969 Neubau durch Fa. Kleuker, Brackwede
- 1993 Abbau der Orgel
- 1997 Rekonstruktion des Zustands von 1685 und Erweiterung um ein Hinterwerk durch Rowan West, Ahrweiler

## 2.6. Klosterkirche Rumbeck

Kloster Rumbeck befindet sich in Arnsberg/NRW im Ortsteil Rumbeck, klimatisch sind hier andere Verhältnisse an in den Küstenregionen Norddeutschlands anzunehmen. Bereits 1658 hat es in der Klosterkirche nachgewiesenermaßen eine Orgel gegeben. Im Jahr 1700 errichtete der Herforder Orgelbauer Hinrich Klausing eine neue Orgel für die Rumbecker Schwestern. Dabei verwendete er wesentliche Teile des früheren Instrumentes. Hinrich Klausing gehört zu den berühmten Orgelbauern des 17. und 18. Jahrhunderts. In seiner Werkstatt entstanden mehr als 100 Orgeln. Leider sind nur noch wenige Instrumente dieser Zeit erhalten. Als die Orgel in der Klosterkirche vor wenigen Jahren restauriert wurde, stellte sich heraus, dass diese noch Pfeifenmaterial aus dem 15. Jahrhundert enthält. Damit kommt ihr ein ganz besonderer Wert zu.



### Historie:

- 1700 Bau der Orgel durch Hinrich Klausing, Herford, unter Verwendung von Pfeifen aus dem 15.-17. Jhdt.
- 1830 Erweiterung durch Engelbert Ahmer
- 2005/06 Restaurierung durch Gebr. Hillebrand GmbH, Martin Hillebrand, Isernhagen

### 3. Klima

In allen untersuchten Kirchen und Orgeln wurden an mehreren Stellen im Kirchenraum, im Orgelgehäuse und im Windsystem bis hin zu den Windladen Messsensoren installiert. Dabei wurden die relative Feuchtigkeit und die Lufttemperatur erfasst. Die Messungen erfolgten alle 5 Minuten, so dass auch kurzzeitige Änderungen im Kirchenraum und an der Orgel erfasst wurden. In Marienhafe wurde ein Außensensor installiert. Für Freiburg/Elbe wurden die Außenmesswerte der nahe liegenden Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Für Rumbeck lag die Außenmessstelle des DWD etwas weiter entfernt in Arnsberg. Die Daten des DWD sind über das Data Climate Center frei unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdcftp/cdcftp.html?nn=17626> zugänglich.

In Marienhafe, Osteel, Celle und Rumbeck liefen die Messungen seit Ende Dezember 2016, in Freiburg/Elbe und Belum seit Mitte Januar 2017.

In Marienhafe haben die ersten Auswertungen einen erstaunlichen Effekt ergeben. Bei der Erhöhung der Raumtemperatur (z.B. während eines Gottesdienstes) steigt die relative Feuchtigkeit im Windsystem an, weil die wärmere Luft Feuchtigkeit von den Holzwänden aufnimmt. Das kann im Windkanal und in der Windlade im Rückpositiv nachvollzogen werden. In der Windlade des Hauptwerks in Marienhafe nimmt dagegen die rel. Feuchtigkeit bei Erhöhung der Temperatur ab.

#### 3.1. Messsysteme

##### 3.1.2. HOBO

Für Messungen in engen Windladen und Kanzellen sind die gängigen Messfühler zu groß. Es gibt aber von HOBO kleine Sensoren, die ebenfalls die rel. Feuchtigkeit und die Lufttemperatur messen. Sie werden per Bluetooth über Smartphone oder Tablet-Anbindung ausgelesen. Kostenlose Apps gibt es in den AppStores. Die Sensoren HOBO MX1101 selbst kosten ca. 130 €. Ein Nachteil ist, dass das Auslesen vor Ort geschehen muss. Der Datenspeicher reicht für ca. 3 Monate.



Für Experimente an den Objekten, im Labor und in den Orgelbauwerkstätten sind diese Sensoren ideal.

##### 3.1.3. Testo

Die Sensoren von Testo (TESTO Saveris 2 H1) sind für die Zwecke der Messungen in diesem Projekt besonders geeignet. Sie messen ebenfalls die relative Feuchtigkeit und die Lufttemperatur. Zusätzlich können die absolute Feuchtigkeit und die Taupunkttemperatur ausgegeben werden. Das Besondere an diesem System ist die Möglichkeit, die Daten online auslesen

zu können. Die Messdaten werden in regelmäßigen Abständen auf einen Server hochgeladen und können von dort jederzeit angezeigt werden. Dazu benötigt man aber in der Kirche einen Internet Anschluss. Den haben wir durch die Verwendung eines Access-Points mit SIM-Karte realisiert. Solche reinen Datenverträge gibt es bei den Mobilfunkanbieter für relativ wenig Geld (2 €/Monat für 100 MB). Der Access-Point selbst kostet circa 40 €. Die Gebühren für den Server belaufen sich pro Sensor auf 16 € pro Jahr. Dafür sind aber auch Alarmmeldungen per SMS oder email (z.B. bei Überschreiten einer vorgegebenen Feuchtigkeit) möglich.

Die Geräte sind etwas größer als die von HOBO, passen aber in etwas größere Windladen hinein. Ein Sensor kostet ca. 250€.



(Quelle: <https://www.testo.com/de-DE/>)

### 3.2. Zusammenhang Lufttemperatur, relative und absolute Luftfeuchtigkeit

Die absolute Feuchtigkeit in einem Luftvolumen wird aus der relativen Feuchtigkeit (% rF) und der Lufttemperatur (° C) errechnet. In einem geschlossenen Raum, in dem an den Wänden keine Absorption bzw. Desorption von Wasser stattfindet, ist die absolute Feuchtigkeit der Luft (angegeben in g/m<sup>3</sup>) konstant, unabhängig von der Lufttemperatur.

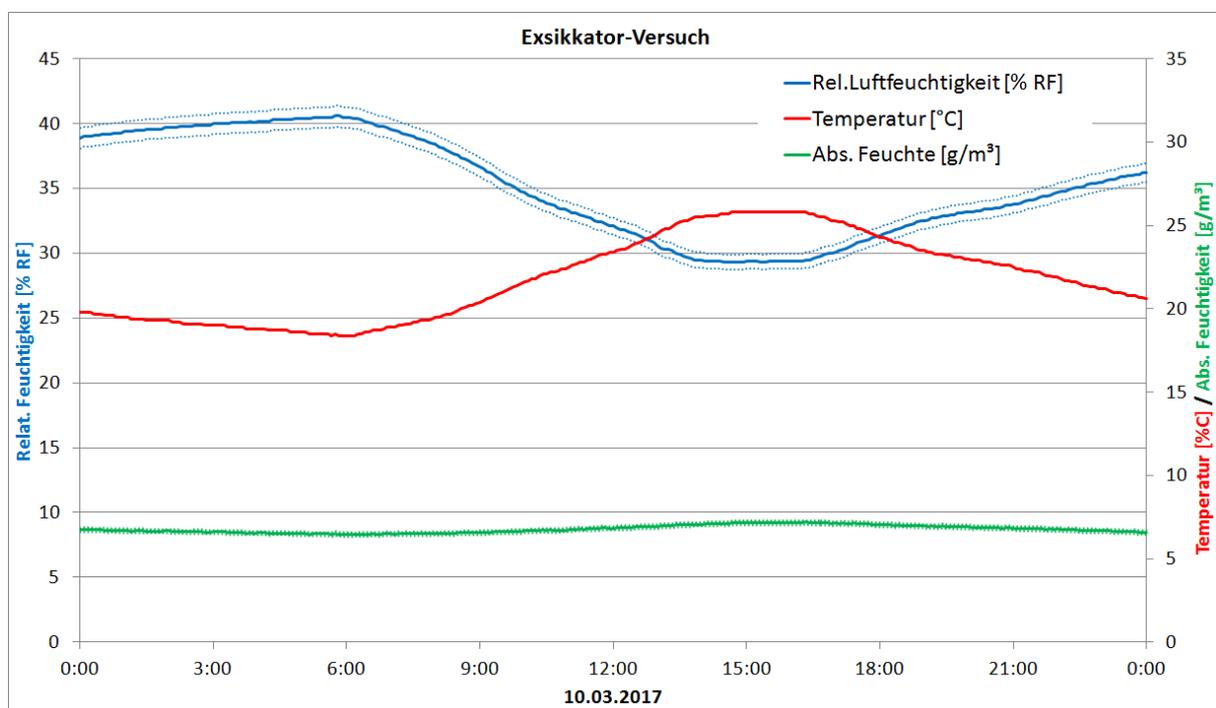


Abb. 1: Zusammenhang zwischen rel. Feuchtigkeit, absoluter Feuchtigkeit und Temperatur in einem geschlossenen System (Exsikkator)

Zur Veranschaulichung wurde dazu ein Versuch im Labor durchgeführt, indem in einem geschlossenen Exsikkator über einen Tag die rel. Feuchtigkeit und die Temperatur gemessen und die abs. Feuchte daraus berechnet wurde.

Die Messung in Abb. 1 zeigt die Werte am 10.03.2017 von 0-24 Uhr. In dieser Zeit schwankt die Temperatur (rote Kurve) zwischen 18 °C in der Nacht und 25 °C am Nachmittag. Gleichzeitig schwankt die relative Feuchtigkeit (blaue Kurve) gegenläufig zwischen 40 % rF bei der tiefsten Temperatur und 29 % rF bei der höchsten Temperatur am Nachmittag. Die absolute Feuchtigkeit (grüne Kurve) bleibt über den gesamten Zeitraum nahezu konstant. Die geringen Schwankungen sind auf die Messungenauigkeiten des Feuchtesensors und den (allerdings sehr geringen) Absorptions- und Desorptionsprozess an den Glaswänden des Exsikkators zurückzuführen.

Im realen Fall z.B. in einer Windlade liegen allerdings andere Verhältnisse vor. An den Oberflächen der Wände aus Holz wird Feuchtigkeit stark absorbiert und wieder desorbiert. Daher schwanken auch die absoluten Feuchtigkeiten, wenn sich die Temperatur z.B. im Tages- oder Jahreszeitenverlauf ändert. Der oben dargestellte Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, absoluter Feuchte und Temperatur gilt nur für ideale Bedingungen ohne Absorptions- und Desorptionsprozesse.

Fazit: Für die Beurteilung der Feuchteverhältnisse in einem Raum ist die absolute Feuchtigkeit besser geeignet als die relative Feuchtigkeit, da diese von der Temperatur abhängig ist.

### 3.3. Situation Sommer-Winter

Mit dem in Kap. 3.1 beschriebene Hintergrund können die Messungen über eine Jahresverlauf interpretiert werden. Es zeigt sich in allen Fällen, dass das Hauptproblem einer zu hohen Feuchtigkeit im Sommer mit absoluten Feuchtegehalten von bis zu 15 g/m<sup>3</sup> Luft besteht, wohingegen die Feuchtegehalte in den Wintermonaten nur die Hälfte betragen. Exemplarisch sieht man an der Messung des Kirchenraum Marienhafe (Abb. 2) dass die absolute Feuchtigkeit (grüne Linie) im Winter bei 6-7 g/m<sup>3</sup> liegt und ab dem Mai auf bis zu 14 g/m<sup>3</sup> ansteigt. Im Windsystem der Orgel zeichnet sich der gleiche Verlauf kaum zeitverzögert, aber deutlich gedämpft ab (Abb. 3). Die Verhältnisse in der Orgel sind also vom Gleichgewicht der Klimasituation im Kirchenraum geprägt. Das bedeutet, dass der Klimatisierung der Kirche eine größere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, als bislang diskutiert.

Fazit: Problematisch für die Klimasituation im Kirchenraum und damit auch im Windsystem der Orgel sind hauptsächlich die Sommermonate mit hoher abs. Feuchtigkeit.

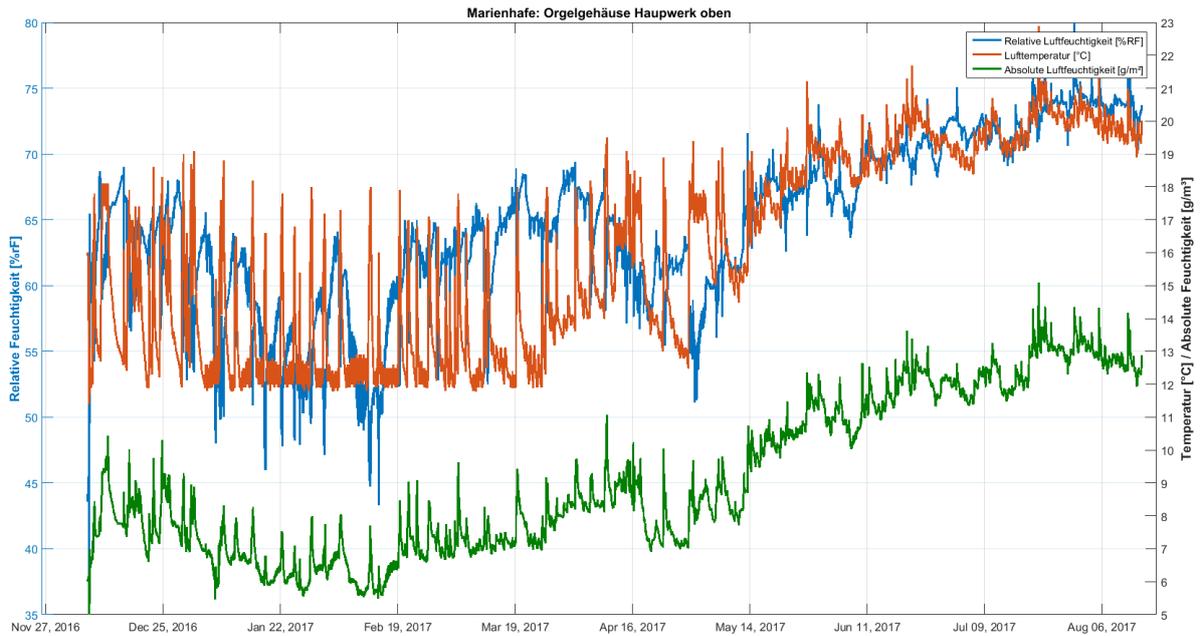


Abb. 2: Raumklima im Orgelgehäuse in Marienhäfe (Dez. 2016 – Aug. 2017)

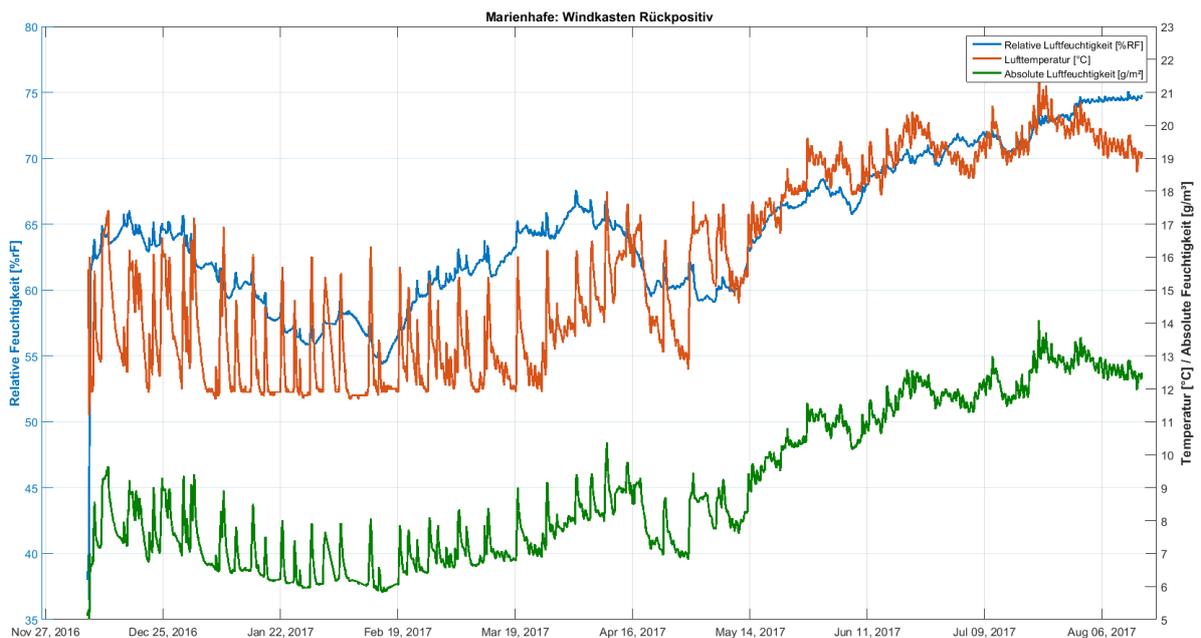


Abb. 3: Klima im Windkasten der Orgel in Marienhäfe (Dez. 2016 – Aug. 2017)

### 3.4. Wechselwirkung Kirchenraum-Organ

Die Messungen an allen Organen zeigen im Vergleich zu den Verhältnissen im Kirchenraum und in der Orgel bis hin zu den Windladen eine unerwartet schnelle Wechselwirkung untereinander. Das gilt insbesondere für die Temperatur, die sich im Windsystem sehr schnell der Temperatur im Kirchenraum und dem Orgelgehäuse anpasst. Es zeigt sich, dass die Klimadaten im Orgelgehäuse sehr genau mit denen im Kirchenraum (gemessen auf dem Altar oder der Kanzel) übereinstimmen. Die Verhältnisse im Windsystem der Orgel passen sich dem

leicht verzögert an. Allerdings wirken sich schnelle Wechsel im Kirchenraum (im Stundenbereich) noch nicht auf das Windsystem aus.

### 3.5. Lüftung

In Belum konnte durch einfache Querlüftungsmaßnahmen im Altarbereich eine deutliche Verbesserung der Raumklimasituation erreicht werden.

Als die Kirche in Belum zum ersten Mal zu Beginn des Pilotprojektes im Jahre 2013 betreten wurde, fiel eine sehr hohe Luftfeuchtigkeit auf. Der Boden war mit einem Wasserfilm bedeckt. Die Lüftungsfenster waren geschlossen und nicht zu öffnen. Dabei stellen die Fenster sowohl auf der Orgelempore als auch im Altarbereich eine gute Möglichkeit einer gezielten Querlüftung dar.



Abb. 4: Ausblühungen von Salzen auf den Fugen des Fußbodens der Kirche St. Vitus in Belum. Aufgrund der Austrocknung des Untergrundes blühen leicht lösliche Salze auf den porösen Fugen aus.

Als erste Maßnahme wurde empfohlen zunächst nach Gefühl die Fenster im Altarbereich zu öffnen, wenn das Außenklima trocken ist. Bei weiteren Besuchen der Kirche standen die Fenster immer offen, so dass von einer weitgehenden Dauerbelüftung auszugehen ist (Abb. 5).

Im September 2017 waren auf den Fugen des Fußbodens ausgeprägte Salzausblühungen zu sehen (Abb. 4). Dem Trocknungsgradienten folgend kristallisieren die Salze der alkalischen Porenlösungen des zementären Bindemittels aus. Glücklicherweise liegt der Kristallisationshorizont auf der Oberfläche und nicht darunter, was zu massiven Salzschäden geführt hätte. Für die Betrachtung des Raumklimas ist das Austrocknen des Fußbodens aber ein gutes Zeichen.

Allein die Öffnung der Seitenfenster mit einer damit einhergehenden Querlüftung hat diesen Effekt bewerkstelligt. Eine automatische Regelung der Fensteröffnung durch Stellmotoren aufgrund von messtechnischem Vergleich der absoluten Feuchten Außen und Innen würde den Effekt noch positiv verstärken.



Abb. 5: Lüftungsfenster im Altarbereich an der Süd- (link) und Nord-Seite (rechts)

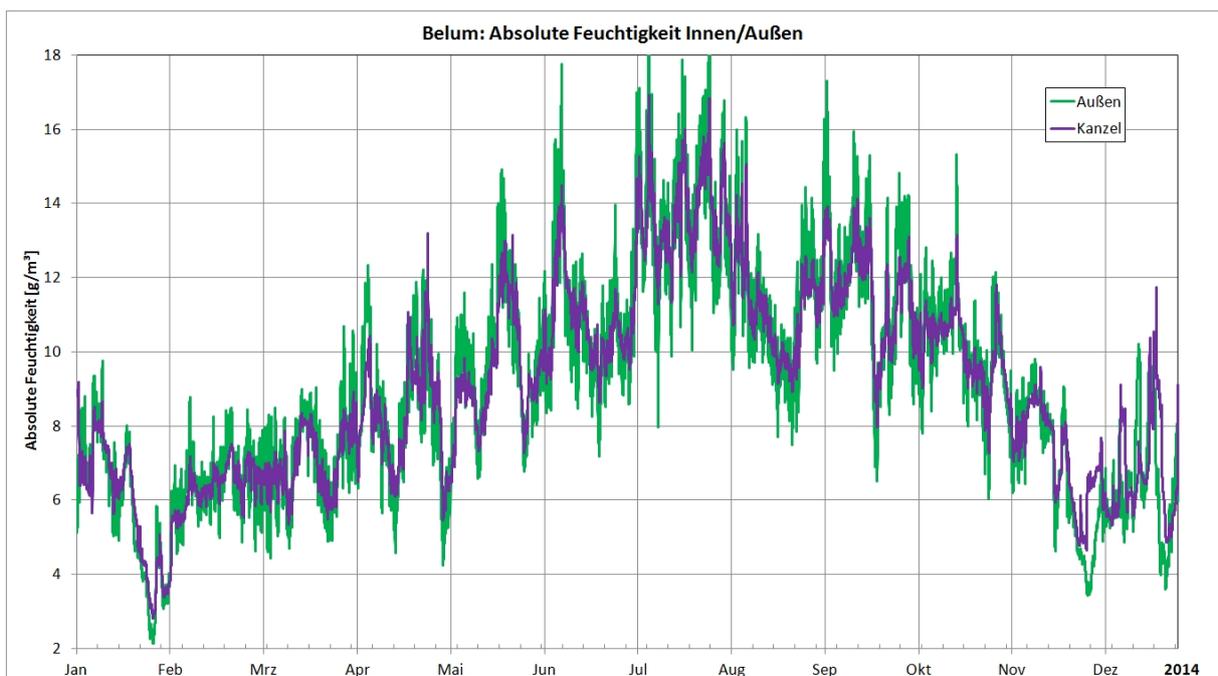


Abb. 6: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit in der Belmer Kirche (gemessen auf der Kanzel, lila Kurve) und im Außenbereich (grüne Kurve).

Im vorhergehenden Pilotprojekt war die klimatische Situation in Belum bereits intensiv gemessen worden. Ein Vergleich der absoluten Feuchtigkeit außerhalb der Kirche und in der Kirche gemessen auf der Kanzel liefert wichtige Informationen, zu welchen Zeitpunkten eine Lüftung der Kirche sinnvoll ist. In Abb. 6 ist der gesamte Verlauf des Jahres 2014 gezeigt. Zunächst ist zu erkennen, dass die absoluten Feuchten (angegeben in  $\text{g}/\text{m}^3$  Luft) in den Wintermonaten sehr viel geringer sind als in den Sommermonaten.

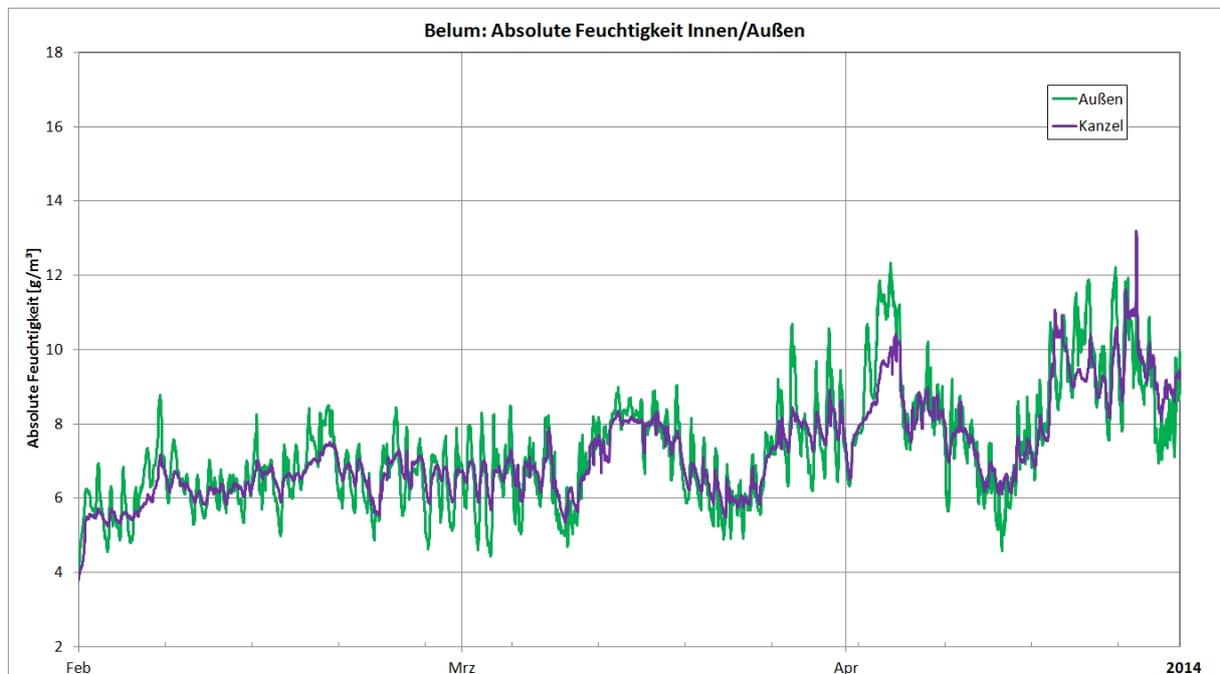


Abb. 7: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit außerhalb und innerhalb der Kirche Belum in den Monaten Februar bis April 2014

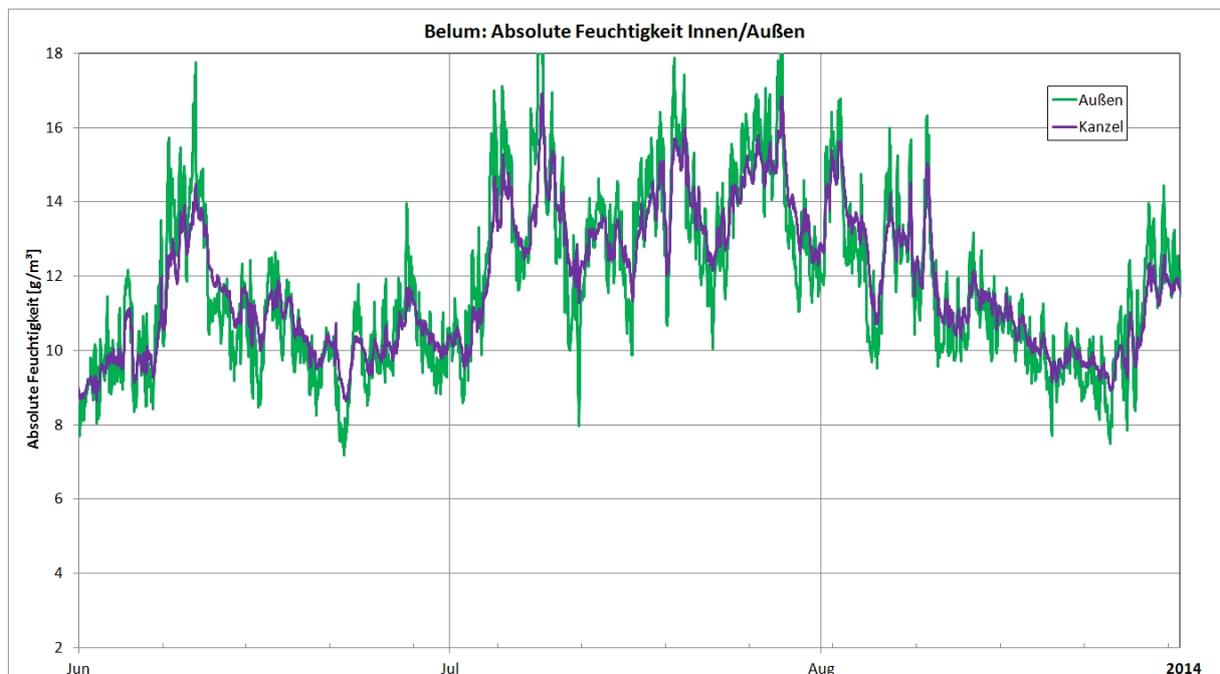


Abb. 8: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit außerhalb und innerhalb der Kirche Belum in den Monaten Juni bis August 2014

Immer wenn die grüne Kurve (außen) die lila Kurve (innen) unterschreitet, ist die absolute Feuchtigkeit außen geringer als in der Kirche, und die Fenster können geöffnet werden, unabhängig von der Jahreszeit. Für eine genauere Analyse muss man die Sommer- und Wintermonate heranziehen. In den Wintermonaten (Abb. 7) schwanken die absoluten Feuchten außen dem Tagesverlauf folgend sehr stark. Jeweils zur Mittagszeit ist es außen feuchter als drinnen, in der Nacht ist es umgekehrt. In den Sommermonaten (Abb. 8) ist diese tageszeitlich Zuordnung nicht so deutlich. Es gibt Perioden, in denen es außen permanent feuchter ist als drinnen, aber auch längere Zeiten, in denen es außerhalb dauerhaft trockener ist.

Fazit: Durch intuitives Lüften des Kirchenraumes kann die Raumklimasituation sehr stark verbessert werden. Eine dauerhafte Lüftung ist offensichtlich besser, als die Fenster ständig geschlossen zu halten.

In Marienhafe fand am 22.07.2017 eine extreme Wettersituation statt, die zu einem Wassereintrich in den Kirchenraum führte. In Abb. 9 sind für den Zeitraum vom 15.07.-23.07.2017 die absoluten Feuchtigkeiten innerhalb und außerhalb der Kirche und in einer Windlade aufgetragen. Die blaue Kurve beschreibt die absolute Feuchte außerhalb der Kirche, die rote Kurve im Kirchenraum und die grüne Kurve im Windsystem der Orgel. Die absoluten Feuchten werden in  $\text{g}/\text{m}^3$  angegeben.

Die absoluten Feuchten in der Kirche und der Windlade laufen fast parallel und unterliegen nur geringen Schwankungen. Die absoluten Feuchtwerte außerhalb der Kirche dagegen schwanken sehr stark zwischen 10 und 17  $\text{g}/\text{m}^3$ .

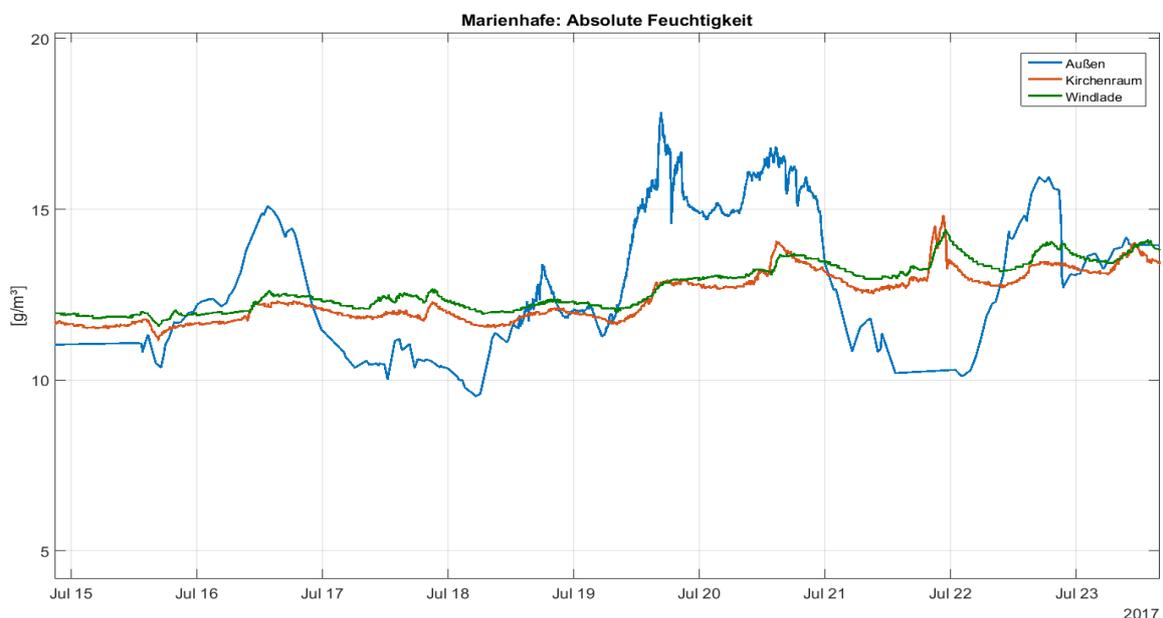


Abb. 9: Messung der absoluten Feuchtigkeit im Marienhafe außerhalb der Kirche, im Kirchenraum und in der Windlade während einer extremen Witterungssituation im Juni 2017

Solche Messungen innerhalb und außerhalb der Kirche kann man sehr leicht dazu heranziehen, um eine Lüftungsstrategie zu entwickeln. Grundsätzlich sollte man die Lüftungsfenster

öffnen, wenn die absolute Feuchtigkeit außen geringer ist als in der Kirche (hier am 17.07. und am 21.07.). Umgekehrt sollte man die Belüftung nicht durchführen, wenn die Außenfeuchten deutlich höher sind als in der Kirche, im vorliegenden Fall also am 16.07. und 22.07.

Bei der Auswertung solcher Messergebnisse wird man sehr überrascht sein, zu welchen Zeitpunkten günstige Lüftungsbedingungen herrschen. So ist im obigen Beispiel am Abend des 21.07. ein wolkenbruchartiges Gewitter aufgetreten, was sogar zu einem massiven Wassereintrag in den Kirchenraum geführt hat. Der plötzliche Anstieg der roten Kurve (Innenraum der Kirche) in Abb. 9 zeigt dieses Ereignis deutlich. Außen allerdings ist die absolute Feuchtigkeit dennoch gering geblieben. Erst im Verlauf des folgenden Tages, als die Temperatur draußen anstieg, stieg auch die absolute Feuchtigkeit durch Verdunstung des Niederschlages stark an.

Fazit: Kurzfristige, auch extreme Ereignisse bezüglich der Raumluftfeuchte haben nur geringen Einfluss auf die Feuchtesituation im Windsystem der Orgel. Temperaturschwankungen der Raumluft sind dagegen sehr viel effektiver und beeinflussen die Luftfeuchtigkeiten im Windsystem schneller.

Mit heutigen modernen Sensorsystemen kann man sehr einfach Alarmzustände herbeiführen, die Hinweise zu richtigem Lüften geben. In manchen Kirchen sind dazu schon sog. Ampelsysteme eingerichtet, die dem/r Küster/in eine Entscheidungshilfe geben. Noch komfortabler ist eine automatische Signalgebung an Stellmotoren, die Lüftungsfenster öffnen und schließen.

Von den Orgelbauern wurde berichtet, dass bereits derartige Systeme in Kirchen installiert wurden und teilweise Verwunderung darüber entstand, wann es außen trockener ist als innen ist (wohl gemerkt bei Betrachtung der absoluten Feuchtigkeit).

Fazit: Bereits einfache Messsysteme zeigen durch Alarmmeldungen günstige Lüftungszeitpunkte an und gewährleisten damit eine sichere Handhabung. Eine motorgesteuerte Lüftung der Fenster ist auf Dauer die sicherste Lösung.

### **3.6. Einfluss der Motorbox auf das Klima im Windsystem**

Immer wieder kommt die Frage auf, wie der Einfluss einer Windversorgung durch einen elektrisch betriebenen Motos auf die klimatischen Verhältnisse im Windsystem bis hin zur Windlade zu bewerten ist.

Im Folgenden wird eine genaue Analyse der Klimabedingungen im Kirchenraum, in der Motorbox und in der Windlade während eines Wochenendes (01.-04.11.2013) mit Gottesdienst und Orgelspiel am Beispiel von Belum dargestellt.

Am Freitag betrug in der Kirche, gemessen auf der Kanzel (Abb. 10), die Temperatur 12°C. Mit Einschalten der Heizung am Samstagnachmittag stieg die Temperatur T innerhalb weniger Stunden auf 19°C, danach trat die Heizungsregelung in Kraft, die über das Wochenende bis zum Gottesdienst beibehalten wurde. Nach Abschalten der Heizung sank die Temperatur

wieder sehr schnell und erreichte am Montagvormittag wieder das Ausgangsniveau von 12°C.

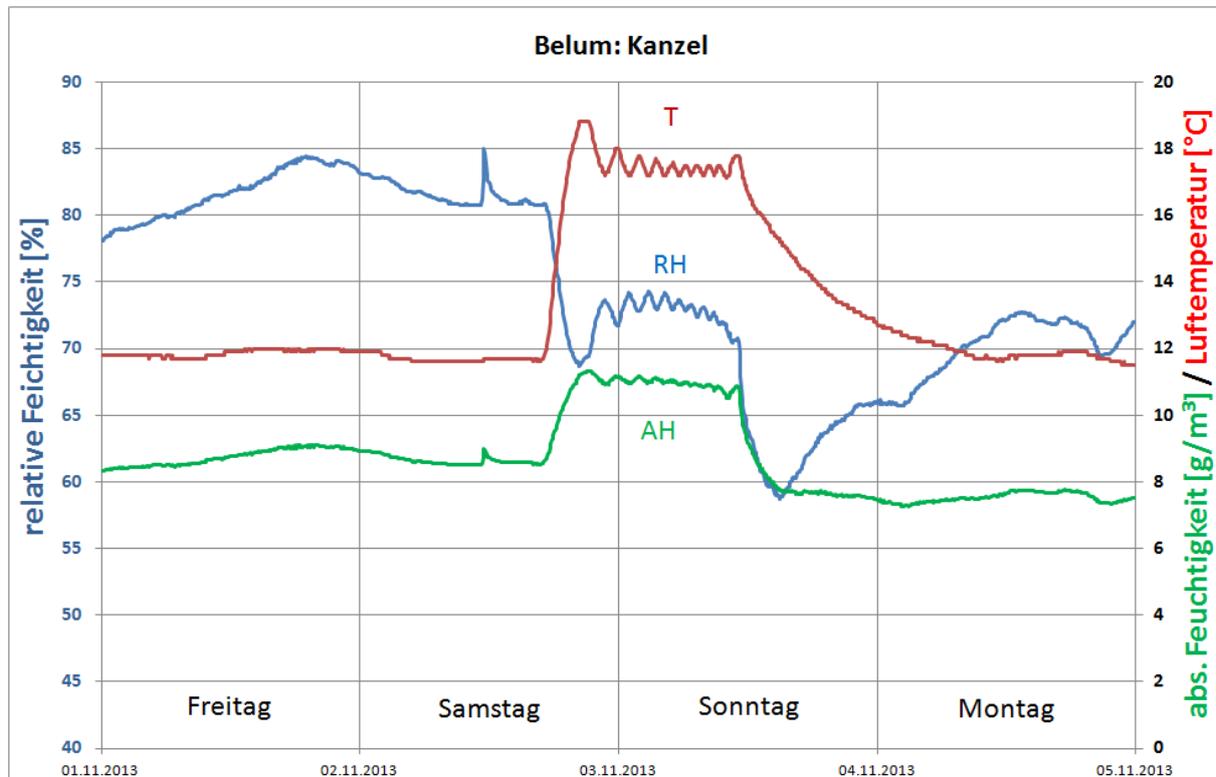


Abb. 10: Klimamessung auf der Kanzel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2013)

Die relative Feuchtigkeit RH der Luft hatte am Freitagnachmittag im Kirchenraum ein sehr hohes Niveau von über 80% rF. Mit Erhöhung der Raumlufthtemperatur nach dem Einschalten der Heizung sinkt die relative Feuchtigkeit ab, da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, die dann im Messfühler nicht mehr erfasst wird.

Für die Beurteilung der in der Raumlufth zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit ist aber die absolute Feuchtigkeit AH von Bedeutung, die aus den Messwerten errechnet werden kann. In einem abgeschlossenen Raum unter idealen Bedingungen bleibt die absolute Feuchtigkeit bei Änderung der Lufttemperatur konstant (vgl. Kap. 3.1). Bei den Messungen im Kirchenraum ist aber zu erkennen, dass die absolute Feuchte AH ebenfalls mit steigender Temperatur ansteigt. Daran erkennt man, dass die Ausstattung und die Raumschale der Kirche bei erhöhter Temperatur Feuchtigkeit an die Luft abgeben (Desorption).

Bei Temperaturdrosselung nimmt die absolute Feuchte AH wieder ab, das Wasser schlägt sich wieder nieder (Absorption), üblicherweise an kälteren Oberflächen.

Beim Spielen der Orgel wird vom Motor die Luft aus dem Kirchenraum in die Motorbox angesaugt, dort wärmt sie sich auf und wird in das Windsystem, beginnend mit dem Balg, geleitet (Abb. 11). Die die Motorbox verlassende Luft ist stark aufgewärmt (am Ende des Gottesdienstes am Sonntagmittag bis 30°C). Die angewärmte Luft führt zunächst zu einem Absinken der relativen Feuchte RH, da sich hier die absolute Wassermenge kaum ändert, aber die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft zunimmt.

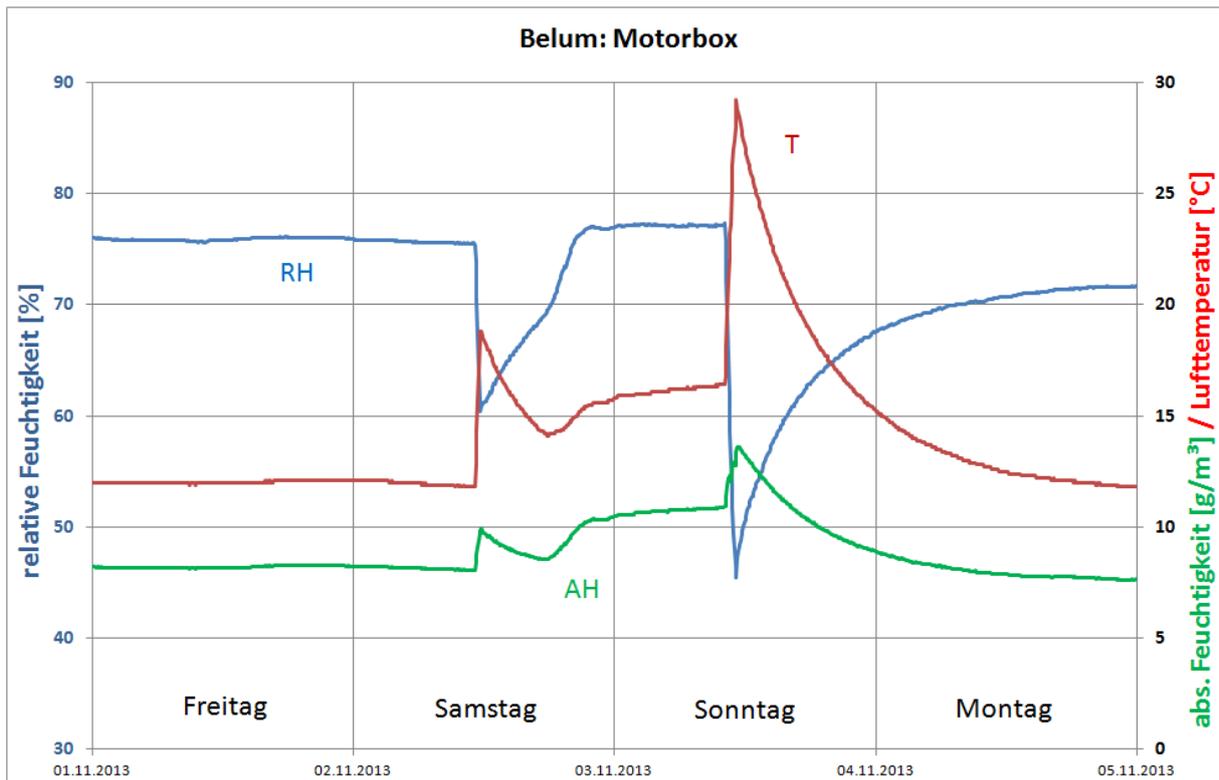


Abb. 11: Klimamessung in der Motorbox der Orgel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2013)

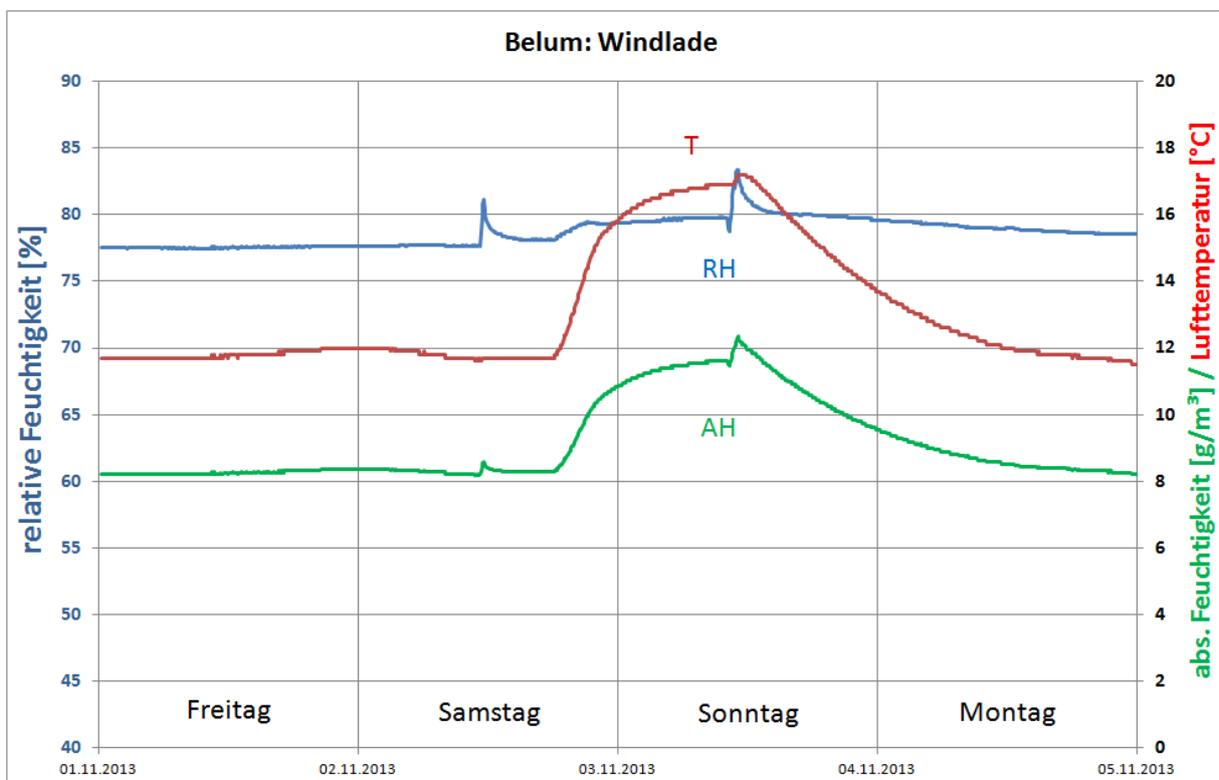


Abb. 12: Klimamessung in der Windlade der Orgel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2015)

Die Luft wird über einen (8-10 m langen) Windkanal der Windlade zugeführt. Bei Betrachtung der Messergebnisse in der Windlade (Abb. 12) ergeben sich überraschende Erkenntnisse. Am Freitagnachmittag lag die Temperatur T in der Windlade erwartungsgemäß ebenfalls bei 12°C. Erstaunlich ist, dass auch in der Windlade die Erhöhung der Temperatur bis zum Gottesdienst 18°C erreicht. Der Temperatúrausgleich der Luft findet zwar verzögert, aber in derselben Größenordnung statt. Bezüglich der relativen Feuchtigkeit RH liegt ein gleichbleibend konstant hoher Wert von knapp unter 80% rF. vor. Die z.T. starken Schwankungen der Luftfeuchtigkeit im Kirchenraum wirken sich auf die Windlade nicht aus. Überraschenderweise sinkt aber die relative Feuchtigkeit RH bei Erhöhung der Temperatur in der Windlade nicht (wie im Kirchenraum beobachtet) ab, sondern steigt sogar noch an. Die absolute Feuchtigkeit AH steigt ebenfalls an. Die Schlussfolgerung kann nur sein, dass die Erhöhung der Lufttemperatur in der Windlade ebenfalls dazu führt, dass absorbierte Feuchtigkeit an den Innenwänden der Windladen bei Temperaturerhöhung an die Luft abgegeben wird.

Die in den gezeigten Messungen am Samstagnachmittag auftretenden kurzen Peaks sind der Übungsstunde der Organistin zuzuordnen. Sie betrat bei feuchtem Wetter die Kirche, was an der plötzlichen Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Kirchenraum zu erkennen ist. Kurz darauf wurde der Motor für die Orgel eingeschaltet. Auch dieses Ereignis ist mit einem deutlichen Peak der Luftfeuchtigkeit in der Windlade zu erkennen.

Fazit: Die in der Motorbox erwärmte Luft hat sich bis zum Erreichen in der Windlade wieder abgekühlt, so dass hier keine nennenswerte Erhöhung der Lufttemperatur gemessen wird. Auf dem Weg durch den hölzernen Windkanal in die Windlade nimmt diese warme Luft Feuchtigkeit auf. Die relative und absolute Feuchtigkeit der aus der Motorbox während des Orgelspiels gelieferten Luft steigt daher nennenswert an.

### 3.7. Windtrocknung

In Belm wurden Trocknungsversuche am Instrument durchgeführt. Dazu wurde im Windkanal, der direkt in die Windladen der Orgel führt, eine Wartungsöffnung installiert. Dadurch konnten flache Schalen gefüllt mit Silicagel (insgesamt 1,5 kg) eingebracht werden (Abb. 13).

Die Auswirkung auf den Feuchteverlauf konnte danach direkt an den Messwerten abgelesen werden (Abb. 15).

Schon wenige Minuten nach der Installation war die relative Feuchtigkeit von 77 % rF auf weniger als 55 % rF abgefallen. Gleichzeitig verminderte sich die absolute Feuchtigkeit von 8 auf 6 g/m<sup>2</sup> (ca. 25%). Weiterhin erkennt man, dass die Wirkung ca. sechs Wochen anhält, bevor die absolute Feuchtigkeit wieder nennenswert steigt (unterbrochen von Ereignissen, in denen die Orgel gespielt wird). Das eingebrachte Silicagel hat nach sechs Wochen die ursprüngliche blaue Farbe verloren und zeigt damit an, dass die Trocknungswirkung nicht mehr gegeben ist (Abb. 14).



Abb. 13: geöffnete Wartungsklappe vor dem Trocknungsversuch mit trockenem Silicagel



Abb. 14: geöffnete Wartungsklappe nach sechs Wochen. Das feuchte Silicagel hat die blaue Farbe verloren



Abb. 15: Klimamessung während des Trocknungsversuchs in Belum

Mit diesem Versuch konnte gezeigt werden, dass eine Trocknung grundsätzlich möglich ist, wobei es sicher auch geschicktere Möglichkeiten der Lufttrocknung geben wird. Das hier verwendete Silicagel kann allerdings durch Ausheizen 1 Stunde bei 150 °C wieder regeneriert werden.

Es wurde diskutiert, an welcher Stelle die Trocknung der Luft am geeignetsten erfolgen sollte und welche Möglichkeiten es dazu gibt.

### 3.8. Windflussmessungen

An vier der im Projekt untersuchten Orgeln (Rumbeck, Osteel, Belum und Marienhafe) wurden Messungen zum Windverbrauch und Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Anlass wa-

ren die Trocknungsversuche in Belum mit Silicagel (Kap. 3.7), die grundsätzlich erfolgreich waren. Es fehlte aber noch eine Aussage dazu, wie schnell der Wind beim Orgelspiel über das im Windkanal ausgelegte Silicagel streicht und ob dabei eine Trocknung des Windes möglich ist.

Zunächst wurde der Blindverbrauch an jeder Orgel gemessen, d.h. wie viel Wind wird verbraucht, ohne dass eine Pfeife gespielt wird. Damit kann die Dichtheit des Systems ermittelt werden. Anschließend wurden Messungen beim Spiel Plenum, 8Fuß 4stimmig, 8Fuß 2stimmig, Spiel einzelner Rohrflöten C, c0, c1, c2 und c3 und einem immer gleichen Testakkord vorgenommen.

Die Messungen wurden gestartet, nachdem der jeweilige Balg manuell maximal aufgepumpt wurde (ohne Motor).

Bei der ersten Messung wurde die Zeit gemessen, nach der der Balg vollständig geleert war.

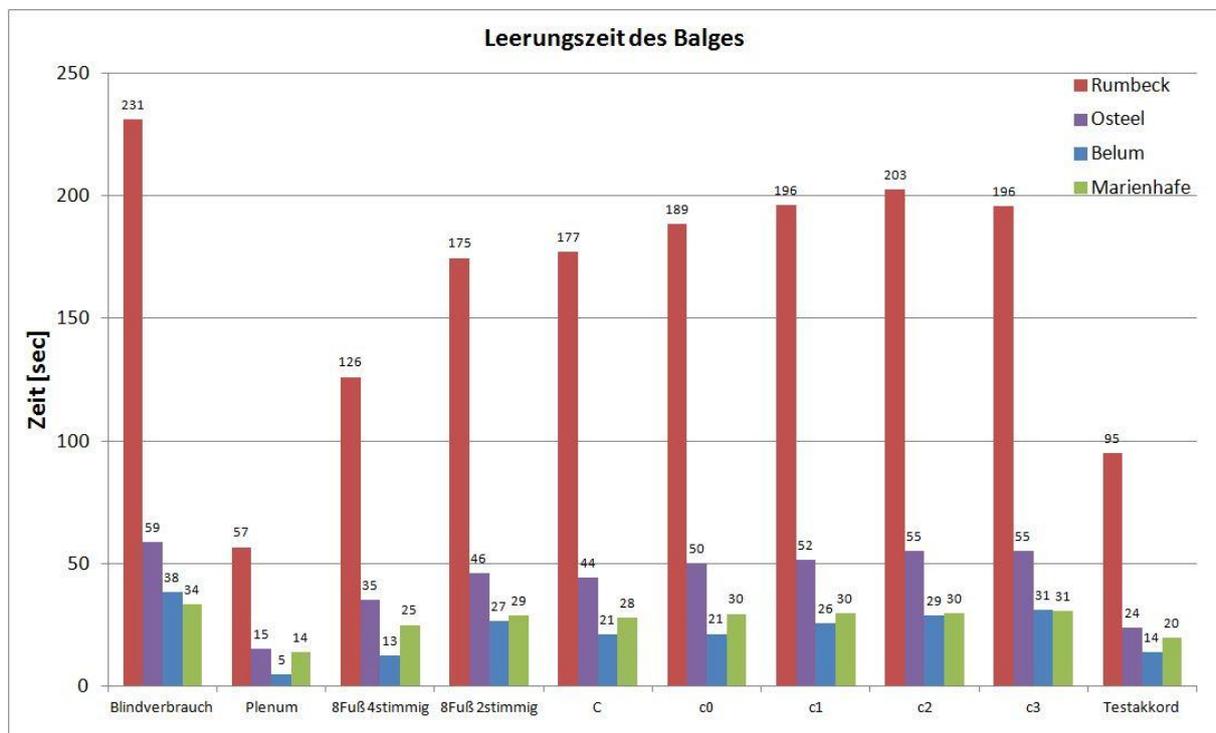


Abb. 16: Zeit, nach der der komplett gefüllte Balg vollständig entleert ist

In Abb. 16 ist für die verschiedenen Orgeln die Zeit in Sekunden dargestellt, nach der der Balg völlig entleert ist. Je höher der Balken ist, desto dichter ist das Windsystem. Die Orgel in Rumbeck zeichnet sich hier durch besondere Dichtigkeit aus; ohne Spiel dauert es fast 4 Minuten, bis der Balg leer ist. Bei den anderen drei Orgeln ist die Leerungszeit ohne Spiel in 30 - 60 Sekunden beendet. In Rumbeck kann das Plenum mit einer Balgfüllung 1 Minute gespielt werden, in Belum nur 5 sec. Allerdings ist der Balg in Rumbeck auch wesentlich größer. Die kleinste Pfeife c3 kann in Rumbeck 3,5 Minuten gespielt werden, in den anderen Orgeln nur 0,5-1 Minute.

Nach Ermittlung des Volumens des Windsystems (Balg + Windkanäle) kann aus diesen Werten nun der Gesamtwindverbrauch (Blindverbrauch + Spiel) in l/min berechnet werden (Abb. 17).

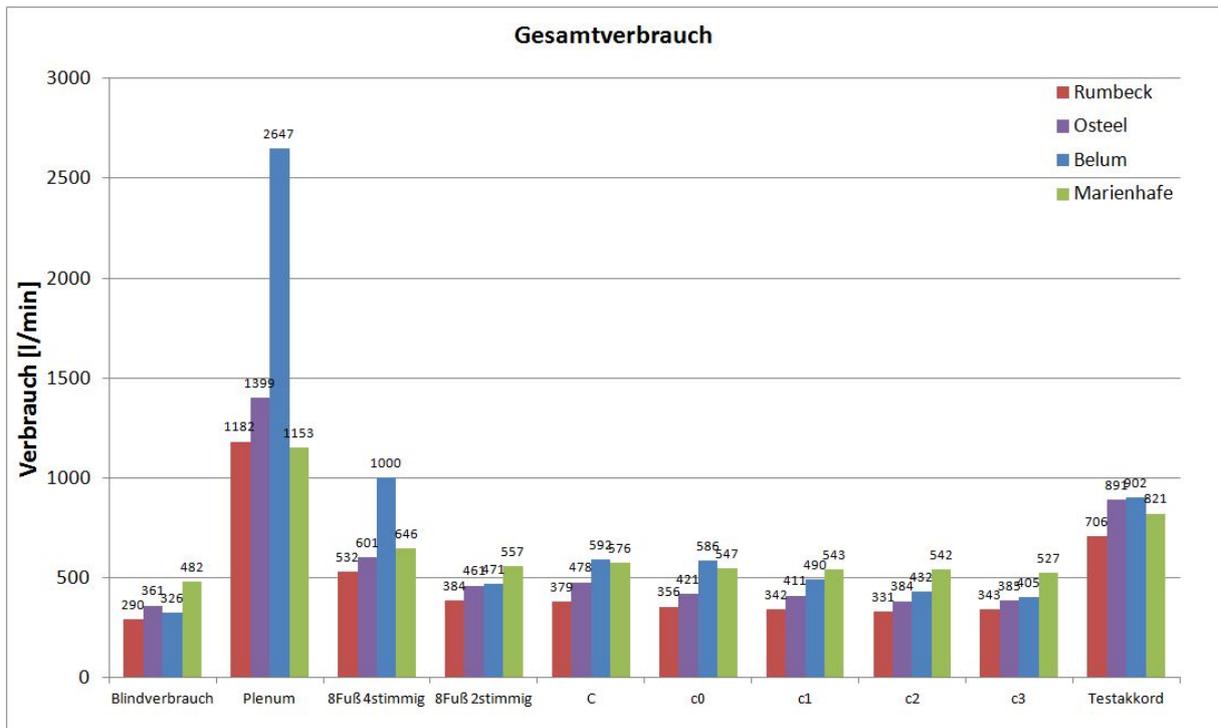


Abb. 17: Gesamtverbrauch beim Orgelspiel und als Blindverbrauch der Orgeln in l/min

Erstaunlicherweise unterscheidet sich der Blindverbrauch in Rumbeck trotz der hohen Dichtigkeit des Windsystems kaum von den Orgeln in Marienhafe, Osteel und Belum. (Belum zeigt beim Plenum und bei 8Fuß vierstimmig höhere Werte.) Dieses Ergebnis setzt sich beim Spiel der verschiedenen Akkorde fort. Beim Spiel der kleinsten Pfeife c3 werden immer noch 350 bis 400 l/min verbraucht.

Zieht man nun von dem Gesamtverbrauch den Blindverbrauch ab, ergibt sich der Netto-Verbrauch der einzelnen Pfeifen (bzw. Akkorde) (Abb. 18).

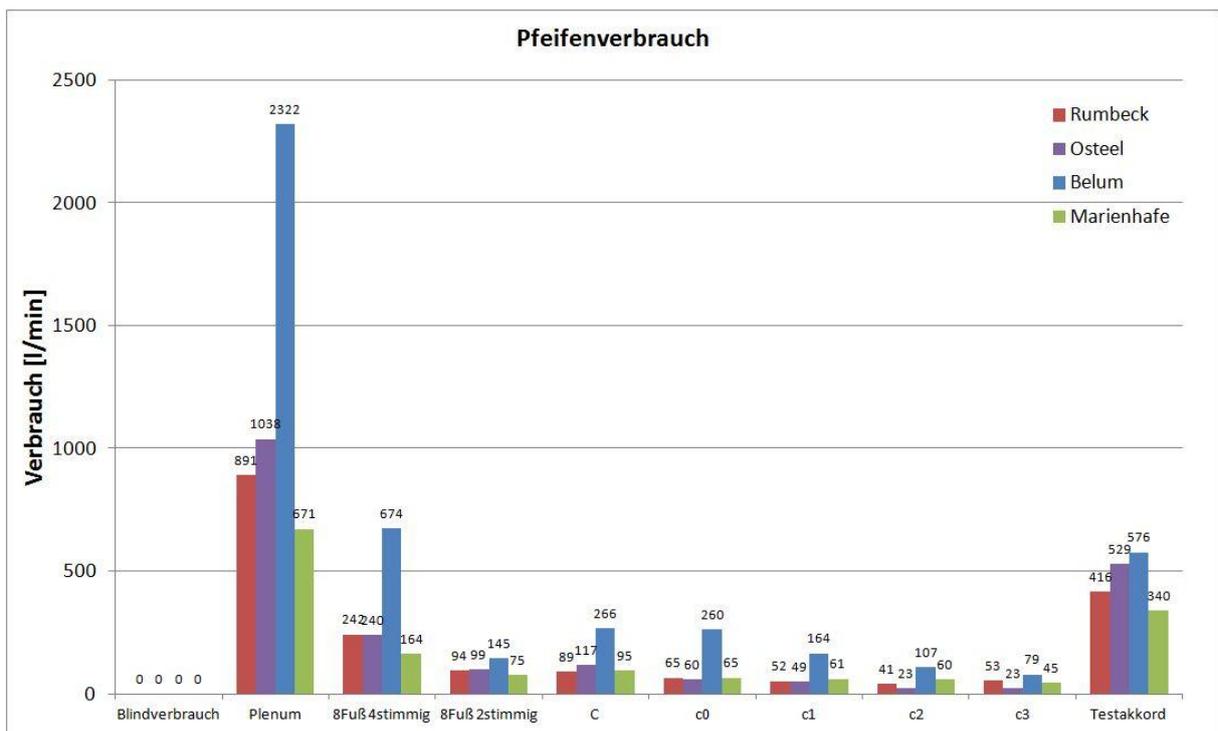


Abb. 18: Nettoverbrauch der gespielten Pfeifen unter Berücksichtigung des Blindverbrauchs in l/min

Hier fällt Belum aus dem Ergebnis etwas heraus, da die Orgel beim Plenum und auch bei den Einzelpfeifen deutlich mehr Wind verbraucht. Lediglich bei den kleinen Pfeifen c2 und c3 vereinheitlicht sich der Verbrauch. Bei der kleinsten Pfeife c3 gehen noch 20-90 l/min durch. Der Hauptzweck dieser Messungen war aber die Ermittlung der Windgeschwindigkeiten in m/sec, die beim Spiel vorliegen (Abb. 19).

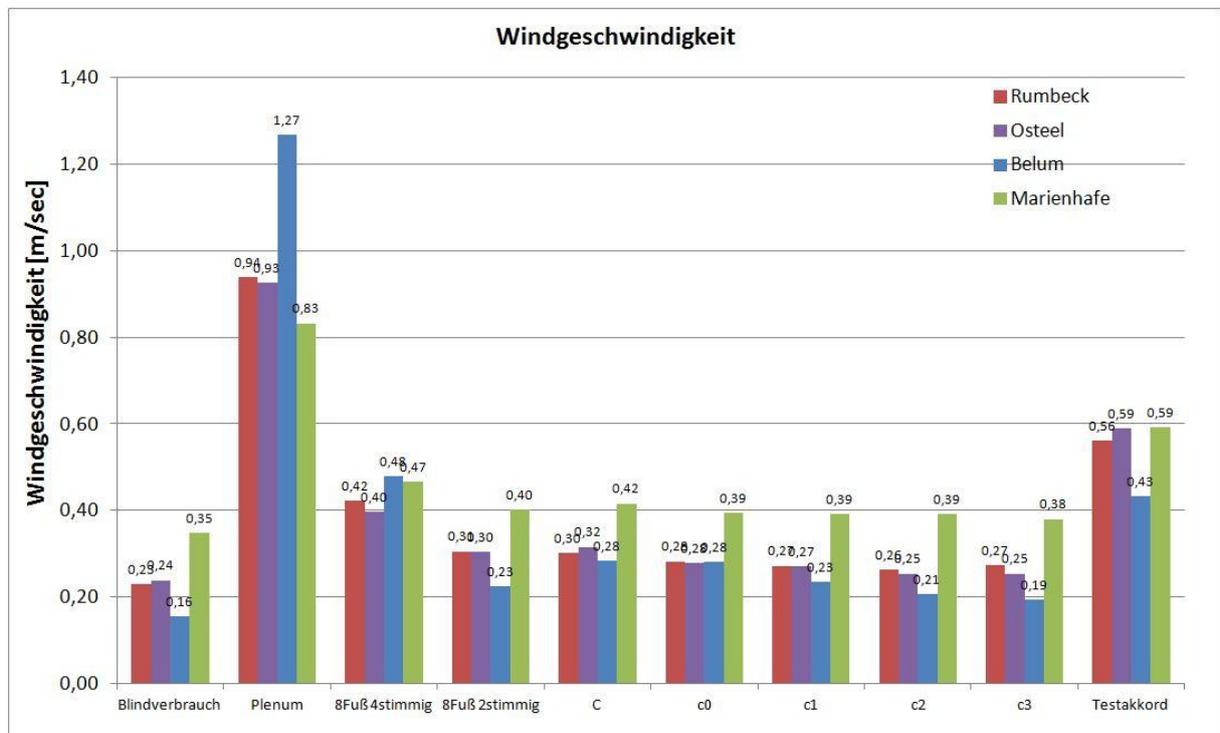


Abb. 19: Windgeschwindigkeiten beim Orgelspiel in m/sec

Bei allen Orgeln bewegt sich der Wind beim Blindverbrauch ohne Spiel zwischen 16 - 35 cm/sec. In Marienhafte ist dieser Wert erhöht, was sich beim Spiel der anderen Akkorde ebenfalls fortsetzt. Interessant ist als Gesamtergebnis, dass beim Spiel von einzelnen Pfeifen im Windsystem eine einheitliche Windgeschwindigkeit von 20 - 40 cm/sec vorliegt. Außer beim Plenum geht die Windgeschwindigkeit kaum über 50 cm/sec hinaus, erstaunlich wenig (entspricht ca. 0,14 km/h).

Fazit: Grundsätzlich scheint eine Trocknung des Windes über einem Bett aus Trocknungsmittel oder durch andere technische Maßnahmen möglich zu sein.

## 4. Holz

Traditionell werden die Gehäuse und Windsysteme von Orgeln aus Eichenholz gefertigt. Auch bei Reparaturen und Umbauten an historischen Orgeln wird auf Eichenholz zurückgegriffen, teils aus traditionellen oder aus denkmalpflegerischen Gründen. Häufig wird Originalsubstanz der alten Orgel wiederverwendet, aber es lässt sich nicht vermeiden, neues Eichenholz zu beschaffen und einzusetzen, wohl wissend, dass frisches Eichenholz eine erhöhte Emission an Essigsäure mit sich bringt.

In der normalen Umgebungsluft beträgt die Konzentration an Essigsäure um  $0,01 \text{ mg/m}^3$  Luft [4]. Blei ist das empfindlichste Metall bezüglich der Korrosionsneigung mit Essigsäure. Es wird bezüglich einer signifikanten Schädigung von Blei durch Essigsäure von einer Konzentration von  $0,4 \text{ mg/m}^3$  Luft berichtet [5].

Die oben zitierten Quellen beziehen sich auf Schauvitriolen in Museen, in denen Eichenholz verbaut ist, und die ebenfalls große Schäden an Ausstellungsstücken verursachen. Windladen in Orgeln haben aber ähnliche Bedingungen und sind als geschlossene Systeme zu betrachten. Hinzu kommt auf jeden Fall, dass erheblich höhere Luftfeuchtigkeiten in den Windsystemen der Orgeln vorliegen. In allen Fällen ist es wünschenswert durch einfache Tests erste Informationen über die Essigsäureemission von Eichenholz zu bekommen. Die einfachste Methode wäre Riechen der Gerüche. Die menschliche Nase kann Essig erst ab einer Konzentration von  $2,5 \text{ mg/m}^3$  Luft riechen, also weit oberhalb der für Blei kritischen Konzentration. [6] beschreibt ein weiteres einfaches, halbquantitatives Verfahren durch einen Glycerin/pH-Test, der mit Wasser und Glycerin präparierten pH-Teststreifen durchgeführt wird. Aber auch hier wird eine Nachweisgrenze von  $1,2 \text{ g/m}^3$  Luft angegeben.

Um genauere und vor allen Dingen quantitative Werte zu erhalten, muss aber auf chromatografische Techniken oder Diffusionsröhrchen zurückgegriffen werden. Innerhalb dieses Projektes sind solche Analysen nicht durchgeführt worden.

### 4.1. Oddy-Test zur einfachen Holzbeurteilung

Ein gebräuchlicher Test zur Beurteilung von Luftschadstoffen auf die Korrosionsneigung von Metallen ist der Oddy-Test, benannt nach dem Autor der 1975 ersten diesbezüglichen Veröffentlichung [7] [8]. Bei dieser Untersuchungsmethode werden verschiedene Metallabschnitte einer Schadgasatmosphäre ausgesetzt. Die ursprünglich verwendeten Metalle waren Silber (Test auf Schwefelverbindungen), Kupfer (Test auf Chloride, Oxide und Schwefelverbindungen) und Blei (Test auf organische Säuren und Aldehyde). Dabei werden die Metalle einzeln mit einer Probe der zu untersuchenden Substanz in einem Reagenzglas verschlossen und bei hoher Luftfeuchtigkeit mehrere Tage exponiert.

Im Rahmen dieses Projektes wurde dieser Test benutzt, um die Essigsäureausgasungen von Eichenholz an Bleicoupon zu testen. Obwohl keine quantitativen Aussagen mit diesem Test erreicht werden können, hat sich der Versuchsaufbau zur Beurteilung von Eichenholz sehr bewährt.

In ein Schraubglas wird ein Stück des zu untersuchenden Holzes zusammen mit einem Coupon aus reinem Blei (99,9%) gegeben. Zusätzlich wird ein kleines Glas gefüllt mit Wasser

hingestellt (Abb. 20). Das zugeschraubte Glas wird dann in einen Ofen bei 65°C ausgelagert. Bei dieser Temperatur entsteht in dem Schraubglas durch Verdampfen des Wassers eine hohe Ausgleichsfeuchte von 95% r.F. Man muss darauf achten, dass sowohl das Holz als auch die Bleiprobe nicht mit an den Außenwänden des Glases kondensierendes Wasser in Berührung kommt, da das die Ergebnisse verfälschen würde. Daher wurde das Holzstück auf eine Kunststoffschachtel gestellt und der Bleicoupon auf einen Kunststoffhalter montiert.



Abb. 20: Aufbau des Oddy-Testes

Schraubglas, ein Glas mit Wasser, ein Stück zu untersuchendes Holz, ein Bleicoupon.

Alle Teile werden in das Schraubglas gegeben (rechts) und in einen Ofen bei 65°C ausgelagert.

Bereits nach zwei bis 3 Tagen ist bei starker Essigsäureemission eine deutliche (weiße) Acetatbildung auf der Blei-Oberfläche zu erkennen. Bei geringerer Essigsäureemission fällt die Oberflächenveränderung des Bleis deutlich geringer aus. In Abb. 21 sind exemplarisch einige Beispiele von getesteten Bleicoupons gezeigt. Die Nullprobe (Abb. 21, oben links ohne Holzprobe) wurde durchgeführt, um eventuelle Schadstoffemissionen des Kunststoffhalters auszuschließen. Das Ergebnis ist eindeutig, es sind keinen Veränderungen der Bleioberfläche festzustellen. Dahingegen gibt es bei den verschiedenen untersuchten Hölzern starke Unterschiede. Luftgetrocknete Mooreiche zeigt kaum Korrosionseffekte, auch sehr altes Eichenholz (dessen Herkunft ungeklärt ist) zeigt nur wenig Emissionseffekte. Frischere Holzproben dagegen zeigten starke Acetatbildung, selbst wenn die Vorbehandlung mit „gewässert“ oder „Kammer getrocknet“ angegeben wurde.

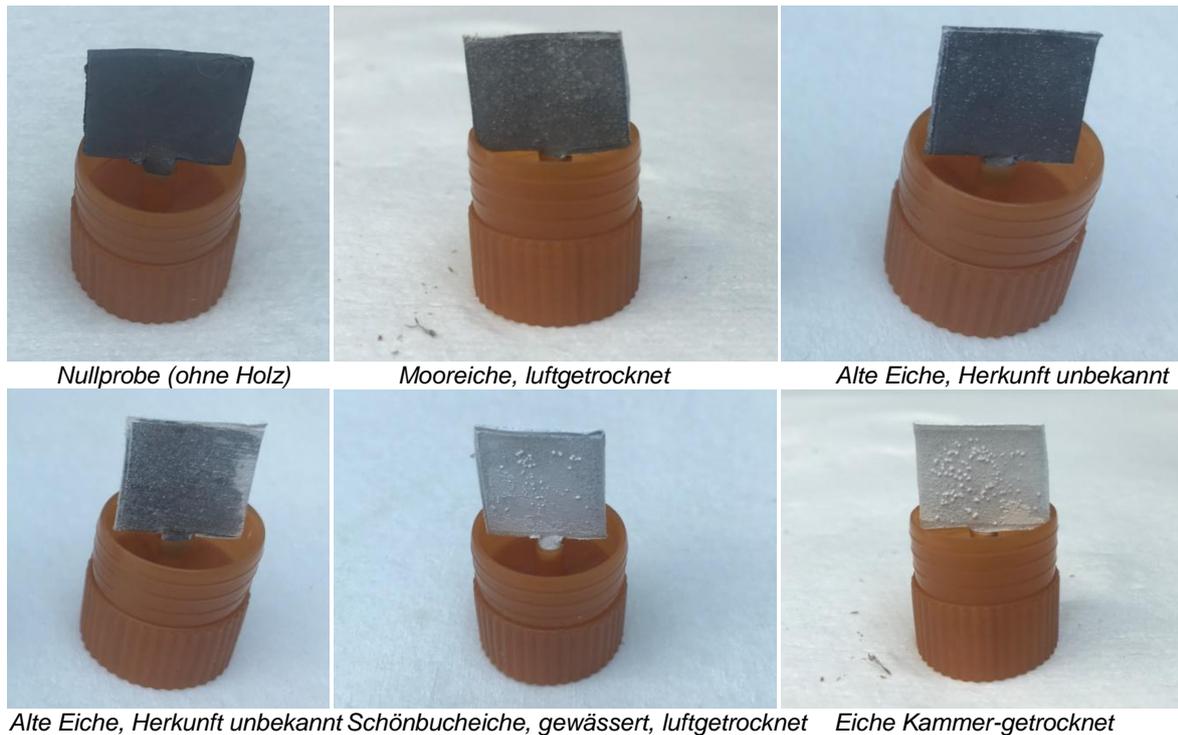


Abb. 21: Bleicoupon (99,9%) 3 Tage bei 65°C ausgelagert mit verschiedenen Holzproben:  
oben links: Nullprobe

Obwohl dieser Test keine quantitativen Aussagen über die Güte des Holzes hinsichtlich der Emission von Essigsäure ermöglicht, kann man keinen systematischen Zusammenhang mit der Vorbehandlung des Holzes erkennen. Ganz im Gegenteil scheint die Kammertrocknung die Emissionsneigung des Holzes eher zu erhöhen, anstatt sie zu vermindern.

In der Literatur wird beschrieben, dass eine Kammertrocknung von Holz zwar die Feuchtigkeit vermindert, aber die Bildung von freier Essigsäure im Holz beschleunigt. Diese kann aber während des Trocknungsprozesses nicht schnell genug entweichen und verbleibt im Holz, was in der Folge saureres Holz erzeugt, was schnell korrosiv wirken kann. Luftgetrocknetes Holz enthält weniger gebundene Essigsäure, die erst nach Jahren emittiert wird [9]. Es scheint so, dass das Alter (und damit die bereits fortgeschrittene Ausdünstung), aber auch die Herkunft mit den vorgelegenen Wachstumsbedingungen entscheidend sind. Im Rahmen dieses Projektes wurden aber diesbezüglich keine weiteren Recherchen oder Versuche angestellt.

Fazit: Mit dem Oddy-Test in dieser vereinfachten Form steht den Orgelbauern eine einfache Methode zur Verfügung, die Güte von erworbenem Holz hinsichtlich seiner Essigsäure-Emission zu beurteilen. Künstliche und beschleunigte Trocknung scheint sich eher negativ auszuwirken.

## 5. Pfeifenmaterial

Im Rahmen dieses Projektes wurden Pfeifen und deren Korrosion betrachtet, die aus reinem Blei oder mit sehr geringen Legierungsanteilen (Kupfer, Antimon, Zinn, etc.) weniger als 2 % bestehen. Einflüsse von Legierungen auf die Festigkeiten oder sonstiger mechanischer Eigenschaften wurden nicht untersucht. Allerdings wurden bei den metallografischen Analysen der Korrosion des Bleimaterials auch die Verteilung solcher geringer Legierungskonzentrationen von Zinn und Antimon betrachtet, um einen Eindruck für die vorliegenden Gefügesituationen des Bleimaterials zu gewinnen und möglicherweise den Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit diskutieren zu können.

### 5.1. Phasendiagramm Pb-Sn

Die Verwendung von Zinn (Sn) und/oder Antimon (Sb) als Legierungselemente in Blei ist bei der Herstellung von Orgelpfeifen traditionell. Man wusste schon sehr früh, dass Zinn (Sn) den Korrosionswiderstand erhöht. Antimon (Sb) und auch Kupfer (Cu) verbessern die Eigenschaften des Materials.

Dazu lohnt sich ein Blick in das Phasendiagramm Blei-Zinn (Abb. 22).

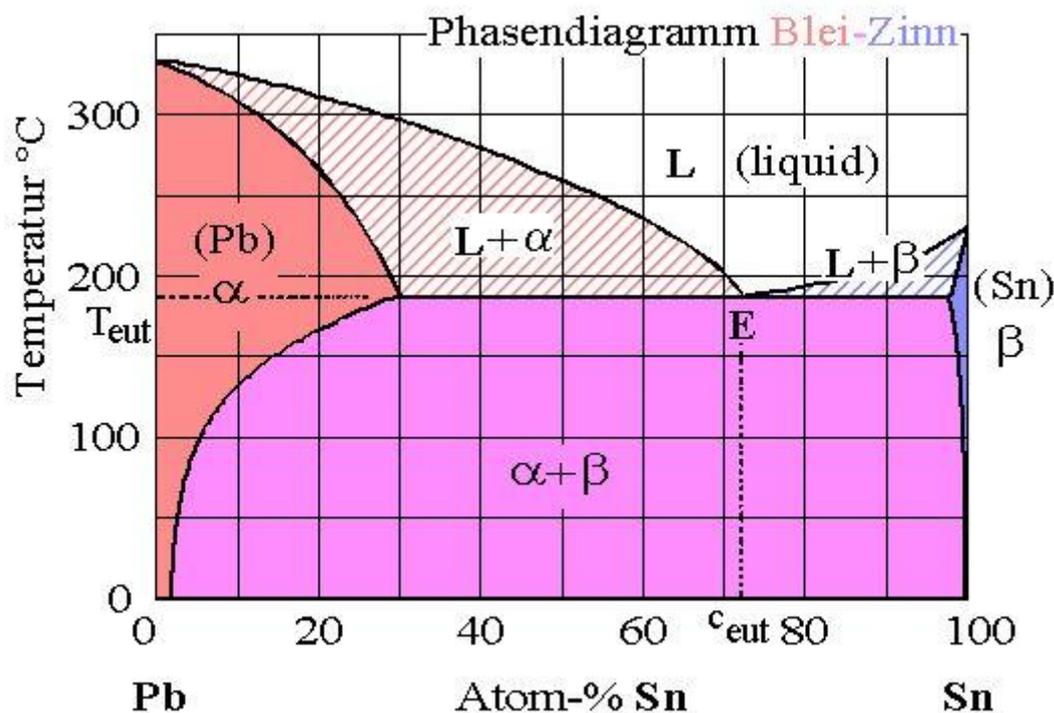


Abb. 22: Phasendiagramm des Systems Pb-Sn

(Quelle: [https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/m...5\\_4\\_3.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/m...5_4_3.html))

Auf der x-Achse ist die Zusammensetzung des Blei-Zinn-Gemisches aufgetragen, ganz links reines Blei (0% Sn), ganz rechts reines Zinn (100% Sn). Auf der y-Achse ist die Temperatur aufgetragen. Auf der Pb-reichen Seite links ist als braunes Feld die Pb- $\alpha$ -Phase bestehend aus Blei (Pb) mit einer relativ großen Menge an gelöstem Zinn (Sn) dargestellt. Bei einer Temperatur ( $T_{eut}$ ) von 183°C kann 19 wt-% oder 30 at-% Zinn (Sn) in diesem Mischkristall

gelöst sein. Auf der anderen Sn-reichen Seite (rechts, blaues Feld) kann bei derselben Temperatur in der Sn- $\beta$ -Phase maximal 2,5 wt-% Blei gelöst sein.

Uns interessiert bei der Verwendung von Pfeifenmaterial die ganz linke Seite mit wenig Zinn (Sn). Reines Blei (ganz links) ist über 327°C flüssig, darunter wird es fest. Bei Raumtemperatur kann maximal ca. 2 wt.-% Zinn im Blei gelöst sein. (Die meisten Darstellungen dieses Phasendiagramms geben keine genauen Werte an.) Bei höherem Zinngehalt (lila Phasengebiet) entsteht ein Gemisch aus  $\alpha$ -Blei und  $\beta$ -Zinn, d.h. Zinn wird im Blei metallisch ausgeschieden.

Für Antimon (Sb) sieht das Phasendiagramm ähnlich aus, wobei allerdings die Schmelz- und Phasenübergangstemperaturen andere sind.

Wie die Verteilung von Zinn und Antimon im Blei-reichen Gefüge tatsächlich aussieht, ist im folgenden Kapitel gezeigt.

## 5.2. Elementverteilung von Zinn (Sn) und Antimon (Sb) in Blei

Zur Veranschaulichung der Verteilung und der Löslichkeit der Legierungselemente Antimon (Sb) und Zinn (Sn) wurde eine Blei-Probe untersucht, die 1-2 wt.-% Sn und Sb enthielt. Die Untersuchung fand in einer Elektronenstrahlmikrosonde statt, mit der man die Verteilung von Elementen abbilden kann. Die Probe wurde als metallografischer Querschliff präpariert.

Die Abbildungen zeigen jeweils denselben Probenausschnitt in gleicher Vergrößerung, und zwar die Rückstreuelektronenabbildung RE (Abb. 23), die Pb-Verteilung (Abb. 24), die Sn-Verteilung (Abb. 25) und die Sb-Verteilung (Abb. 26).

In der Rückstreuelektronenabbildung (RE) in Abb. 23 wird die Helligkeit der einzelnen Bildpunkte durch die Ordnungszahl des dort sitzenden Elementes bestimmt. Da Blei (Pb) ein sehr schweres Element ist, erscheinen die bleihaltigen Körner hell. An den Korngrenzen sind dunkle Zonen erkennbar, an denen leichtere Elemente sitzen (Zinn (Sn) und Antimon (Sb)).

Die Abb. 24 zeigt dieselbe Probenstelle als Verteilungsbild des Elementes Blei (Pb). Die farbliche Darstellung bedeutet: blau und dunkel = wenig Blei, je heller und roter desto mehr Blei. In dieser Darstellung sind die nur wenig Pb-haltigen Korngrenzen als dunkelblaue Stellen gut zu erkennen. Man erkennt aber auch, dass entlang der Korngrenzen eine Blei-Verarmung vorliegt (grüne Streifen ohne Rot). Die Kerne der Bleikörner besitzen die höchste Bleikonzentration (nahezu 100 wt-%)

Die Abb. 25 zeigt die Zinn- (Sn) und Abb. 26 die Antimon- (Sb)-Verteilung. Die Kerne der Körner erscheinen dunkelblau, enthalten also kein Zinn (Sn) und Antimon (Sb). Entlang der Korngrenzen allerdings sind hellblaue Zonen zu erkennen, in denen sowohl Antimon (Sb) als auch Zinn (Sn) vorhanden sind. Hier liegt also ein Mischkristall aus Blei vor, in dem Zinn (Sn) und Antimon (Sb) gelöst ist. Nach dem Phasendiagrammen Pb-Sn und Pb-Sb enthalten diese Zonen ca. 2 wt-% Zinn (Siehe Kap. 5.1 und Abb. 22).

Weiterhin erkennt man aber an den roten bis weißen Streifen entlang der Korngrenzen, dass dort sowohl Zinn (Sn) als auch Antimon (Sb) metallisch ausgeschieden ist. An diesen Stellen

ist die Löslichkeitsgrenze von Zinn (Sn) und Antimon (Sb) in Blei überschritten, und es hat sich ein Gemisch aus  $\alpha$ -Pb und  $\beta$ -Sn bzw.  $\beta$ -Sb gebildet.

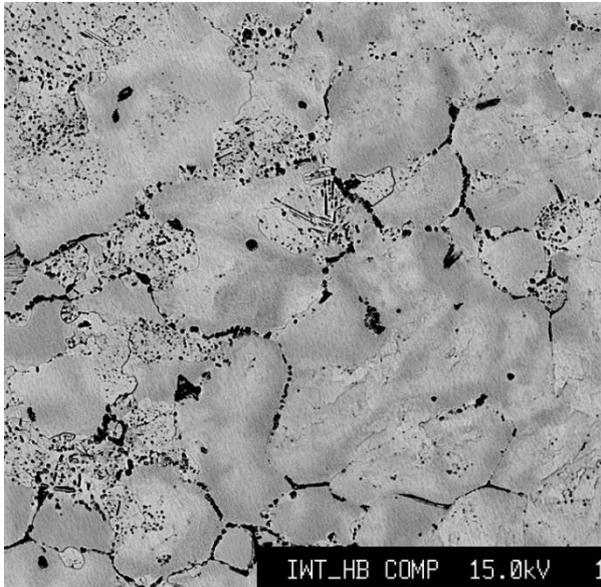


Abb. 23: Rückstreuelektronen-Abbildung (RE) der Analysefläche

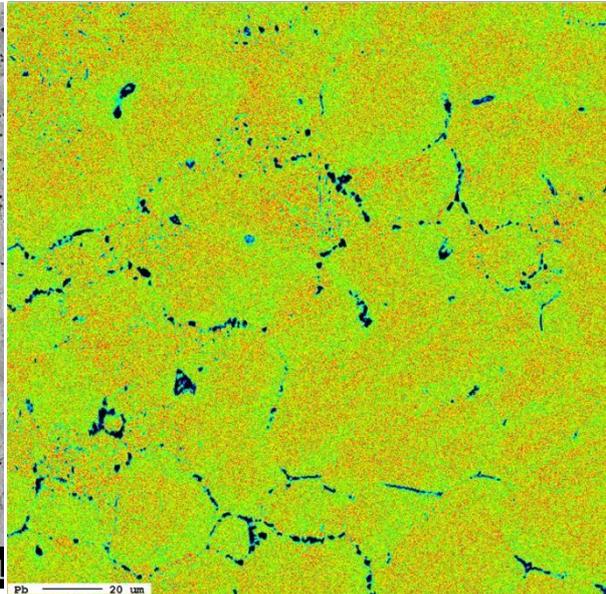


Abb. 24: Blei (Pb)-Verteilung (vgl. Abb. 23)

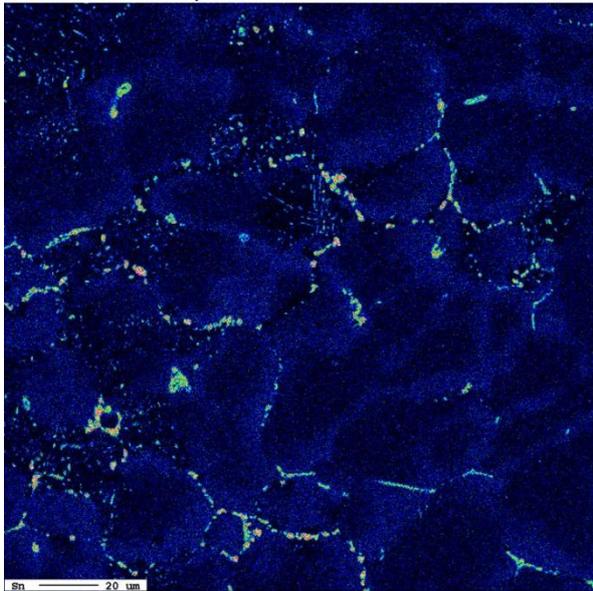


Abb. 25: Zinn (Sn)-Verteilung (vgl. Abb. 23)

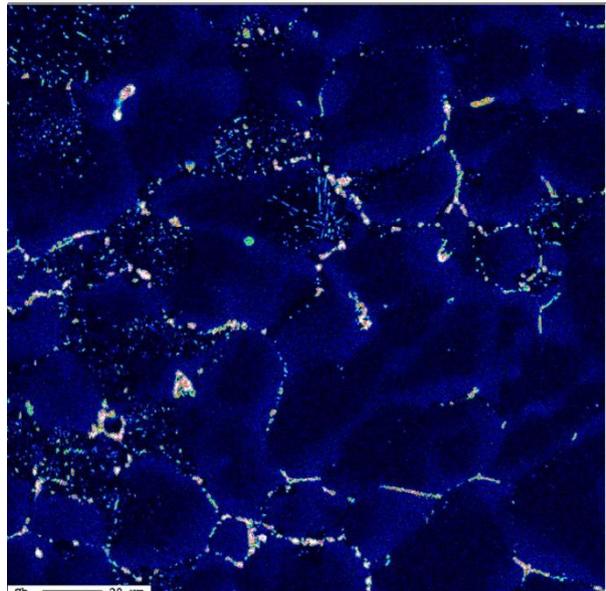


Abb. 26: Antimon (Sb)-Verteilung (vgl. Abb. 23)

Fazit: Man darf sich eine Blei-Zinn- bzw. Blei-Antimon-Legierung nicht als homogene Masse vorstellen, in der alle Metalle gleichmäßig verteilt vorliegen. Wie das Gefüge dieser Legierungen aussieht, hängt sehr stark von den Element-Gehalten und der Abkühlgeschwindigkeit aus der Schmelze ab.

### 5.3. Zinndiffusion an Lötflächen

Beim Löten einer Bleinaht wird das Lot so weit erhitzt, dass es flüssig wird. Liegt die Zusammensetzung des Pb-Sn-Lotes bei der eutektischen Konzentration  $C_{eut}$  (61 wt-% Sn, vgl. Abb. 22), so geht unterhalb der Temperatur von 183°C das Lot direkt von der flüssigen in die feste Phase über (siehe: Phasendiagramm Kap.5.1). Die Lötstelle wird also mindestens auf diese Temperatur erhitzt. Dabei finden auch Diffusionsprozesse von Zinn in das Blei-Basismaterial statt.

In den Abb. 27 und Abb. 28 ist ein Querschliff durch eine Lötfläche im elektronenmikroskopischen Bild der Mikrosonde gezeigt. In Abb. 27 ist das Sekundärelektronenbild abgebildet, in Abb. 28 ist die Zinn-(Sn)-Elementverteilung im Lot an derselben Stelle dargestellt.

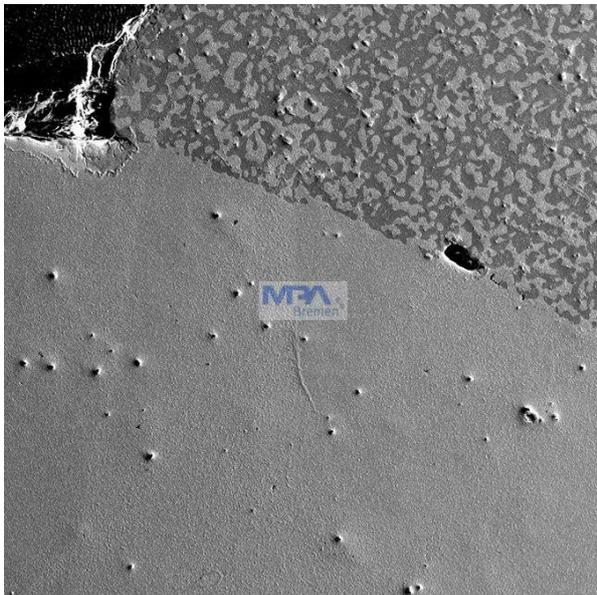


Abb. 27: RE-Abbildung einer Lötfläche im REM

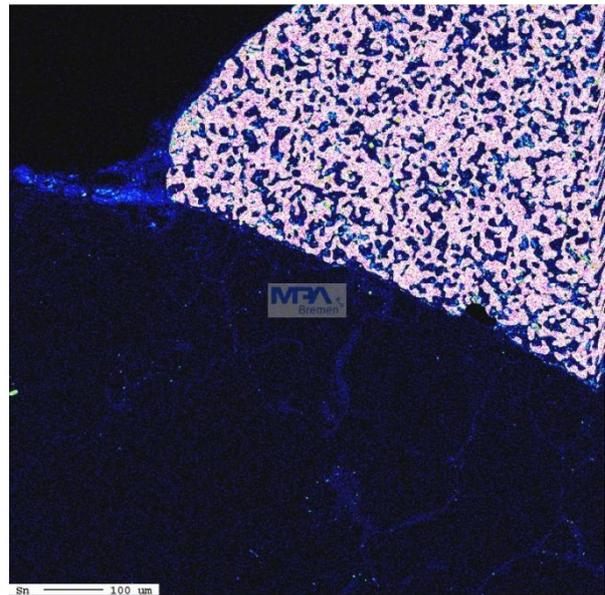


Abb. 28: Sn-Verteilung (vgl. Abb. 27)

In beiden Bildern erkennt man oben rechts das eutektische Gefüge des Lotes. In der unteren Hälfte der Bilder ist die Wärmeeinflusszone im Bleimaterial zu sehen. Man erkennt im Zinn-(Sn)-Verteilungsbild in Abb. 28, dass aus dem Lot deutliche Mengen an Zinn entlang der Korngrenzen in das Bleimaterial diffundiert sind. (siehe auch Kap. 5.2: Verteilung von Zinn und Antimon im Blei).

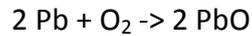
Fazit: Geht man davon aus, dass ein erhöhter Zinn-Gehalt den Korrosionswiderstand des Bleis erhöht, ist damit die Beobachtung erklärbar, warum entlang von Lötflächen das Bleimaterial deutlich weniger korrodiert.

## 6. Bleikorrosion

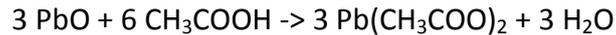
### 6.1. Chemismus

Um die chemischen Vorgänge bei der Korrosionsreaktion von Blei mit Essigsäure zu verstehen, muss man sich die Reaktionsprozesse vor Augen führen.

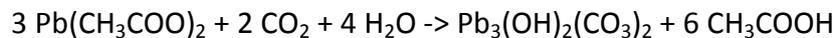
Reines Blei schützt sich zunächst durch die Bildung einer Oxidschicht an der Oberfläche:



Bei Einwirken von Essigsäure bildet sich dann Bleiacetat:



Bei dieser Reaktion entsteht der sogenannte Bleizucker, oder chemisch bezeichnet das Blei(II)-acetat. Dieses Reaktionsprodukt reagiert nun mit dem Kohlendioxid der Luft weiter.



Das Endprodukt ist das Bleihydroxycarbonat, oder besser bekannt als Bleiweiß.

Bei dieser chemischen Reaktion entsteht wieder Essigsäure, die damit in den Reaktionskreislauf zurückgeführt wird. Diesen Umstand nennt man einen autokatalytischen Prozess, d.h. es muss keine weitere Essigsäure zugeführt werden, um die Korrosion weiter ablaufen zu lassen.

Essigsäure wirkt hier als Katalysator, der die Reaktion in Gang setzt, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.

Fazit: Als Auslöser für die Korrosion an Bleipfeifen reicht bereits eine erhöhte Konzentration an Essigsäure ganz am Anfang. Für den weiteren Verlauf der Korrosion ist nur noch  $\text{CO}_2$  und Wasser notwendig.  $\text{CO}_2$  der Luft zu verringern ist kaum möglich, entscheidend für die Verhinderung von fortschreitender Korrosion ist die Verringerung von Feuchtigkeit im Windsystem.

### 6.2. Darstellung des Korrosionsverlaufs

Durch mikroskopische Untersuchungen im REM kann der in Kap. 6.1 beschriebene Reaktionsverlauf nachvollzogen werden. Dazu wurde eine Bleipfeife an einer von innen stark korrodierten Stelle durchgeschnitten und für die mikroskopische Untersuchung präpariert (Abb. 29).

An der Innenseite der Pfeife sieht man pustelartige Ablagerungen, die sich in das Material fressen, bis außen ein Loch zu sehen ist (Abb. 30). Durch so einen Korrosionspunkt wurde ein Querschliff präpariert und im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Durch die unterschiedliche Rückstreuung der Einzelmaterialien kann man die Korrosionsprodukte auf dem gesunden Blei (weiß, unten) gut erkennen (Abb. 31). Man sieht aber auch sehr gut die einzelnen Korrosionszyklen als unterschiedlich helle Streifen in dem Korrosionspaket. Das erinnert an die Jahresringe eines Baumes. Eine erste Abschätzung ergibt eine Anzahl von ca. 120 Korrosionswechseln. In höherer Vergrößerung des mit rotem



Abb. 29: Prospektpfeifen Zelle



Abb. 30: abgetrenntes Teilstück

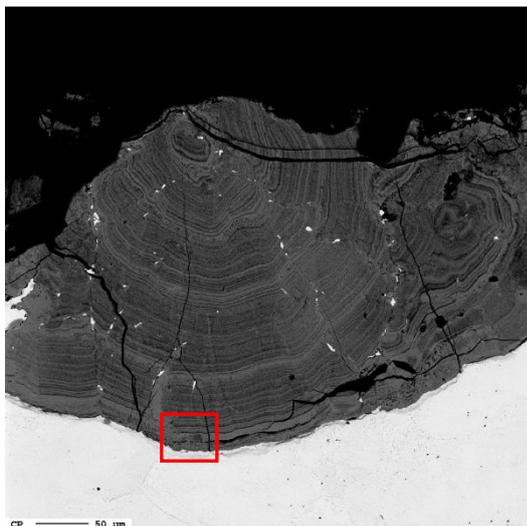


Abb. 31: REM-RE-Abbildung am Querschliff durch eine Korrosionspustel

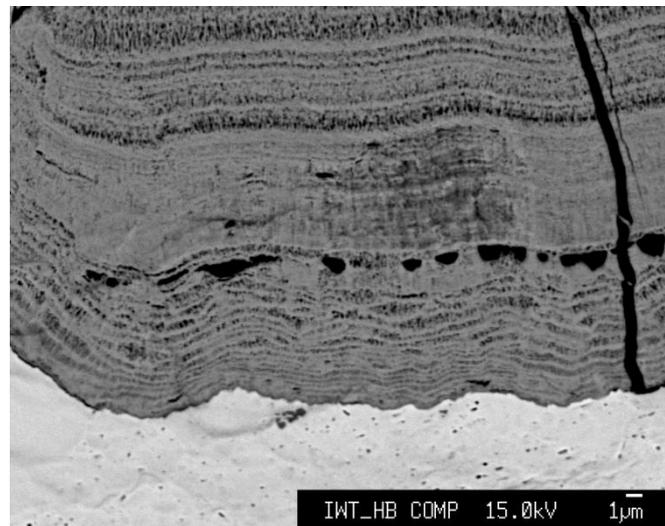


Abb. 32: Ausschnitt aus Abb. 31 (roter Rahmen)

Rahmen markierten Bereichs (Abb. 32) zeigt sich allerdings ein detaillierteres Bild. Man sieht eine noch weitaus größere Feinstruktur einzelner Korrosionswechsel. Gleichzeitig erkennt man einen sehr feinen Porenraum, in dem die entstehende Essigsäure gespeichert werden kann. Durch die Volumenvergrößerung während dieses Prozesses entstehen aus der Oberfläche wachsende Korrosionspusteln, die bei fortschreitender Korrosion zu einer festen Kruste zusammenwachsen und schließlich das gesamte Bleimaterial durchfressen.

Fazit: Die Korrosion von Orgelpfeifen ist kein kontinuierlicher Prozess, sondern wird durch Korrosionszyklen charakterisiert. Offensichtlich herrschen Bedingungen, die mal mehr, mal weniger die Korrosion voranschreiten lassen. Während dieser Korrosionszyklen entsteht ein Nanometer-feiner Porenraum, der zu einer starken Volumenvergrößerung der Korrosionsprodukte führt und Speicherraum für die immer wieder erzeugte Essigsäure schafft.

### 6.3. Messung der Korrosion

In einem 2012 abgeschlossenen EU-Projekt »MUSECORR - Protection of cultural heritage by real-time corrosion monitoring« (FP7/2007-2013, FKZ 226539) wurde das Korrosionsmessgerät „AirCorr“ entwickelt, das in Echtzeit die Auswirkung eventuell vorhandener korrosiver Gase aus der Umgebungsluft auf historische Objekte sehr empfindlich detektiert. Diese Sensoreinheiten sind zum Einsatz in musealen Ausstellungsvitrinen entwickelt worden und liefern Echtzeitdaten, die Aufschluss über in der Luft vorhandene korrosive Stoffe geben. Die Sensorgeräte wurden im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes von einem Konsortium von Vertretern aus Forschung, Museen und der Industrie entwickelt und zur kommerziellen Reife gebracht (Abb. 33).



Abb. 33: AirCorr-Sensor in einer Vitrine im Einsatz

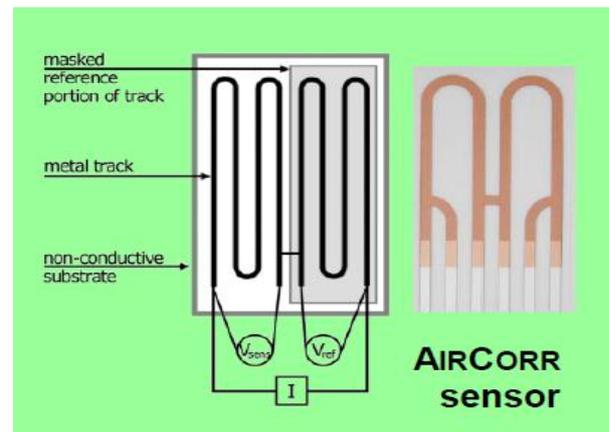


Abb. 34: Funktionsprinzip des Sensors

Das Messverfahren basiert auf dem Prinzip der Änderung des elektrischen Widerstands einer dünnen, auf einem Isolator aufgedampften Metallschicht. Die Änderung des elektrischen Widerstandes kann direkt in die Korrosionstiefe bzw. die Korrosionsgeschwindigkeit umgerechnet werden. Die Messdaten können über einen Auslesestift berührungslos über einige cm Entfernung ausgelesen werden.

Die Sensoren selbst bestehen aus zwei einzelnen Metallschleifen, wobei eine Schleife mit Lack geschützt ist und als Referenz für die der Atmosphäre ausgesetzte Schleife dient (Abb. 34). Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes wurden Sensoren aus Blei eingesetzt. Diese haben eine Dicke von 25  $\mu\text{m}$ , wobei eine Auflösung der ermittelten Korrosionstiefe von 5 nm angegeben ist.

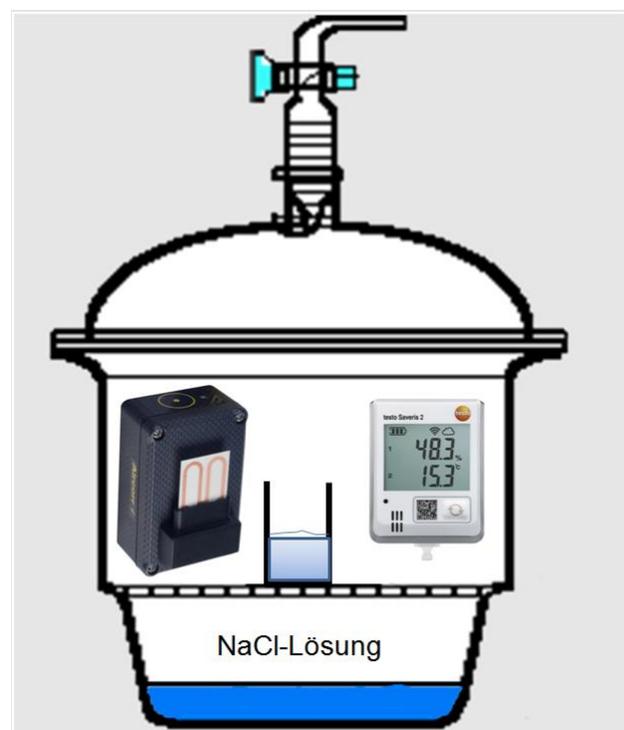


Abb. 35: Versuchsaufbau im Exsikkator zur Korrosionsmessung

Aus den Erkenntnissen der in Kap. 6.2 vorgestellten Ergebnisse zur Bleikorrosion ergab sich der Bedarf, die beobachteten Vorgänge, insbesondere der vermuteten Speicherung der als Katalysator wirkenden und immer wieder neu entstehenden Essigsäure, zu klären.

Das oben beschriebene Sensorsystem wurde in einem einfachen Versuch im Exsikkator eingesetzt (Abb. 35). Mit verschiedenen konzentrierten Salzlösungen können konstante relative Feuchtigkeiten in diesem geschlossenen System eingestellt werden. Die Luftfeuchtigkeit und -temperatur wird mit einem Testo-Sensor protokolliert und gleichzeitig der AirCorr-Sensor installiert.

Am Anfang des Experiments (Start am 05.02.2018) hat sich im Exsikkator über einer gesättigten NaCl-Lösung eine Luftfeuchtigkeit von 78% rF eingestellt. Die Lufttemperatur betrug 14°C, ähnlich einer Wintersituation in einer Kirche.

Wie dem Korrosionsverlauf in Abb. 36 zu entnehmen ist, konnte zunächst keinerlei Korrosionsfortschritt gemessen werden

Danach wurde in ein Gefäß mit 10 ml Wasser tropfenweise 40%ige Essigsäure hinzugegeben. Am 09.02.2018 ist dabei offensichtlich eine kritische Essigsäurekonzentration im Luftvolumen des Exsikkators erreicht worden, denn es begann eine starke Korrosion (56 µm/a).

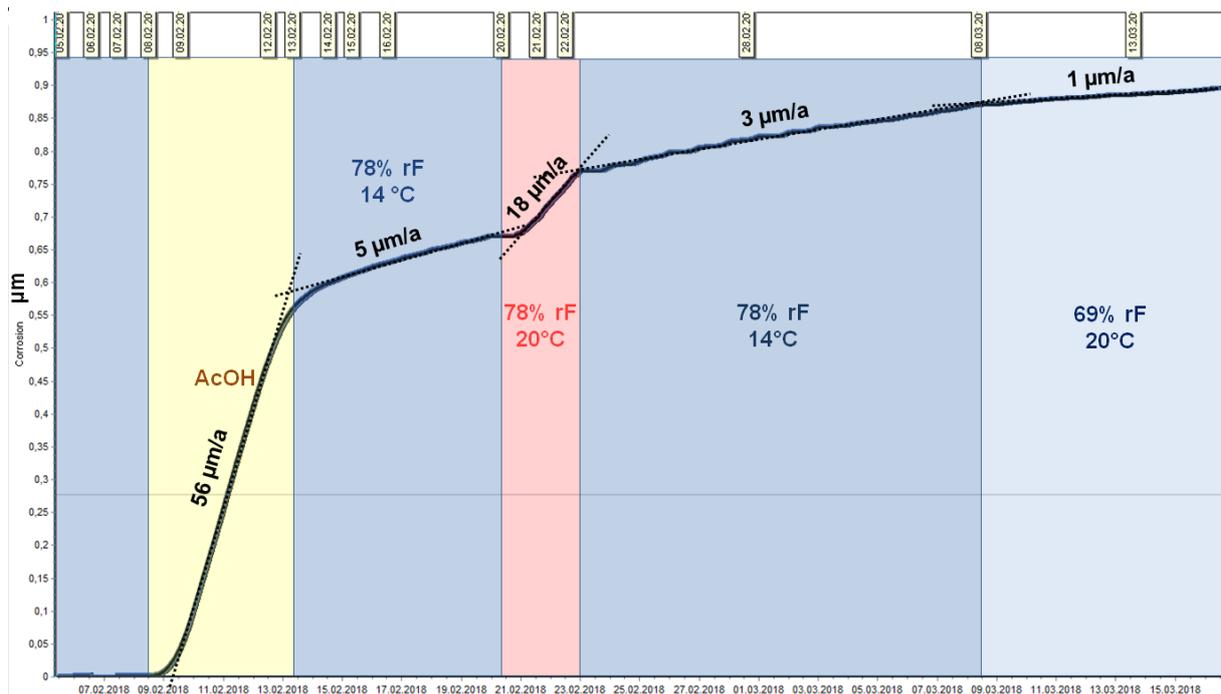


Abb. 36: Korrosionsmessung im Exsikkator mit Hilfe des AirCorr-Sensorsystems

Am 13.02.2018 wurde die Essigsäure-Quelle aus dem Exsikkator entfernt. Der AirCorr-Sensor zeigte eine deutliche Farbveränderung bedingt durch beginnende Korrosion. Obwohl die AcOH-Quelle nicht mehr vorhanden war, ging die Korrosion am Sensor weiter (5 µm/a). Das stützt die bisherige These, dass hier ein katalytischer Prozess in Gang gesetzt wurde, in dessen Verlauf immer wieder neue Essigsäure entsteht (vgl. Kap.6.1).

Anlässlich einer Projektsitzung am 20.02. wurde der Versuchsaufbau zur Demonstration in den wärmeren Seminarraum (20°) gestellt. Am Sensor zeigte sich ein erneuter Anstieg der

Korrosionsgeschwindigkeit (auf 18  $\mu\text{m/a}$ ), wobei die rel. Feuchtigkeit bedingt durch die gesättigte NaCl-Lösung im Exsikkator konstant bei 78% rF blieb.

Nach Rückstellen ins Labor (14°C) sank die Korrosionsgeschwindigkeit wieder auf 3  $\mu\text{m/a}$ . Am Schluss des Experiments wurde durch Verwendung einer gesättigten  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung (Magnesiumnitrat) im Exsikkator eine rel. Feuchtigkeit von unter 70% eingestellt. Es zeigte sich ein deutlicher Rückgang der Korrosionsgeschwindigkeit auf 1  $\mu\text{m/a}$ .

Fazit: Mit Hilfe des AirCorr-Sensors konnte in einem einfachen Experiment nachgewiesen werden, dass die Korrosion von Blei nach Entfernen der Essigsäurequelle in nennenswerter Geschwindigkeit weitergeht. Einflussfaktoren darauf sind die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit.

#### 6.4. Live-Messung in Belum

Das in Kap. 6.3 beschriebene AirCorr-Messsystem erscheint empfindlich genug, um Korrosionszyklen, die bei in Kap. 6.2 dargestellten Untersuchungen der Korrosionsprodukte beschrieben wurden, messtechnisch zu erfassen. Dazu bot sich die Orgel in Belum an, weil dort nachgewiesenermaßen eine sehr hohe Konzentration an Essigsäure in den Windladen gepaart mit sehr hoher Feuchtigkeit vorliegt. Der AirCorr-Sensor wurde über einige Wochen in der Windlade C platziert (Abb. 37). Die Messingzüge und -beschläge sind durch die hohe Essigsäurekonzentration stark korrodiert (Grünspan = Kupferacetat). Zusätzlich wurde ein Feuchte-/Temperaturesensor installiert, um gleichzeitig die Klimabedingungen zu erfassen.

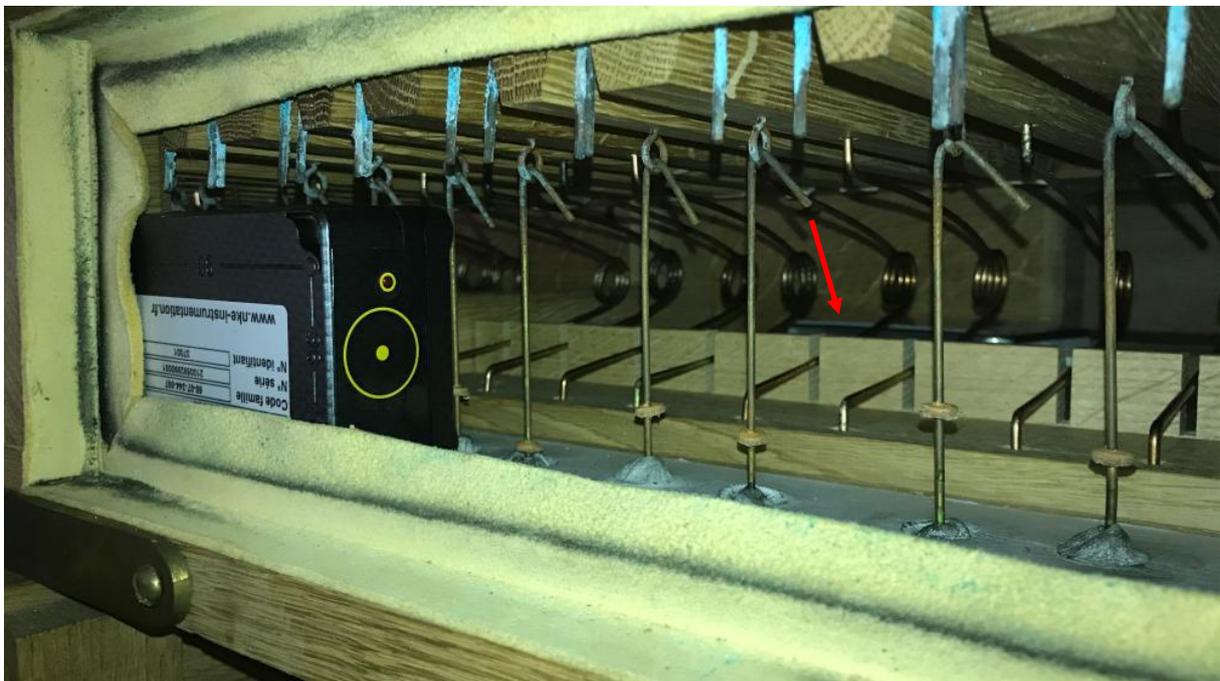


Abb. 37: Installation des AirCorr-Sensors in der Windlade C der Orgel in Belum. Gleichzeitig wurde ein Testo Temperatur-/Feuchtesensor in die Windlade gelegt (Pfeil)

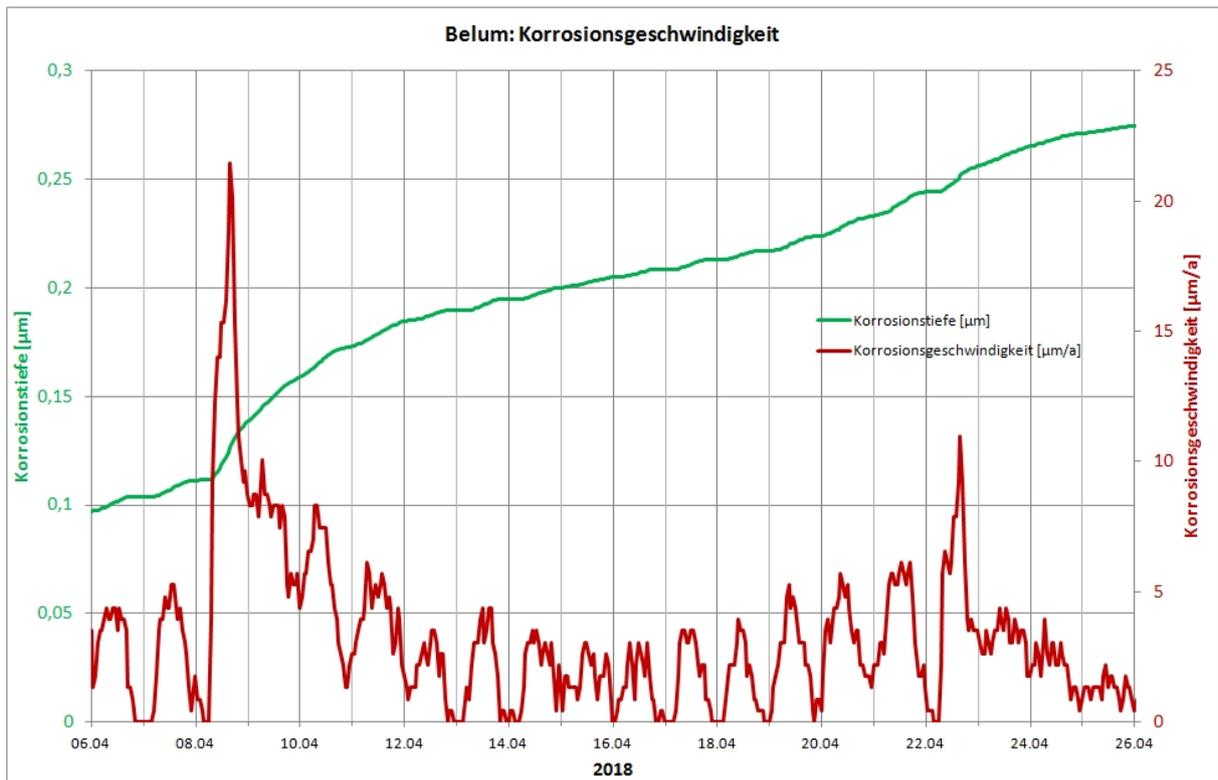


Abb. 38: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018  
 Die grüne Kurve stellt die Korrosionstiefe in  $\mu\text{m}$  dar. Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in der gleichen Zeit.

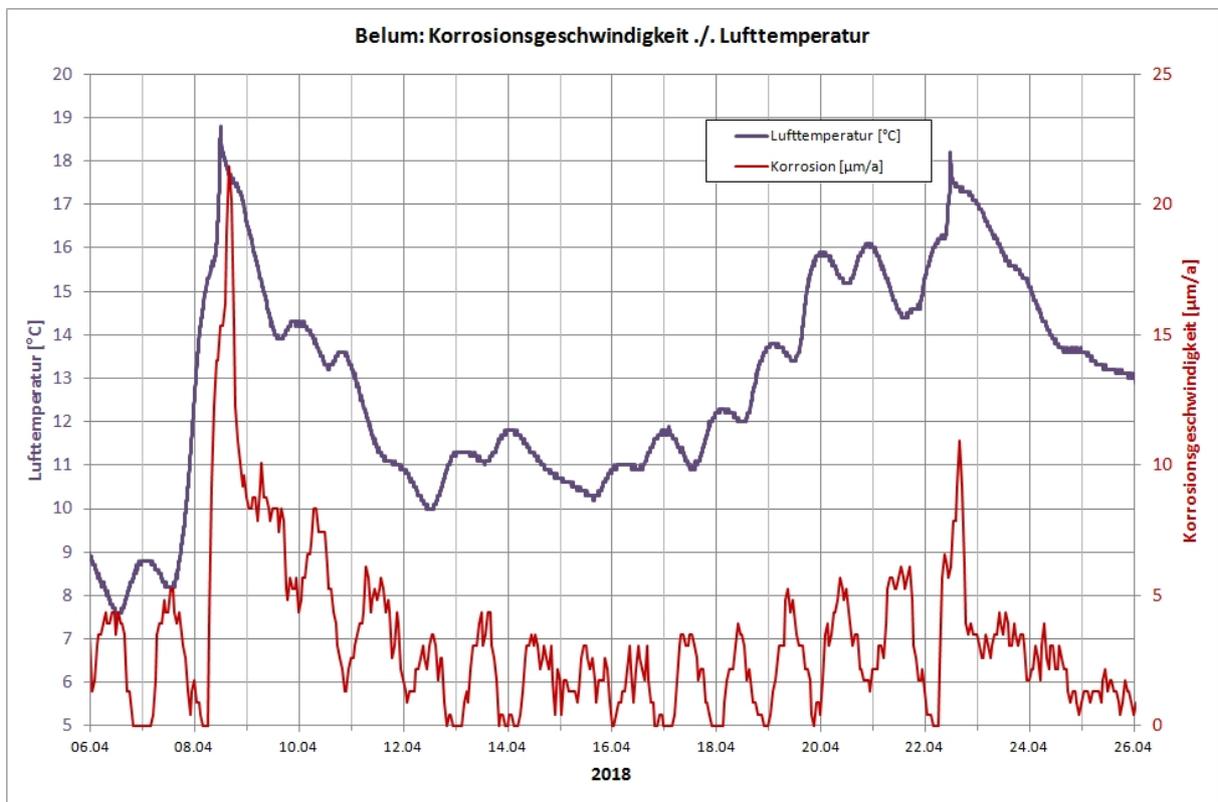


Abb. 39: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018  
 Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die gleichzeitige Lufttemperatur ist in lila dargestellt.

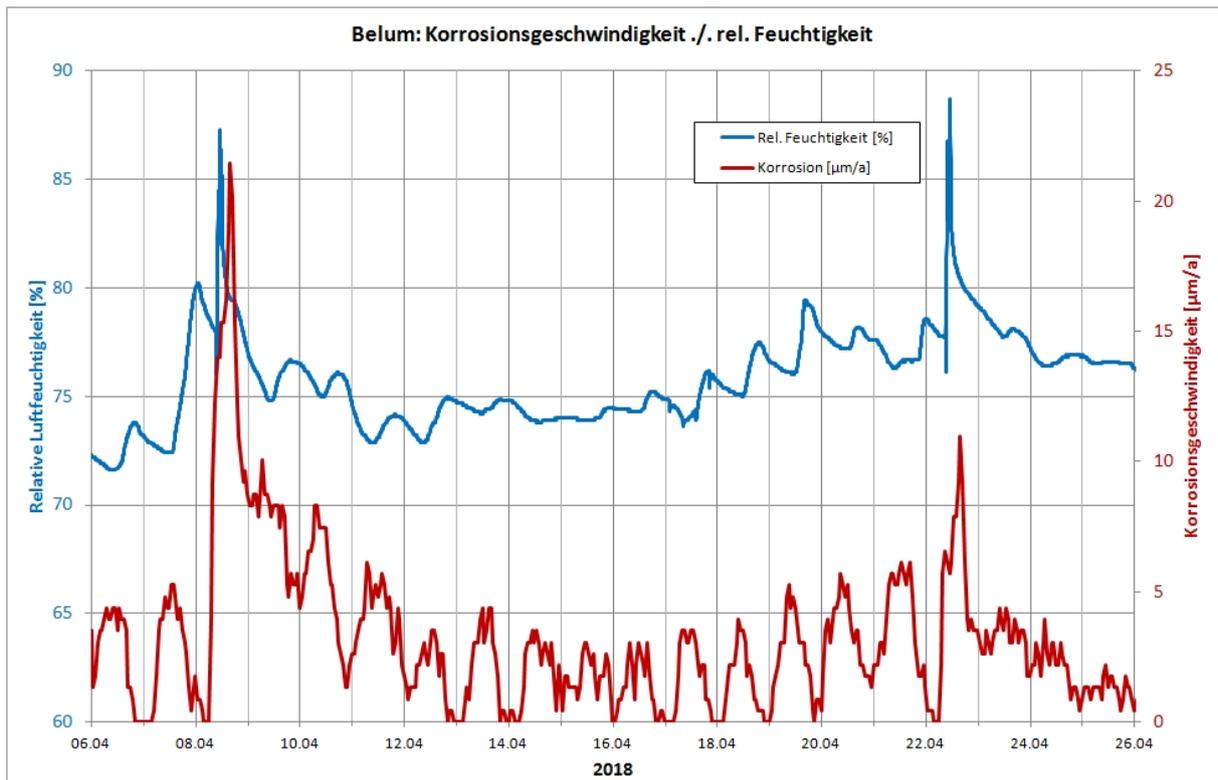


Abb. 40: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018  
Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die gleichzeitig gemessene relative Feuchtigkeit ist in blau dargestellt.

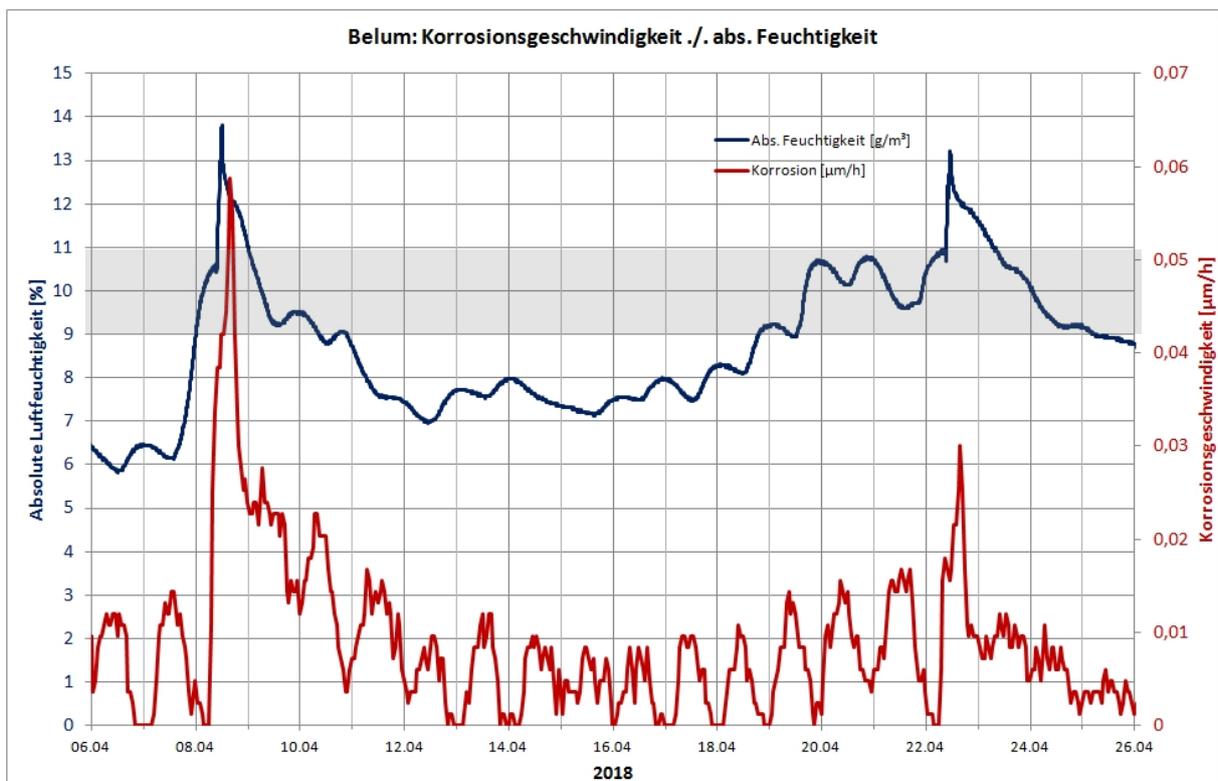


Abb. 41: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018  
Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die absolute Feuchtigkeit ist in blau dargestellt. Der grau unterlegte Bereich zwischen 9 - 11 g/m<sup>3</sup> markiert die kritischen Feuchtigkeiten, bei deren Überschreitung die Korrosion verstärkt abläuft.

In Abb. 38 ist der Verlauf der Messung im Zeitraum 06.-26.04.2018 gezeigt. Am 08.04. und am 22.04.2018 (jeweils ein Sonntag) wurde im Rahmen eines Gottesdienstes die Orgel gespielt. Man erkennt anhand der grünen Kurve, dass die gemessene Korrosionstiefe am Sensor zu diesen Zeitpunkten deutlich ansteigt. Die Steigung dieser Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit, die in Abb. 38 in rot eingezeichnet ist. Zu Beginn des Orgelspiels während des Gottesdienstes am 08.04.2018 steigt die Korrosionsgeschwindigkeit stark an und fällt nach dem Gottesdienst wieder ab.

In den folgenden Tagen stellt sich der normale Korrosionsverlauf ein, der durch Schwankungen zwischen Tag und Nacht geprägt ist. Am 24.04.2018 ist wieder ein Anstieg der Korrosionsgeschwindigkeit im Rahmen eines Gottesdienstes zu erkennen, der ebenfalls in den folgenden Tagen wieder abklingt.

In Abb. 39 bis Abb. 41 sind jeweils die rote Linie der Korrosionsgeschwindigkeit aus Abb. 38 übertragen und zusammen mit der Temperatur in der Windlade (Abb. 39), der relativen Feuchtigkeit (Abb. 40) und der absoluten Feuchtigkeit (Abb. 41) dargestellt. Es wird anhand dieser Darstellungen deutlich, dass mit der in der Windlade herrschenden absoluten Feuchtigkeit eine direkte Relation zu der Korrosionsgeschwindigkeit vorliegt. Ein Wert der absoluten Feuchtigkeit von über 9 - 11 g/m<sup>3</sup> Luft scheint die Korrosion zu begünstigen. Ein entsprechender Grenzbereich ist in Abb. 41 eingezeichnet.

Fazit: Es ist gelungen, einzelne Korrosionsereignisse in einer realen Situation messtechnisch nachzuweisen. Es kann eine beschleunigte Korrosion bei Überschreiten einer absoluten Feuchtigkeit von 9 - 11 g/m<sup>3</sup> festgestellt werden. Diese Situation liegt insbesondere in den Sommermonaten dauerhaft vor (vgl. Kap. 3.3).

## 7. Neuverwendung alter Pfeifen

Die wertvollsten Bauteile einer historischen Orgel sind die Pfeifen, die z.T. aus dem 16 Jhdt. stammen und aufgrund ihrer kulturhistorischen Bedeutung selbst bei Neubauten einer Orgel eine Wiederverwendung finden.

### 7.1. Reinigung der Pfeifen

Aus den Erkenntnissen zur Chemie der Bleikorrosion (Kap. 6) ist die Empfehlung abzuleiten, bei einer Restaurierung die Korrosionsprodukte auf der Innenseite der Pfeifenkörper komplett zu entfernen. Dadurch wird die in den Korrosionsprodukten gespeicherte Essigsäure eliminiert und die Gefahr von weiteren autokatalytischen Korrosionsprozessen minimiert.

Es gab aus dem Kreis der Orgelbauer Hinweise darauf, dass die Anwendung von Zitronensäure eine Lösung sein könnte. Daher wurden diesbezüglich Laborversuche durchgeführt, in denen Original-Pfeifenmaterial mit anhaftenden Korrosionsprodukten ohne weitere mechanische Reinigung mit verschiedenen Säuren behandelt.

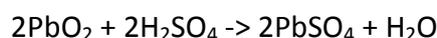
Erstaunlicherweise hat die Behandlung mit 10%iger Zitronensäure den größten Effekt gezeigt. Nach wenigen Tagen war ein Großteil der Ablagerungen (Bleicarbonat und -acetat) abgelöst und lag als Bodensatz im Behälter.

Nach dieser Behandlung konnten die korrodierten Oberflächen sehr leicht mechanisch gereinigt und von den mittlerweile weich gewordenen Korrosionsprodukten befreit werden.

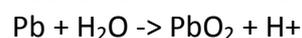
Fazit Zitronensäure kann zur Entfernung von Korrosionsprodukten von der Bleioberfläche benutzt werden. Der mechanische Reinigungsvorgang wird dadurch unterstützt, dass die Korrosionsprodukte sich leicht von der Bleioberfläche lösen lassen. Danach sollte die Zitronensäurebehandlung abgebrochen werden, das auch Zitronensäure die Bleioberfläche angreift.

### 7.2. Künstliche Passivierung von Blei

Blei wird von den meisten Säuren angegriffen, das gilt insbesondere für die Carboxylsäuren, zu denen auch die Essigsäure gehört. Gegen Schwefelsäure ist Blei aber sehr beständig, da auf der Bleioberfläche sofort eine schwer lösliche, sehr dichte Bleisulfatschicht gebildet wird. Bei den Bleibatterien macht man sich diesen Umstand zunutze, indem zwischen zwei in Schwefelsäure sitzenden Bleielektroden eine Spannung angelegt und damit eine anodische Passivierung und Entpassivierung der Bleioberfläche erzeugt wird [9]. Auf der kathodischen Seite dieses galvanischen Aufbaus entsteht Bleisulfat, während auf der anodischen Elektrode Bleioxid gebildet wird:



Eine ähnliche Reaktion erfahren auch die Bleielemente im Bauwesen. Eine reine Pb-Oberfläche bildet unter Einwirkung von Wasser eine sehr stabile Schutzschicht aus Bleioxid:



Aufgrund des in der Vergangenheit hohen Anteils an  $\text{SO}_2$  in der Außenluft („saurer Regen“) entstand in der Folge mit  $\text{PbSO}_4$  eine weitere Passivierungskomponente, die die Bleioberfläche noch mehr schützte.

Aus dieser Überlegung heraus entstand die Idee, auch die Bleipfeifen durch eine Schwefelsäurebehandlung und einer dabei entstehenden Bleisulfatschicht zu passivieren und damit vor dem Angriff von Essigsäure zu schützen.

Zum Nachweis dieses Effektes diente wieder ein einfaches Experiment mit dem Oddy-Test (siehe Kap. 4.1). Als Essigsäurequelle diente nun ein Stück Kammer getrockneter Eiche, die in dem Oddy-Holz-Test als besonders Essigsäure emittierendes Material ermittelt wurde (Abb. 21, unten rechts).

Der Versuchsaufbau war derselbe wie in Kap. 4.1 beschrieben. Dabei wurden drei Bleicoupons desselben Grundmaterials (99,9%) aber verschieden behandelt getestet:

Probe 1: ein Bleicoupon ohne weitere Behandlung, natürlich oxidiert

Probe 2: ein Bleicoupon (wie Probe 1) für 3 Tage in 10%ige Schwefelsäure getaucht

Probe 3: ein Bleicoupon, durch Abziehen von der Oxidschicht befreit, so dass eine metallische Oberfläche vorgelegen hat, und dann ebenfalls 3 Tage in 10%ige Schwefelsäure gelegt.

Alle drei Proben wurden drei Tage bei  $65^\circ\text{C}$  in einen Ofen ausgelagert. Das Ergebnis ist eindeutig (Abb. 42).

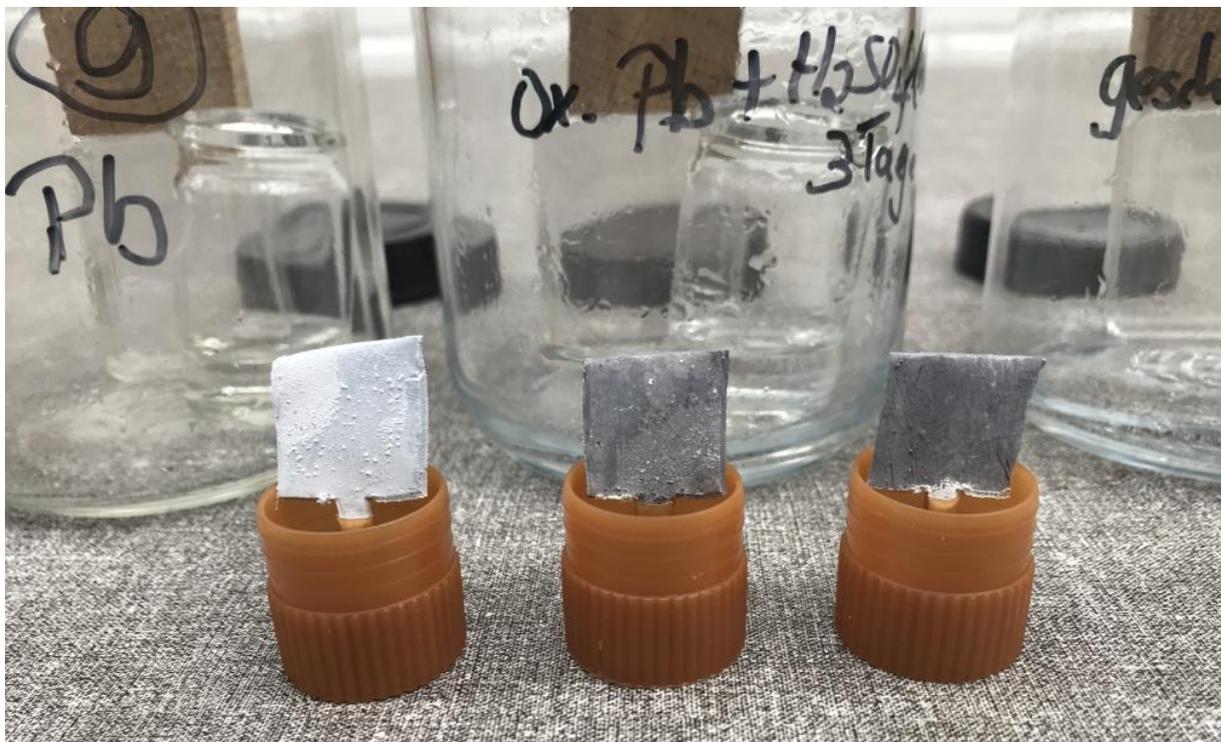


Abb. 42: Probe 1 (ganz links, unbehandelt): starke Bleiacetatbildung.

Probe 2 (Mitte, mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  behandelt): nur ganz geringe Veränderungen.

Probe 3 (rechts, abgezogen und mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  behandelt): nahezu unverändert.

Die unbehandelte Probe 1 zeigt starke Acetat-Bildung, erkennbar an dem weißen, pulverigen Belag. Die beiden mit Schwefelsäure behandelten Proben 2 und 3 zeigen dagegen keine oder nur sehr geringe Veränderungen an der Oberfläche.

Die Schwefelsäurebehandlung scheint also sehr effektiv gegen Essigsäureangriff zu schützen. Dieser Versuch stellt einen absoluten Stresstest für die Proben dar (hohe Luftfeuchte, hohe Temperatur, hohe Essigsäurekonzentration). Das sind Bedingungen, wie sie in der realen Orgelsituation bei Weitem nicht vorliegen.

Fazit: Nach der Reinigung der Bleioberfläche bewirkt die Behandlung mit Schwefelsäure die Bildung einer künstlichen Passivierung durch Bleisulfat. Dadurch wird der Angriff durch Essigsäure stark behindert. Auch neues Blei kann mit Essigsäure prophylaktisch geschützt werden.

## 8. Innenbeschichtung der Holzflächen

Auf der Suche nach Möglichkeiten, den Korrosionsangriff der Bleipfeifen durch geeignete Maßnahmen zu vermindern kommt auch die Behandlung des Holzes in Betracht. Eine Vorbehandlung des Holzes selbst durch Trocknungs- oder Wässerungsmaßnahmen in der Hoffnung, die Essigsäureemission zu verringern ist bislang nicht von eindeutigem Erfolg gekrönt worden. Daher wurde in dem Projekt die Idee verfolgt, die Holzoberflächen des Windsystems zu beschichten, um die Essigsäureemission zu behindern oder sogar eine Neutralisation der Essigsäure zu erreichen.

### 8.1. Neutralisation mit Kalk und Kreide

Es wurde mehrfach von den Orgelbauern berichtet, dass in der Vergangenheit die Innenflächen der hölzernen Windladen mit Kalk-Anstrichen versehen wurden. In Vorversuchen im vorherigen Pilotprojekt wurde nachgewiesen, dass Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) grundsätzlich in der Lage ist, Essigsäure zu neutralisieren. Um auszutesten, ob ein Kalk-Anstrich tatsächlich einen positiven Effekt zur Korrosionsvermeidung von Bleipfeifen möglich macht, wurden entsprechende Vorversuche durchgeführt. In Kap. 8.2 sind die Ergebnisse von Versuchen in den Werkstätten der Orgelbauer beschrieben, welche Bindemittel geeignet sind, um eine Kalk- bzw. Kreide-Beschichtung auf die Holzflächen der Windsystemelemente aufzutragen.

In einem weiteren Schritt wurden Probekanzellen hergestellt, deren Innenwände mit Kreide bzw. Kalk beschichtet wurden. Eine unbeschichtete Kanzelle wurde als Referenz mit einbezogen. Als Holzmaterial wurde kammergetrocknetes Eichenholz verwendet, von dem aus den Oddy-Testversuchen bekannt war, dass es sehr viel Essigsäure emittiert (Abb. 21, unten rechts).

Folgende Probekanzellen wurden für die Versuche verwendet:

Kanzelle 1: unbeschichtet

Kanzelle 2: beschichtet mit Kreide (Calciumcarbonat,  $\text{CaCO}_3$ )

Kanzelle 3: beschichtet mit Kalk (Calciumhydroxid,  $\text{Ca(OH)}_2$ )

In alle Kanzellen wurden während des Versuches eine mit Wasser gefüllte Schale, ein Feuchte-/Temperatursensor (HOBO), ein Bleicoupon (99,9% Pb) und das AirCorr-Messsystem eingebracht (Abb. 43).

Die gesamte Probenanordnung wurde anschließend in einen Klimaschrank mit konstanter Temperatur von  $30^\circ\text{C}$  und relativer Feuchtigkeit von 70% r.F gestellt. Bei der Messung in den einzelnen Kanzellen wurden jeweils frische Bleisensoren im AirCorr-Messsystem verwendet.

Diese Versuchsbedingungen bei hoher Temperatur, hoher Feuchtigkeit und hoher Essigsäurekonzentration in den Kanzellen sollten Extrembedingungen simulieren.

Die Messungen wurden in jeder Kanzelle drei Tage lang durchgeführt. In Abb. 44 sind gemessenen Korrosionstiefen am Sensor aufgetragen. Wie zu erwarten ist die Korrosion in der unbeschichteten Kanzelle (blaue Kurve) sehr stark und erreicht im Verlauf des ersten Tages eine Korrosionsgeschwindigkeit von  $550 \mu\text{m/a}$ .



Abb. 43: Versuchsaufbau einer Probekanzelle: Wasserschälchen, HOBO Feuchte-/Temperatursensor, ein Bleicoupon, AirCorr-Messsystem mit Bleisensor

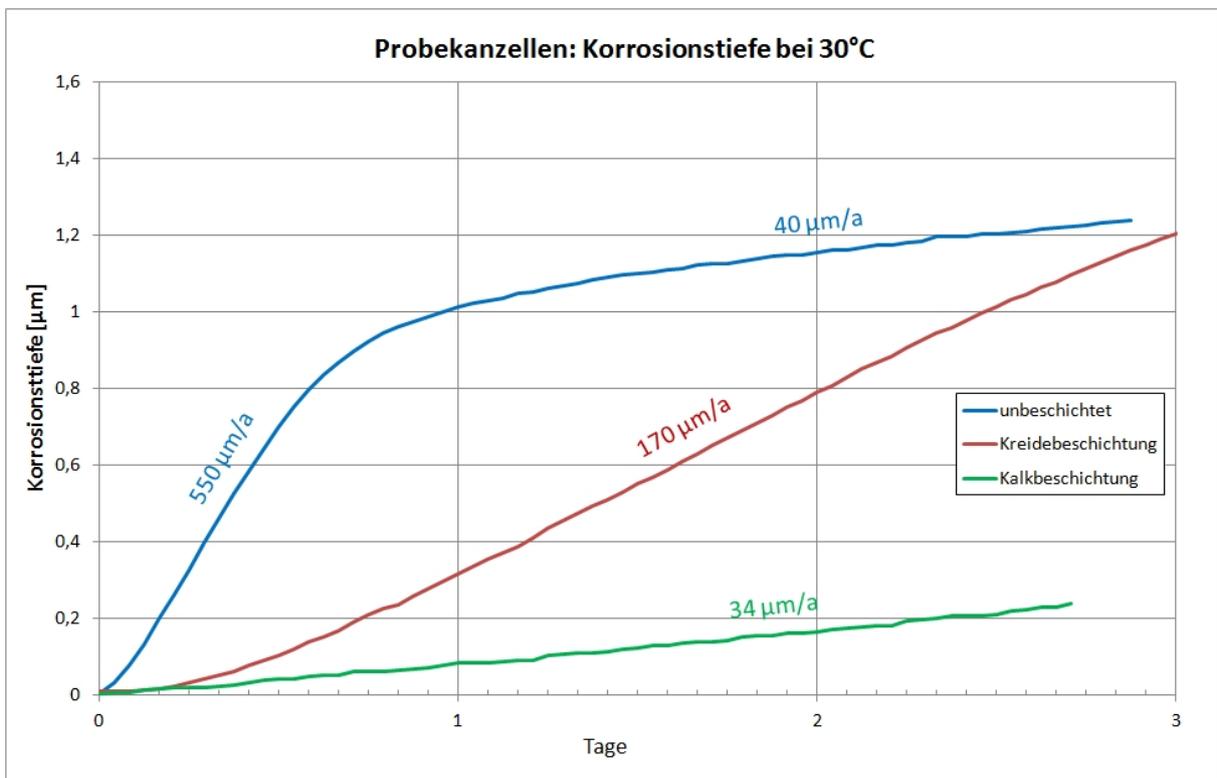


Abb. 44: Korrosionstiefe des Sensors in den drei Probekanzellen in den ersten drei Tagen  
 blau: unbeschichtet, rot: mit Kreide beschichtet, grün: mit Kalk beschichtet.

Ab dem zweiten Tag verringert sich die Korrosionsgeschwindigkeit, da sich offenbar auf der Sensoroberfläche eine dichte kompakte Korrosionsschicht gebildet hat, die die weitere Korrosion verlangsamt. In der mit Kreide beschichteten Probekanzelle (rote Kurve) ist der Korrosionsverlauf deutlich reduziert. Im Verlauf der ersten drei Tage wird eine Korrosionsgeschwindigkeit von  $170 \mu\text{m/a}$  gemessen. Auch hier tritt eine Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit nach weiteren Tagen auf. Das beste Ergebnis hinsichtlich der gemessenen Korrosion zeigt die mit Kalk beschichtete Probekanzelle. Es wird nur eine Korrosionsgeschwindigkeit von  $34 \mu\text{m/a}$  gemessen, was eine Reduzierung gegenüber der unbeschichteten Kanzelle um das 16fache bedeutet.

Eine Kalkbeschichtung scheint also als Schutz gegenüber Essigsäureangriff besonders effektiv zu sein.

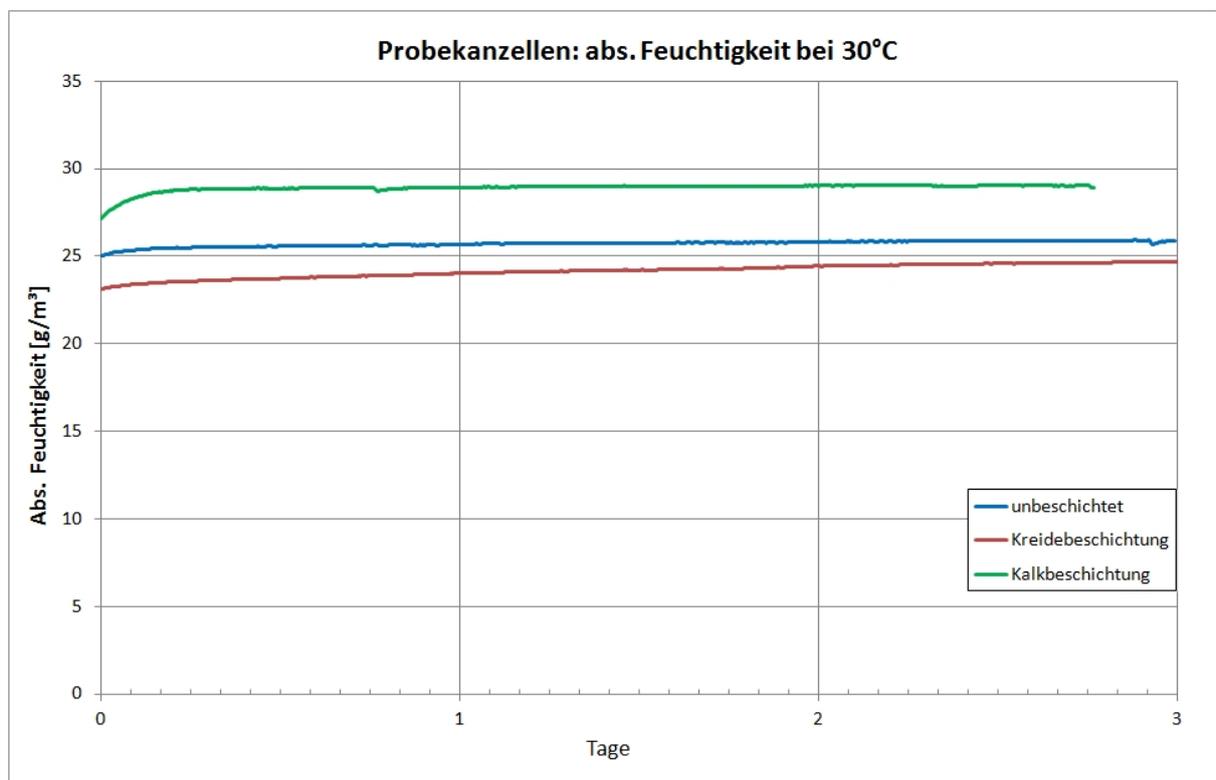


Abb. 45: Absolute Feuchtigkeiten in den Probekanzellen während der Korrosionsmessungen in Abb. 47. blau: unbeschichtet, rot: mit Kreide beschichtet, grün: mit Kalk beschichtet

Es lohnt aber auch noch ein Blick auf die absoluten Feuchtigkeiten während der Messungen. In Abb. 45 sind die Werte für die unbeschichtete Kanzelle wieder in blau, die der mit Kreide beschichteten in rot und die der mit Kalk beschichteten Kanzelle in grün gezeichnet. Der theoretische Wert der absoluten Feuchtigkeit bei 100% r.F und  $30^\circ\text{C}$  liegt bei  $30 \text{ g/m}^3$  Luft. In der mit Kalk beschichteten Kanzelle wird dieser Wert fast erreicht. Das bedeutet, dass zwischen dem Luftraum in der Kanzelle und den Wänden abgesehen von Absorptions- und Desorptionsprozessen der Oberfläche kein Feuchteaustausch stattfindet. Die absolute Feuchtigkeit in der unbeschichteten Kanzelle (blaue Kurve) stellt sich mit  $26 \text{ g/m}^3$  Luft deutlich niedriger ein, was auch zu erwarten war und auf Feuchtauf- bzw. -abnahme des Holzes zurückzuführen ist.

Unerwartet ist allerdings die absolute Feuchtigkeit der mit Kreide beschichteten Kanzelle. Sie liegt noch unterhalb der unbeschichteten Kanzelle. Offensichtlich laufen hier die Absorptions- bzw. Desorptionsprozesse der Kreideschicht noch intensiver ab, als beim unbeschichteten Holz.

Der phänomenologische Nachweis, dass sich die Korrosion in den drei Probekanzellen sehr unterschiedlich verhält, kann neben den reinen Messungen (Abb. 44) auch durch den Vergleich der gleichzeitig ausgelagerten Bleicoupons geführt werden. Während der Messungen wurden in allen Kanzellen auch frische Bleiprobe(n) (99,9%) ausgelagert (siehe Abb. 43). Nach den Korrosionsdurchläufen zeigt sich das in Abb. 46 gezeigte Bild. In der unbeschichteten Kanzelle war das Blei deutlich durch Bildung von Bleiacetat weiß verfärbt (Abb. 46, links). Der mittlere Coupon in Abb. 46 entstammt der mit Kreide beschichteten Kanzelle und zeigt nur unwesentlich geringere Korrosion. Das beste Ergebnis zeigt der Bleicoupon in der mit Kalk beschichteten Kanzelle (Abb. 46, rechts). Hier sind noch keine Korrosionsprodukte erkennbar.

Dieses rein optische Ergebnis bestätigt die Messungen der Korrosion durch den AirCorr-Sensor.



Abb. 46: Ergebnis der Auslagerung von Bleicoupon während der Korrosionsversuche  
links: unbeschichtete Kanzelle, mitte: mit Kreide beschichtet, rechts: mit Kalk beschichtet

Als Ergebnis dieser Versuche steht fest, dass die Beschichtung der Holzoberflächen mit Kalk ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) eine effektive Maßnahme gegen die Emission von Essigsäure aus dem Holz darstellt.

Eine mögliche Erklärung wäre allein die Tatsache, dass das Bindemittel die Holzoberfläche hinsichtlich der Dampfdiffusion so gut abdichtet, dass keine Schadstoffe in den Luftraum eintreten können. Dafür spricht die Tatsache, dass in der mit Kalk beschichteten Kanzelle die relative Feuchtigkeit fast bis auf die Wasserdampfsättigung angestiegen ist. Es finden also keine Absorption- bzw. Desorptionsprozesse mit der Oberfläche mehr statt. Dagegen spricht

allerdings, dass dieser Effekt auch bei der mit Kreide beschichteten Kanzelle hätte auftreten müssen, da dasselbe Bindemittel (Knochenleim) verwendet worden ist. Offensichtlich spielt auch die Neutralisation der Essigsäure durch die Kalkbeschichtung eine wesentliche Rolle. Vermutlich wird Calciumacetat gebildet, wobei Essigsäure verbraucht wird und nicht mehr zur Korrosion des Bleis zur Verfügung steht.

Fazit: Die Beschichtung der Holzinnenwände des Windsystems mit Calciumhydroxid (Kalk) bewirkt eine effektive Verminderung der Essigsäureemission aus dem verwendeten Holz.

## 8.2. Rezeptur eines traditionellen Bindemittels

Aus Experimenten im Rahmen des Vorläuferprojektes ist bekannt, dass Calciumhydroxid (gelöschter Kalk) und Calciumcarbonat (Kreide) Essigsäure gut neutralisieren [3]. Deswegen sind folgende Bindemittel für die Beschichtungen getestet worden:

1. Glutinleim (Hasenleim) - Kreide:
  - löst sich gut, leichte Verarbeitung
  - jedoch nicht geeignet zum Ausgießen von Stöcken und Kanzellen.
2. Glutinleim - Kalk:
  - löst sich mit Hasenleim mäßig gut und ist sehr dickflüssig, mit Hautleim sind die Eigenschaften jedoch wesentlich besser;
  - auf der Basis von Hautleim zum Anstreichen von Kanzellen geeignet.
3. Gummi Arabicum - Kalk:
  - löst sich schlecht, ist schlecht zu verarbeiten.
4. Gummi Arabicum - Kreide:
  - löst sich, leichte Verarbeitung.
5. Leinöl - Kalk:
  - löst sich sehr schlecht, dünnflüssig, praktisch nicht brauchbar.
6. Leinöl - Kreide:
  - löst sich gut, dünnflüssig
  - möglicherweise zum Ausgießen von Stöcken geeignet.



Abb. 47: Versuchsbehälter zum Test der Beschichtungen bei Essigsäure-Belastung

Da sich die Eigenschaften der Beschichtung durch chemische Veränderung nach dem Neutralisieren von Essigsäure verändern können, wurden Holzklötzchen mit diesen sechs Beschichtungen längere Zeit über konzentrierter Essigsäure gehängt. In einer Orgelwerkstatt geschah dies in einem geschlossenen Behälter (Abb. 47), in zwei anderen in einer offenen Aufstellung. Die Ergebnisse waren folgende:

1. Glutinleim (Hasenleim) - Kreide: die Beschichtung bleibt stabil
2. Glutinleim - Kalk:
  - auf der Basis von Hasenleim ist die Beschichtung aufgequollen
  - auf der Basis von Hautleim blieb die Beschichtung stabil
3. Gummi Arabicum - Kalk: das System erwies sich als nicht stabil
4. Gummi Arabicum - Kreide: die Beschichtung ist aufgequollen
5. Leinöl - Kalk: die Beschichtung löst sich vor allem bei sattem Auftrag ab
6. Leinöl - Kreide: die Beschichtung bleibt stabil ohne Veränderung

Grundsätzlich trat in geschlossenen Auslagerungsbehältern mehr oder weniger starke Schimmelbildung auf. Bei offener Lagerung blieb die Schimmelbildung aus.



Abb. 48: Holzstücke mit Kreide (obere Reihe) bzw. Kalk (unter Reihe) und verschiedenen Bindemitteln beschichtet und eine Woche in einem geschlossenen Behälter über Essigsäure gehängt  
links: Hautleim      mitte: Gummi Arabicum      rechts: Leinöl

Die schlechtere Stabilität der meisten Beschichtungen im geschlossenen Behälter scheint mit der wahrscheinlich höheren Luftfeuchtigkeit und der offenbar dadurch geförderten Schimmelbildung zusammenzuhängen. Während der Tests mit den Probekanzellen (Kap. 8.1) trat diese nicht auf. Unter den weniger extremen Bedingungen in den Windsystemen von Orgeln muss dieses Problem deshalb nicht überschätzt werden. Will man Schimmelbildung trotzdem vorbeugen, scheint dafür die Kombination Leinöl+Kreide am besten geeignet zu sein. Wie effektiv diese Beschichtung Essigsäure neutralisiert, muss jedoch noch getestet werden.

Fazit: Solange keine Schimmelbildung auftritt, sind die Kombinationen Hautleim+Kalk, Hautleim+Kreide und Leinöl+Kreide stabil genug für die praktische Anwendung. Mit letztgenannter Kombination scheint das Risiko von Schimmelbildung am geringsten zu sein.

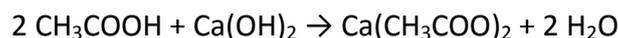
### 8.3. Kalkulation der Umsetzung von Essigsäure in Calciumacetat

Zur Berechnung der Menge Kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) oder Kreide ( $\text{CaCO}_3$ ), die man zur Neutralisierung der gesamten in einem Stück Eichenholz vorhandenen Essigsäure bräuchte, werden einige Grunddaten benötigt. Eichenholz dient hier als Beispiel für die Berechnung, weil die Menge Essigsäure in diesem Holz durchschnittlich am ungünstigsten ist. Bei anderen Hölzern ist man mit dieser Berechnung fast immer auf der sicheren Seite [13].

|  |  |
|--|--|
| Molare Masse von Essigsäure:                 | 60,05 g/Mol  |
| Molare Masse von Kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ): | 74,1 g/Mol   |
| Molare Masse von Kreide ( $\text{CaCO}_3$ ): | 100,09 g/Mol   |
| Menge Essigsäure in Eichenholz:              | ca. 2,5 Gew. %                                       |
| Dichte von Eichenholz:                       | Ø 0,75 g/cm <sup>3</sup> (max. 9 g/cm <sup>3</sup> ) |

Ein Mol bezeichnet eine Menge von ca.  $6 \cdot 10^{23}$  Molekülen und ist in jedem Stoff gleich. Die Berechnungen in Mol werden benötigt, um die Masse (in Gramm) an Kreide oder Kalk zu bestimmen, die der gleichen Anzahl Moleküle von einem Gramm Essigsäure entspricht.

Die Reaktionsgleichungen für die Neutralisierung von Essigsäure durch Kalk bzw. Kreide sind folgende:



und



Von beiden Substanzen reicht also ein halbes Mol zur Neutralisierung von einem Mol Essigsäure. Das bedeutet, dass zur Neutralisierung von 1 g Essigsäure folgende Mengen Kalk bzw. Kreide benötigt werden:

|         |   |
|---------|---|
| Kalk:   | $0,5 \cdot 74,1 / 60,05 = 0,62 \text{ g}$   |
| Kreide: | $0,5 \cdot 100,09 / 60,05 = 0,83 \text{ g}$ |

Die Menge Essigsäure in einem Holzbrett mit Länge und Breite von 10 cm und Stärke von 1 cm lässt sich folgendermaßen berechnen:

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Volumen                          | $= 10 \cdot 10 \cdot 1 = 100 \text{ cm}^3$            |
| Gewicht                          | $= 0,75 \cdot 100 = 75 \text{ g}$                     |
| Menge Essigsäure in diesem Brett | $= 2,5\% \text{ von } 75 \text{ g} = 1,875 \text{ g}$ |

Wenn man davon ausgeht, dass auf jeder Seite die Hälfte der gesamten Essigsäure emittiert wird, braucht man auf einer Seite eine Beschichtung, die folgende Menge Kalk bzw. Kreide enthält:

|         |   |
|---------|---|
| Kalk:   | $0,62 \cdot 1,875 / 2 = 0,58 \text{ g}$ |
| Kreide: | $0,83 \cdot 1,875 / 2 = 0,78 \text{ g}$ |

Die schmalen Ränder werden bei dieser Berechnung vernachlässigt. Daraus ergibt sich eine leichte Überschätzung der Emission aus den beiden größeren Flächen.

**Dies sind die Mengen, die man ohne Sicherheitsmarge pro dm<sup>2</sup> Oberfläche und cm Stärke zur Neutralisierung der gesamten Essigsäure bräuchte.**

Dass es sich hierbei um realistisch dünne Beschichtungen handelt, zeigt folgendes Beispiel:

Zur Beschichtung einer 45 mm dicken Schiede würden  $4,5 \cdot 0,58 = 2,61 \text{ g/dm}^2$  Kalk benötigt. Die Dichte von Kalk beträgt  $2,24 \text{ g/cm}^3$ . Die Dicke des Kalk-Anteils in der Beschichtung ist damit:

$$2,61 / (2,24 \cdot 100) = 0,012 \text{ cm} = 0,12 \text{ mm}$$

Selbst wenn der Träger etwa das doppelte Volumen hat, wäre eine Beschichtung noch immer nicht dicker als ca. 0,35 mm notwendig, um die gesamte theoretisch möglich Essigsäuremenge zu neutralisieren. Um dicke Beschichtungen zu vermeiden, ist bei neuen Windladen die Verwendung von Blindkzellen zu empfehlen.

Fazit: Es ist realistisch möglich, auf nicht zu dicken Holzteilen eine Beschichtung anzubringen, die alle im Laufe der Zeit vom Holz emittierte Essigsäure neutralisieren kann.

## 9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Wie aus vergangenen Untersuchungen und Projekten unstrittig bewiesen, ist der Auslöser der Korrosion von Orgelpfeifen aus reinem Blei Essigsäure, die entweder aus dem verwendeten Holz oder ungeeigneten Klebern emittiert wird. Essigsäure greift die Bleioberfläche an, indem Bleiacetat (sog. Bleizucker) gebildet wird, aus dem dann im weiteren Reaktionsverlauf Bleicarbonat entsteht, dem Korrosionsendprodukt. Dazu ist nur noch Wasser und CO<sub>2</sub> notwendig für die Korrosion ist hohe Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>. Für den Start dieses Korrosionsprozesses reicht vermutlich ein einmaliges Überschreiten einer kritischen Essigsäurekonzentration. Ein Zahlenwert konnte im Rahmen dieses Projektes noch nicht ermittelt werden, er wird aber wohl in der Größenordnung von einigen 100 ppb („parts per billion“) liegen. Es besteht die konkrete Gefahr, dass bereits Essigsäure emittierende Bauelemente in den Werkstätten (z.B. Intonierladen) diesen kritischen Grenzwert überschreiten. Daher ist zu empfehlen, auch solche Bauelemente mit Essigsäure freien Materialien herzustellen.

Die Korrosion der Pfeifen läuft in Zyklen ab, die bei ungünstigen klimatischen Bedingungen ablaufen. Entscheidend dafür ist die absolute Feuchtigkeit im Windsystem. Ein kritischer Richtwert kann nach den Messungen im Projekt mit 9-11 g/m<sup>3</sup> Luft angegeben werden. Wird dieser Wert überschritten, wird eine Korrosion erheblich begünstigt. Diese kritischen Bedingungen treten vornehmlich in den Sommermonaten auf. Es konnte nachgewiesen werden, dass selbst einzelne Orgelspielereignisse als korrosionsfördernd anzusehen sind.

Diesen kritischen Bedingungen kann aber sehr gut und effektiv mit einer geeigneten Lüftungsstrategie begegnet werden. Entscheidend für die Feuchteverhältnisse im Windsystem ist die über die Balganlage eingebrachte Feuchtigkeit aus dem Kirchenraum. Jede Kirche ist ein Individuum, so dass die Lüftungsstrategien individuell erarbeitet werden müssen. Generell stehen aber heute preiswerte technische Möglichkeiten zur Verfügung, angefangen von Ampelsystemen bis hin zu automatischen Stellmotoren zur Öffnung von Lüftungsfenstern. Entscheidend ist aber, dass für die Ermittlung von geeigneten Lüftungszeitpunkten die absolute Feuchtigkeit herangezogen wird, da nur mit ihr die tatsächliche wirksame Wassermenge temperaturunabhängig erfasst werden kann. Wenn die Außenluft eine geringere absolute Feuchtigkeit aufweist, sollte gelüftet werden. Er erscheint manchmal überraschend, wann derartige Verhältnisse vorliegen.

Aufgrund der Erfahrungen aus diesem Projekt genügen für eine gesicherte Beschreibung der Feuchtebedingen in einer Kirche wenige Messstellen: Ein Außensensor, im Kirchenraum selbst (auf der Kanzel oder dem Altar), im Windsystem hinter der Balganlage, in der Windlade.

In den alten Instrumenten hat sich über lange Zeit eine Materialfeuchte der Windkanalwände aus Holz eingestellt. Bei Betrieb der Balganlage mit Hilfe einen Elektromotors streicht warme (z.T. bis auf 30°C aufgeheizte) Luft in den Balg die Windkanäle. Auf dem Weg bis in die Windladen nimmt diese warme Luft Feuchtigkeit von den Wänden auf, kühlt sich aber bis zum Erreichen der Windladen wieder ab. Dadurch entstehen ungünstige Feuchteverhältnisse, die die Korrosion begünstigen. Gegenmaßnahmen könnten Dauerbelüftungen des Windsystems sein, um eine Trocknung die Windkanalwände zu erreichen. Dazu wird trockene Luft benötigt, die idealerweise noch vor dem Eintritt in den Motor zur Verfügung gestellt wird. Messungen der Windflüsse der im Projekt betrachteten Orgeln lassen solche Installationen aber erfolgversprechend erscheinen.

Bei der Wiederverwendung von alten, bereits korrodierten Pfeifen sollten die Korrosionsprodukte möglichst vollständig entfernt werden. Darin ist Essigsäure gespeichert, die auch bei emissionsfreien neuen Windsystemen wieder freigesetzt werden kann. Auch vor der Einlagerung von alten Pfeifen zur späteren Wiederverwendung sollten die Korrosionsprodukte vorher entfernt werden. Die Lagerung sollte zudem trocken erfolgen und im besten Fall sogar unter CO<sub>2</sub>-Ausschluss.

Eine Entfernung der Korrosionsprodukte kann sehr gut mit Zitronensäurebehandlung erfolgen. Damit werden bereits bei geringen Konzentrationen die Korrosionsprodukte aufgeweicht und abgelöst. Danach kann eine mechanische Reinigung leichter erfolgen. Zitronensäure ist aber nicht dazu geeignet, die eigentliche Bleioberfläche zu reinigen. Alle Säuren (insbesondere die Carboxylsäuren, zu denen auch die Zitronensäure gehört) greifen Blei an und zersetzen die Oberfläche mit Materialverlust.

Eine Ausnahme bildet Schwefelsäure, die auf der Bleioberfläche eine schützende Passivierungsschicht aus Bleisulfat bildet. Erste Experimente in diesem Projekt haben gezeigt, dass die Behandlung von Bleioberflächen (gereinigte oder neue) mit Schwefelsäure einen effektiven Schutz gegen Essigsäurekorrosion bilden kann.

Mit dem vereinfachten Oddy-Test ist den Orgelbauern ein Verfahren an die Hand gegeben, mit dem sehr schnell und empirisch die Qualität von Holzmaterial hinsichtlich seiner Essigsäureemission ermittelt werden kann. Dieser Test ist auch dazu geeignet, einfache Tests an verschiedenen Bleilegierungen oder Beschichtungsmaterialien durchzuführen.

Im Projekt konnte z.B. nachgewiesen werden, dass kammergetrocknetes Holz keine Verbesserung der Essigsäureemission zeigt.

Eine effektive Maßnahme zur Verminderung der Essigsäureemission ist die Beschichtung der Innenwände von Windkanälen und/oder Windladen mit Calciumhydroxid (Kalk). Es konnte eindeutig gemessen und bewiesen werden, dass damit die Emission von Essigsäure aus dem Holz um das 15 bis 20fache vermindert wird.

## **10. Projektkoordinierung**

### **10.1. Zusammensetzung des Fachbeirats**

Das Projekt wurde durch einen Fachbeirat folgender Zusammensetzung begleitet:

Prof. Dr. Karin Petersen (FH Hildesheim, Mikrobiologie)

Prof. Dr. Michael Steiger (Uni Hamburg, Chemie)

Winfried Dahlke (Orgelsachverständiger)

Carl-Johan Bergsten (GoArt Göteborg)

### **10.2. Projekttreffen**

Zu Beginn des Projektes fand am 21.10.2016 ein erstes Treffen (Kick-Off-Meeting) statt, auf dem der Projektverlauf noch einmal dargestellt und diskutiert wurde und erste Aufgabenverteilungen erfolgten. Auf einem zweiten Meeting am 21.03.2016 wurden in Anwesenheit des Fachbeirats die ersten Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Am 25.09.2017 fand das dritte, am 20.02.2018 das vierte Projekttreffen und am 11.10.2018 ein letztes Treffen jeweils in Bremen statt.

## **11. Öffentlichkeitsarbeit**

### **11.1. Orgelbauer-Workshop**

Im Laufe der Diskussion auf der 4. Internationalen Tagung mit den dortigen Teilnehmern am 20.02.2017 wurde der Wunsch geäußert, in regelmäßigen Abständen einen Workshop zu veranstalten, in dem nicht die Präsentation von Vorträgen im Vordergrund steht, sondern diese Veranstaltung als Plattform für fachliche Diskussionen und Erfahrungsaustausch genutzt werden kann.

Eine erste Veranstaltung dieser Art wurde am 26.09.2017 in Bremen durchgeführt. Dazu wurden Orgelbauer und Sachverständige eingeladen, soweit sie aus den Teilnehmerlisten der bisherigen Orgeltagungen hervorgingen. Zusätzlich wurden alle Mitglieder des Bundes deutscher Orgelbauer (BDO) und der Vereinigung der Orgelsachverständigen Deutschlands (VOD) eingeladen.

Der Zuspruch war erfreulich hoch, so dass 28 Teilnehmer aus ganz Deutschland und den Niederlanden begrüßt werden konnten.

Die Projektleitung hat Ergebnisse in Impulsbeiträgen vorgetragen, worauf sich rege Diskussionen ergaben. Die Veranstaltung konnte in angenehmer Atmosphäre (schließlich handelt es sich hier um Konkurrenten, die um denselben Kundenkreis buhlen) durchgeführt werden und fand ein durchweg positives Echo.

## **11.2. Veröffentlichungen / Vorträge / Tagungen**

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse wurden auf der 4. und 5. Internationalen Orgeltagung am 20.02.2017 in Grasberg und am 19.02.2018 in Hamburg-Neuenfelde vorgestellt.

Auf der Abschlusstagung „Schimmel an Orgeln in Mitteldeutschland“ am 21.11.2017 in Erfurt wurden die bisherigen Ergebnisse dieses Projektes ebenfalls vorgestellt und diskutiert.

Die Abschlusstagung dieses Projektes fand am 29.11.2018 in Grasberg statt. Dazu waren 51 Orgelbauer, Orgelrevisoren und weitere Interessierte gekommen. Die Ergebnisse wurden in Form eines gedruckten Handbuchs für „Maßnahmen zur Verminderung von Bleikorrosion an Orgelpfeifen“ an die Teilnehmern verteilt.

## **11.3. Internetforum Orgelkorrosion**

Am Ende des Orgelbauer-Workshops wurde ein Internet-Forum eröffnet, in dem der Erfahrungsaustausch und die Wissensvermittlung aus dem Projekt weitergeführt werden soll:

<http://www.mpa-bremen.de/forum>

In diesem Forum sind die Ergebnisse aus diesem Projekt veröffentlicht und zur Diskussion gestellt. Nach Registrierung erfolgt die Zugangsfreischaltung durch die Projektleitung.

## Literaturverzeichnis

- [1] „The COLLAPSE Project - Corrosion of organ pipes - causes and recommendations, Cultural Heritage Research Report No. 20,“ European Union, University of Gothenborg, 2011.
- [2] „Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln. Abschlussbericht,“ Fraunhofer IRB Verlag, 2018, ISBN 978-3-7388-0228-3, <https://www.baufachinformation.de/literatur/18099005420>.
- [3] „Korrosionsprobleme an historischen Orgel-instrumenten der Metropolregion Nordwest. Abschlussbericht,“ HfK Bremen, IFAM Bremen, MPA Bremen, 2016, [http://www.mpa-bremen.de/www/fileadmin/user\\_upload/Abschlussberichte/Abschlussbericht\\_Orgelprojekt\\_Metropolregion\\_final\\_2016-04-18.pdf](http://www.mpa-bremen.de/www/fileadmin/user_upload/Abschlussberichte/Abschlussbericht_Orgelprojekt_Metropolregion_final_2016-04-18.pdf).
- [4] J. Tétreault, J. Sirois und E. Stamatopoulou, „Study of Lead Corrosion in Acetic Acid Environment,“ *Studies in Conservation*, Bd. 42, pp. 17- 32, 1998.
- [5] J. Tétreault, „Museum Standard Levels for Indoor Pollutants,“ *Indoor Air Pollution: Detection and Mitigation of Carbonyls*, pp. 15-17, 1998.
- [6] J. Tétreault, „La mesure de l'acidité des produits volatils,“ *Journal of IIC-CG*, Bd. 17, pp. 17-25, 1992.
- [7] W. Oddy, „An unsuspected danger in display,“ *Museums Journal*, p. 27–28, 1973.
- [8] W. Oddy, „The Corrosion of Metals on Display in Conservation in Archaeology and the Applied Arts,“ *Preprints of the Contributions to the Stockholm Congress, Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC) (Ed.)*, p. 235–237, 1975.
- [9] W. Feitknecht, „Anodische Passivierung und Entpassivierung von Blei in Schwefelsäure,“ *Zeitschrift für Elektrochemie*, Bd. 62, Nr. 6/7, pp. 795-803, 1958.
- [10] M. Risholm-Sundman, M. Lundgren, E. Vestin und P. Herder, „Holz als Roh- und Werkstoff,“ pp. 125-129, 56, 1998.
- [11] Adlung, *Musica Mechanica Organoedi*, 1768, p. 57.
- [12] BE, „Corrosion of Metals by Wood,“ pp. 1-17.
- [13] J. Hess, „Zitronensäurebad für Zungenregister,“ *ISO Journal*, Nr. 59, pp. 71-73, 2018.
- [14] G. R. et.al, „Nanoparticles of calcium hydroxide for wood deacidification: Decreasing,“ *Journal of Cultural Heritage*, pp. 206-213, 2009 (10).
- [15] H. Kawinski und H. Kutzke, „Korrosion im Innern von Orgelpfeifen aus Blei,“ *Restauro*, pp. 194-199, 3, 2000.

## Abbildungen

|  |    |
|--|----|
| Abb. 1: Zusammenhang zwischen rel. Feuchtigkeit, absoluter Feuchtigkeit und Temperatur in einem geschlossenen System (Exsikkator).....   | 9  |
| Abb. 2: Raumklima im Orgelgehäuse in Marienhafe (Dez. 2016 – Aug. 2017).....   | 11 |
| Abb. 3: Klima im Windkasten der Orgel in Marienhafe (Dez. 2016 – Aug. 2017).....   | 11 |
| Abb. 4: Ausblühungen von Salzen auf den Fugen des Fußbodens der Kirche St. Vitus in Belum. Aufgrund der Austrocknung des Untergrundes blühen leicht lösliche Salze auf den porösen Fugen aus. ....                     | 12 |
| Abb. 5: Lüftungsfenster im Altarbereich an der Süd- (link) und Nord-Seite (rechts) .....   | 13 |
| Abb. 6: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit in der Belumer Kirche (gemessen auf der Kanzel, lila Kurve) und im Außenbereich (grüne Kurve). ....   | 13 |
| Abb. 7: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit außerhalb und innerhalb der Kirche Belum in den Monaten Februar bis April 2014 .....  | 14 |
| Abb. 8: Vergleich der absoluten Feuchtigkeit außerhalb und innerhalb der Kirche Belum in den Monaten Juni bis August 2014.....   | 14 |
| Abb. 9: Messung der absoluten Feuchtigkeit im Marienhafe außerhalb der Kirche, im Kirchenraum und in der Windlade während einer extremen Witterungssituation im Juni 2017 .....  | 15 |
| Abb. 10: Klimamessung auf der Kanzel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2013) .....   | 17 |
| Abb. 11: Klimamessung in der Motorbox der Orgel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2013).....   | 18 |
| Abb. 12: Klimamessung in der Windlade der Orgel in Belum während eines Wochenendes mit Gottesdienst und Orgelspiel (01.-04.11.2015).....   | 18 |
| Abb. 13: geöffnete Wartungsklappe vor dem Trocknungsversuch mit trockenem Silicagel .....  | 20 |
| Abb. 14: geöffnete Wartungsklappe nach sechs Wochen. Das feuchte Silicagel hat die blaue Farbe verloren.....   | 20 |
| Abb. 15: Klimamessung während des Trocknungsversuchs in Belum.....   | 20 |
| Abb. 16: Zeit, nach der der komplett gefüllte Balg vollständig entleert ist.....   | 21 |
| Abb. 17: Gesamtverbrauch beim Orgelspiel und als Blindverbrauch der Orgeln in l/min .....  | 22 |
| Abb. 18: Nettoverbrauch der gespielten Pfeifen unter Berücksichtigung des Blindverbrauchs in l/min.....  | 22 |
| Abb. 19: Windgeschwindigkeiten beim Orgelspiel in m/sec .....  | 23 |
| Abb. 20: Aufbau des Oddy-Testes Schraubglas, ein Glas mit Wasser, ein Stück zu untersuchendes Holz, ein Bleicoupon. Alle Teile werden in das Schraubglas gegeben (rechts) und in einen Ofen bei 65°C ausgelagert. .... | 25 |
| Abb. 21: Bleicoupon (99,9%) 3 Tage bei 65°C ausgelagert mit verschiedenen Holzproben: oben links: Nullprobe .....  | 26 |
| Abb. 22: Phasendiagramm des Systems Pb-Sn (Quelle: <a href="https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/m...5_4_3.html">https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/m...5_4_3.html</a> ) .....                                   | 27 |
| Abb. 23: Rückstreuielektronen-Abbildung (RE) der Analysefläche .....   | 29 |
| Abb. 24: Blei (Pb)-Verteilung (vgl. Abb. 23) .....   | 29 |
| Abb. 25: Zinn (Sn)-Verteilung (vgl. Abb. 23) .....   | 29 |
| Abb. 26: Antimon (Sb)-Verteilung (vgl. Abb. 23) .....  | 29 |
| Abb. 27: RE-Abbildung einer Lötnaht im REM .....   | 30 |
| Abb. 28: Sn-Verteilung (vgl. Abb. 27).....   | 30 |
| Abb. 29: Prospektpfeifen Zelle .....   | 32 |
| Abb. 30: abgetrenntes Teilstück .....  | 32 |
| Abb. 31: REM-RE-Abbildung am Querschliff durch eine Korrosionspustel .....   | 32 |
| Abb. 32: Ausschnitt aus Abb. 31 (roter Rahmen) .....   | 32 |
| Abb. 33: AirCorr-Sensor in einer Vitrine im Einsatz.....   | 33 |
| Abb. 34: Funktionsprinzip des Sensors .....  | 33 |

|   |    |
|---|----|
| Abb. 35: Versuchsaufbau im Exsikkator zur Korrosionsmessung .....   | 33 |
| Abb. 36: Korrosionsmessung im Exsikkator mit Hilfe des AirCorr-Sensorsystems .....  | 34 |
| Abb. 37: Installation des AirCorr-Sensors in der Windlade C der Orgel in Belum. Gleichzeitig wurde ein Testo Temperatur-/Feuchtesensor in die Windlade gelegt (Pfeil) .....   | 35 |
| Abb. 38: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018<br>Die grüne Kurve stellt die Korrosionstiefe in $\mu\text{m}$ dar. Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in der gleichen Zeit. ....   | 36 |
| Abb. 39: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018<br>Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die gleichzeitige Lufttemperatur ist in lila dargestellt. ....  | 36 |
| Abb. 40: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018<br>Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die gleichzeitig gemessene relative Feuchtigkeit ist in blau dargestellt.....   | 37 |
| Abb. 41: Korrosionsmessung in der Windlade C der Orgel in Belum in der Zeit vom 06.-26.04.2018<br>Die rote Kurve beschreibt die Korrosionsgeschwindigkeit in dieser Zeit, die absolute Feuchtigkeit ist in blau dargestellt. Der grau unterlegte Bereich zwischen $9 - 11 \text{ g/m}^3$ markiert die kritischen Feuchtigkeiten, bei deren Überschreitung die Korrosion verstärkt abläuft. .... | 37 |
| Abb. 42: Probe 1 (ganz links, unbehandelt): starke Bleiacetatbildung. Probe 2 (Mitte, mit $\text{H}_2\text{SO}_4$ behandelt): nur ganz geringe Veränderungen. Probe 3 (rechts, abgezogen und mit $\text{H}_2\text{SO}_4$ behandelt): nahezu unverändert. ....   | 40 |
| Abb. 43: Versuchsaufbau einer Probekanzelle: Wasserschälchen, HOB0 Feuchte-/Temperatursensor, ein Bleicoupon, AirCorr-Messsystem mit Bleisensor .....   | 43 |
| Abb. 44: Korrosionstiefe des Sensors in den drei Probekanzellen in den ersten drei Tagen blau: unbeschichtet, rot: mit Kreide beschichtet, grün: mit Kalk beschichtet. ....   | 43 |
| Abb. 45: Absolute Feuchtigkeiten in den Probekanzellen während der Korrosionsmessungen in Abb. 47. blau: unbeschichtet, rot: mit Kreide beschichtet, grün: mit Kalk beschichtet .....   | 44 |
| Abb. 46: Ergebnis der Auslagerung von Bleicoupon während der Korrosionsversuche links: unbeschichtete Kanzelle, mitte: mit Kreide beschichtet, rechts: mit Kalk beschichtet.....  | 45 |
| Abb. 47: Versuchsbehälter zum Test der Beschichtungen bei Essigsäure-Belastung .....  | 47 |
| Abb. 48: Holzstücke mit Kreide (obere Reihe) bzw. Kalk (unter Reihe) und verschiedenen Bindemitteln beschichtet und eine Woche in einem geschlossenen Behälter über Essigsäure gehängt links: Hautleimmitte: Gummi Arabicum rechts: Leinöl.....   | 48 |