

Korrosionsprobleme an historischen Orgel- instrumenten der Metropolregion Nordwest

Pilotprojekt zur Erforschung der Ursachen und Entwicklung möglicher Schutzmaßnahmen

Gefördert von der

Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V.

Laufzeit: 1. Oktober 2013 -30. Juni 2015

Bearbeitung:

Prof. Dr. Manfred Cordes Hochschule für Künste, Bremen

Dr. Herbert Juling MPA Bremen

Dr. Andrea Berg Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte
Materialforschung, Bremen

Dr. Peter Plagemann Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte
Materialforschung, Bremen



Bremen, Dezember 2015

1. Einleitung

Das „Arp-Schnitger-Institut für Orgel und Orgelbau“ an der Hochschule für Künste (HfK) Bremen beschäftigt sich derzeit mit der technischen Dokumentation der wichtigsten Instrumente Arp Schnitgers und seines Umfeldes. Das geschieht auch als flankierende Maßnahme zur Vorbereitung der Antragstellung zur Anerkennung der Schnitger-Orgeln als Weltkulturerbe.

Im Zuge verschiedener Dokumentationsprojekte und im Zusammenhang mit der Vermessung des Pfeifenmaterials wurden an einigen Instrumenten substanzielle und beängstigende Schäden an historischen, z.T. über 400 Jahre alten Bleipfeifen („Bleifraß“) festgestellt, die um den Bestand dieses für die norddeutsche Region so bedeutenden kulturellen Erbes fürchten lassen. Bis heute ist die genaue Zahl der betroffenen Instrumente noch nicht genau bekannt, es ist aber mit einer hohen Dunkelziffer zu rechnen.

Da die Ursache und die einzelnen Faktoren für diese bedrohliche Entwicklung und deren Zusammenwirken nicht bekannt sind, muss damit gerechnet werden, dass auch Instrumente, die im Moment noch keine nach außen sichtbaren Schäden aufweisen, jederzeit befallen und die Pfeifen quasi von innen „zerfressen“ werden können.

Unter diesem Eindruck wurden im Rahmen des von der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V. geförderten Forschungsprojektes umfangreiche materialwissenschaftliche Untersuchungen an Orgeln zur Ursachenermittlung durchgeführt. Die Zielsetzung der Untersuchungen war, die möglichen Ursachen der Korrosionserscheinungen genauer einzugrenzen und die wesentlichen beeinflussenden Faktoren zu identifizieren. Damit soll eine Basis geschaffen werden, um mögliche Maßnahmen zur Abhilfe ableiten zu können. Das Projekt konnte auf umfangreiche Untersuchungen im Rahmen eines EU-Projektes COLLAPSE zurückgreifen, in dem erste Erfahrungen zur Korrosion von bleihaltigen Orgelpfeifen gesammelt werden konnten. Ein wesentliches Ergebnis der dortigen Untersuchungen war, dass insbesondere die Essigsäure Emission des Eichenholzes einen wesentlichen auslösenden Einfluss auf die Korrosionsprozesse hat. Diese Erfahrungen beziehen sich jedoch auf stichprobenartige Untersuchungen in ganz Europa, ohne dabei die individuellen Bedingungen der einzelnen Instrumente zu erfassen.

In dem hier beschriebenen Projekt wurden exemplarisch an zwei historischen Orgeln diese Umfeldbedingungen erfasst und mit den Schäden in Bezug gesetzt. Die untersuchten Orgeln lagen im Bereich der Metropolregion Bremen-Oldenburg: in der St. Vitus Kirche in Belum (bei Cuxhaven) und in der Ev. Kirche St. Marien und Pankratius in Mariendrebber (bei Diepholz) (Abb. 1).

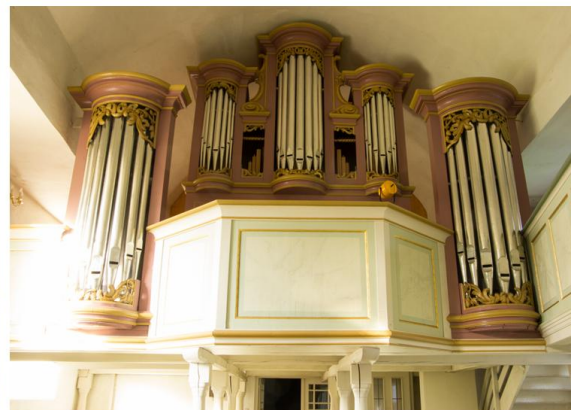
Belum liegt an der Elbemündung direkt an der Nordsee und ist damit einem Meeresklima mit milden, aber feuchten Wintermonaten ausgesetzt. Außerdem ist mit salzhaltigem Eintrag von der Nordsee zu rechnen. Mariendrebber ist dagegen im Binnenland angesiedelt, in landwirtschaftlich intensiv genutztem Umfeld. Auch hier herrscht ein eher feuchtes Klima der Norddeutschen Ebene vor. Der Einfluss an organischen Luftemissionen ist hier erhöht. Bezüglich der Schimmelpilzbildung kann dieser Umstand eine wichtige Rolle spielen.



Kartendaten © 2015 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google



Belum



Mariendrebber



Abb. 1: Standorte der Orgeln, an denen die Untersuchungen durchgeführt wurden

In der Kirche der ev.-luth. Gemeinde St. Vitus in Belum war bereits vor 1600 eine Orgel vorhanden war (möglicherweise aus der Scherer-Schule?). 1717 ist eine Reparatur durch Rudolf Meyer, einem Schnitger-Gesellen, dokumentiert und 1741 wurden Arbeiten durch Dietrich Christoph Gloger durchgeführt. Von 1783 bis 1786 erfolgte ein Neubau der Orgel durch Georg Wilhelm Wilhelmy unter Wiederverwendung der Prospektpfeifen aus dem 16. Jahrhundert. Im Jahre 1844 wurde die Orgel dann durch Philipp Furtwängler aus Elze repariert, der dann 1905 eine neue einer Kegelladenorgel gebaut hat (Furtwängler & Hammer). Im Jahre 2001 erfolgte dann der letzte Neubau im alten Wilhelmy-Prospekt durch Rowan West unter Verwendung der alten Prospektpfeifen aus dem 16. und 17. Jhdt.

In der Kirche St. Marien und Pankratius in Mariendrebber (bei Diepholz) war ebenfalls bereits vor dem dreißigjährigen Krieg eine Orgel vorhanden, nach derzeitiger Erkenntnis aus einer Bielefelder Orgelwerkstatt (?). 1658/59 erfolgte ein Umbau durch Berendt Hus, dem Onkel von Arp Schnitger. Christian Vater restaurierte 1721 die Orgel, die dann erneut 1857 durch Friedrich-Wilhelm Haupt restauriert wurde. 1991 fand die letzte Restaurierung durch die Orgelwerkstatt der Gebrüder Hillebrand statt.

Beide Orgeln weisen erhebliche Schäden an den Bleipfeifen auf. Zurzeit sind komplette Register nicht spielbar und zwecks Sicherung ausgelagert.

2. Einige Grundlagen zur Korrosion von Metallen in wässriger Umgebung

Unter dem Begriff Korrosion versteht man eine „...physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalles führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von denen diese einen Teil bilden, führen kann“¹

Die meisten Gebrauchsmetalle haben in wässriger Umgebung (sog. Elektrolyt) das Bestreben, sich aufzulösen:



Die Anzahl der abgegebenen Elektronen n ist hierbei materialspezifisch, z. B. für Blei ist n meist 2.

Eine wässrige Umgebung kann auch ein sehr dünner, oftmals nicht sichtbarer Wasserfilm sein, der sich durch hohe Luftfeuchtigkeit auf der Materialoberfläche bildet und in dem die Korrosion möglich ist. Die Anwesenheit von Salzen kann diese Bildung von Wasser an der Metalloberfläche noch unterstützen (Hygroskopie). Das Metall geht als geladenes Teilchen, also als Ion, in Lösung. Sofern eine Löslichkeitsgrenze überschritten wird, bilden die Ionen feste Phasen aus, die man als Korrosionsprodukte wiederfindet. Bekanntestes Beispiel ist hier der Rost, der sich als Eisenoxid/hydroxid auf dem korrodierten Stahl findet.

Bei einigen Metallen kann die Bildung der unlöslichen Korrosionsprodukte dazu führen, dass sich diese in Form einer dichten Schicht auf der Oberfläche ablagern und so den Zutritt des Elektrolyten an das Metall hemmen. Durch diese Deckschichtbildung kann also eine Beständigkeit des Materials in der entsprechenden Umgebung erreicht werden. Bekannte Beispiele hierfür sind Kupfer mit grünlichen und Zink mit grauen Deckschichten. Rost auf Stahl hat üblicherweise keine Schutzwirkung, da Rostschichten nicht „dicht“ genug ist.

¹ DIN EN ISO 8044

Der Effekt der Schutzschichtbildung tritt in einer besonderen Form bei Aluminiumwerkstoffen sowie nichtrostendem Stahl, Titan und einigen weiteren metallischen Werkstoffen auf. Hier werden sehr dünne Schichten (einige Nanometer dick) aus Oxiden bzw. Hydroxiden gebildet, sogenannte Passivschichten. Diese sind üblicherweise dünner als die Wellenlänge des Lichtes, dadurch erscheint der Werkstoff metallisch glänzend.

In jedem Fall ist das weitere Korrosionsverhalten von Metallen durch diese Schutzschichtbildung geprägt. Der Vorteil ist, dass im Falle einer Verletzung der Schutzschicht diese wieder nachwachsen kann und so weiterhin vor Korrosion schützt. Wenn es dennoch zu Korrosionsschäden kommt, sind diese meist darauf zurückzuführen, dass diese Schutzschichtbildung gestört ist. Dies kann dadurch geschehen, dass sich z. B. mit Elektrolytbestandteilen Korrosionsprodukte bilden, die einerseits nicht schützend wirken und zusätzlich auch noch die Bildung einer schützenden Deckschicht stören bzw. diese angreifen. Besonders bekannt ist dieses Phänomen bei Stahl und Aluminiumwerkstoffen bei Anwesenheit sogenannter Halogenide, z. B. Chloride.

Von Blei ist unter atmosphärischen Bedingungen üblicherweise eine hohe Beständigkeit bekannt. Gegenstände aus Blei können Jahrhunderte überdauern. Bei Blei kann jedoch die Anwesenheit von Essigsäure zu einer Störung der Schutzschichtbildung bzw. deren Zerstörung führen.

3. Durchgeführte Untersuchungen

Zur Ursachenermittlung und zur Eingrenzung der Einflussfaktoren wurden unterschiedliche Untersuchungen an den Metallpfeifen der genannten Orgeln durchgeführt. Diese waren weitestgehend zerstörungsfrei, so dass die Orgeln und deren Komponenten nicht beschädigt wurden.

Es wurden materialographische Untersuchungen an korrodierten Orgelpfeifen durchgeführt, um den Korrosionszustand mit Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop näher zu dokumentieren und Korrosionsprodukte mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie zu analysieren. Dies konnte nur sporadisch an wenigen, zur Verfügung gestellten Orgelpfeifen durchgeführt werden, da diese hierzu zerschnitten werden mussten. Von den Orgelbauern Fa. West für Belum und Fa. Klais für Mariendrebber wurden entsprechende Exemplare zur Verfügung gestellt, welche nicht mehr zu restaurieren waren.

Innerhalb der Orgeln wurden sogenannte Couponauslagerungen durchgeführt. Kleine Abschnitte eines noch nicht verwendeten Pfeifenmaterials (dankenswerterweise von der Fa. Klais zur Verfügung gestellt) wurden in Schwefelsäure gebeizt, um eine definierte Oberfläche zu erhalten, und für einen gewissen Zeitraum an unterschiedlichen Stellen in der Orgel und in der Kirche ausgelagert. Nach der Auslagerungszeit wurde mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) Analysen von den auf der Oberfläche gebildeten chemischen Verbindungen durchgeführt.

Über den gesamten Projektzeitraum wurden in beiden Kirchen mikroklimatische Messungen durchgeführt, wobei an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Orgel und in der Kirche Klimasensoren installiert wurden, die in einem Abstand von 5 Minuten die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte aufgezeichnet haben.

Zusätzlich wurden orientierende Experimente durchgeführt, indem Absorbate (Neutralisations- und Trocknungsmittel) in den Windladen der Orgel in Belum ausgelagert, um die Wirksamkeit möglicher Abhilfemaßnahmen bewerten zu können. Dies wurde während der

„Winterkirche“ in Belum durchgeführt. In dieser Zeit wird der Kirchenraum selber nicht geheizt und die Orgel nicht gespielt. So konnten für das Mikroklima in der Orgel konstante Bedingungen angenommen werden. Diese Untersuchungen wurden von Gasanalysen in den Windladen der Orgel begleitet.

4. Ergebnisse

4.1. Schadensanalyse: metallografische Untersuchungen

Alle Schadensuntersuchungen beginnen mit der ausführlichen Dokumentation des Schadensbildes. Zur Schadensaufnahme gehörten dabei auch der Kenntniserwerb über eingesetzte Materialien, Reparaturen und Erfahrungen durch die Orgelbauer, Spielbetrieb der Orgel und das Nutzungs- und Lüftungsverhalten in der Kirche. Damit sind zumindest einige Faktoren beispielhaft genannt, die sich im Zusammenspiel mit der Orgel auf deren Zustand auswirken können.

Vor den Orgeln stehend, wie in Abb. 1 im Kapitel 2 dargestellt, sind die Schäden nicht auf den ersten Blick ersichtlich. Doch aus der Nähe sind im Pfeifenfuß unterhalb des Labiums Auswölbungen, Risse und auch Löcher sichtbar, siehe Abb. 2.

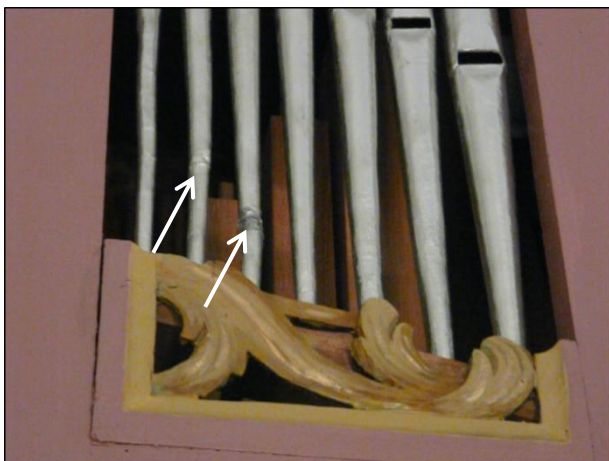


Abb. 2: Korrosionsschäden an den Pfeifenfüßen der Orgel in Belum im Jahre 2012



Abb. 3: Defekte Prospektpfeife Belum

Die Auswölbungen entstehen dadurch, dass die sich im Inneren bildenden Korrosionsprodukte mit einer Volumenvergrößerung einhergehen. Bereits diese Volumenvergrößerung führt zu einem Verklemmen der Pfeifen in den Holzbrettern und beeinflusst die Tonlage.

Sind die Pfeifenfüße so geschädigt, dass Löcher entstanden sind, können diese Pfeifen nicht mehr gespielt werden und das Material muss vom Orgelbauer ersetzt werden. Üblicherweise wird dafür Material der historischen Zusammensetzung (größtenteils aus Blei bestehend) im Pfeifenfuß ausgetauscht.

Trotz der bereits defekten Pfeifen war es nur in begrenztem Umfang möglich, Material für Untersuchungen von den Orgelbauern zu erhalten. Bereits kurz nach Projektbeginn wurde es klar, dass kein Referenzmaterial von intakten Pfeifen untersucht werden kann.

Ein Beispiel einer defekten Prospektpfeife zeigt Abb. 3 Von der Fa. Orgelbau West wurde eine originale Pfeife von 1550, die „Principal 8 Fuß“ für Untersuchungen zur Verfügung gestellt, siehe Abb. 4. Sie stammt aus der Orgel in Belum.



Abb. 4: „Principal 8 Fuß“ Originalteil von 1550, zur Verfügung gestellt durch „Orgelbau West“ (Belum)

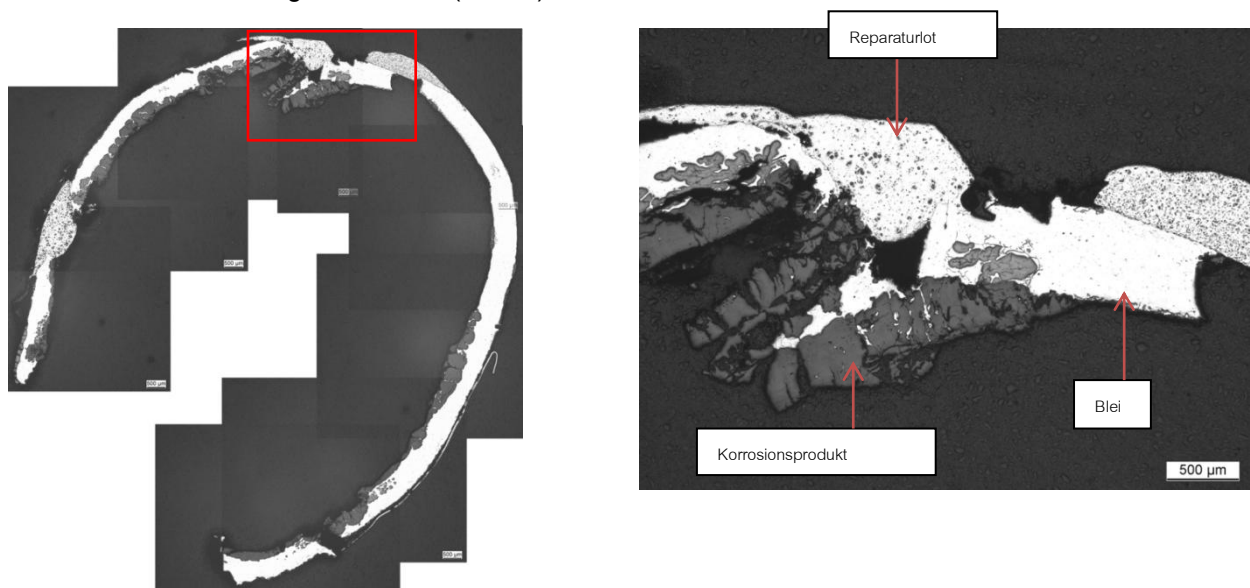


Abb. 5: Metallografischer Querschliff durch die „Principal 8 Fuß“ im Überblick (links) und im Detail (rechts)

Diese Pfeife war mehrfach zerstört und auch bereits mit Folie repariert worden. Es wurde ein Bereich für die Materialuntersuchung mittels metallografischen Querschliffs ausgewählt, siehe Abb. 5. Die Darstellung des Querschnittes durch die defekte Pfeife im Lochbereich (roter Rahmen) zeigt das Ausmaß des Bleifraßes an dieser historischen Pfeife. Umlaufend existiert kaum noch ein Bereich ohne Korrosion. Es ist auch deutlich zu erkennen, dass die Korrosion von innen beginnt und sich nach außen „durchfrisst“. Die hellen Bereiche entsprechen der ursprünglichen historischen Bleilegierung, die gelöteten Reparaturstellen haben meist einen Sn-Anteil. Die Korrosion hat zum großen Teil bereits die Hälfte der Wanddicke

der Pfeife eingenommen. Detailliert sind diese Schäden im rechten Teilbild der Abb. 5 ersichtlich.

Mit Hilfe energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) wurde die Materialzusammensetzung innerhalb des Querschnittes dieser Pfeife ermittelt. Dafür wurde die Schliffprobe aus Abb. 5 im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Bei dieser Untersuchung wechselwirkt ein Elektronenstrahl mit der Probenoberfläche im Mikrometerbereich. Dabei entstehen Sekundärelektronen, Rückstreuелеktronen und Röntgenstrahlen. Die entstehende Röntgenstrahlung ist charakteristisch für jedes Element, so dass sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Analyse im Mikrobereich erfolgen kann.

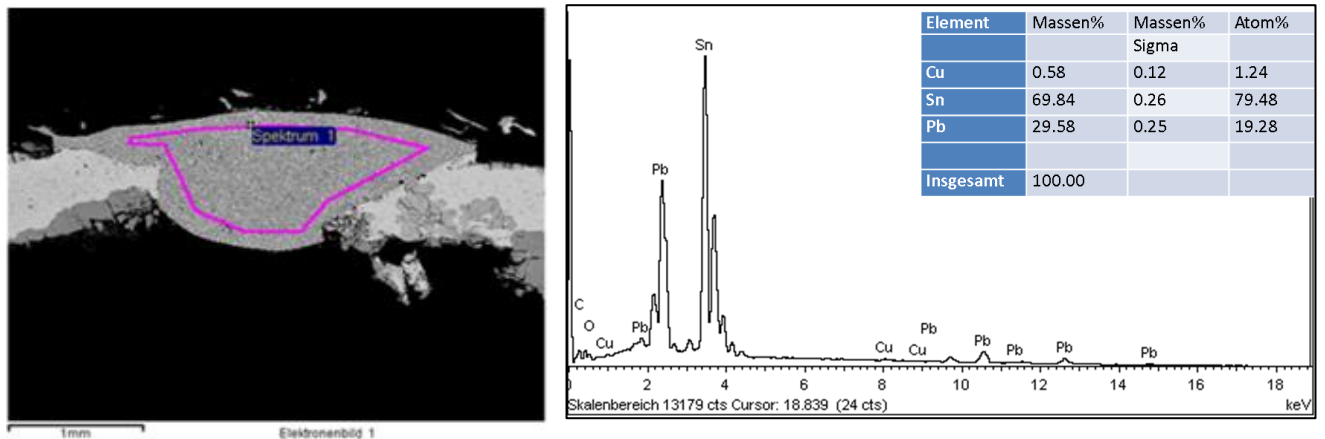


Abb. 6: EDX- Messung an einer Reparaturstelle der Pfeife „Principal 8 Fuß“ Belum

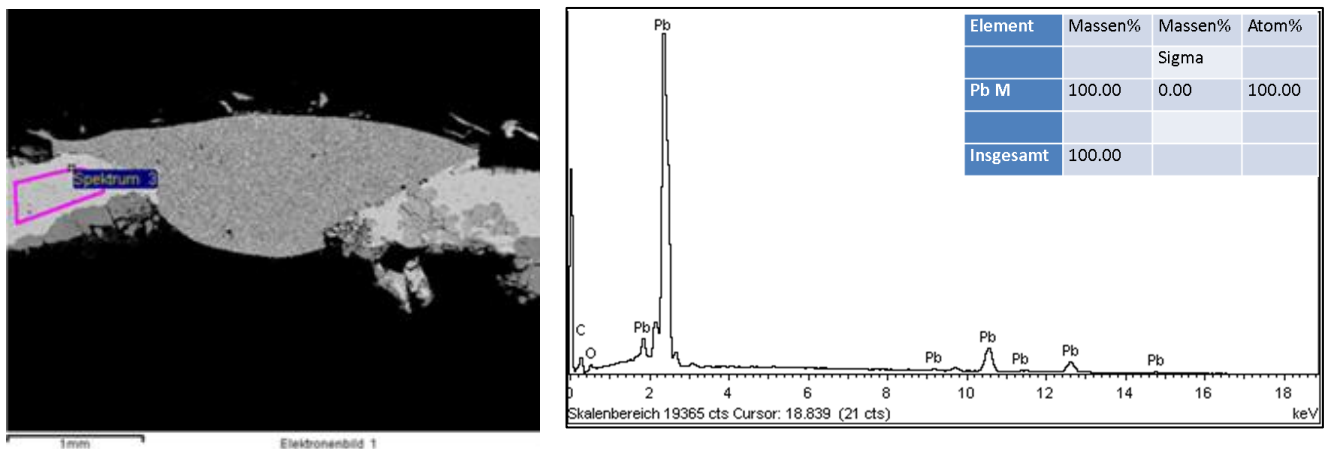


Abb. 7: EDX- Messung an einer Stelle des ursprünglich historischen Materials der Pfeife „Principal 8 Fuß“ Belum

Nach Auswertung der EDX- Messung besteht das Reparaturlot (Abb. 6) aus ca. 70% Sn, ca. 30% Pb und Spuren von Cu, und das Originalpfeifenmaterial (Abb. 7) einmal zu 100% aus Pb.

Die Orgel in Mariendrebber wurde 1991 restauriert, 2006 wurden bereits wieder Reparaturen notwendig, zu diesem Zeitpunkt wurden Löcher mit Lötzinn gefüllt. Von der Fa. Orgelbau Klaist in Bonn, die zu diesem Zeitpunkt für die Orgel in Mariendrebber zuständig war, wurden vorerst zwei Pfeifen zu reinen Dokumentationszwecken zur Verfügung gestellt (Abb. 8).



Abb. 8:
Durch Korrosion geschädigte Pfeifen „b-Blockflöit 4 Fuß“ und „Gs1 Gedact“, Originalpfeifen aus Baujahr 1659 (Mariendrebber)

Zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF), konnten genutzt werden, um zumindest äußerlich die Materialzusammensetzung des ursprünglichen Pfeifenmaterials und der Reparaturstellen zu ermitteln (Abb. 9).

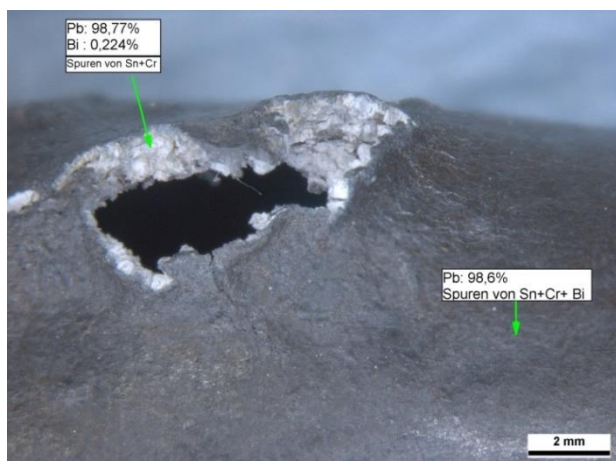


Abb. 9: Mit XRF ermittelte Zusammensetzung des historischen Pfeifenmaterials der Orgel in Mariendrebber: Pb mit Spuren von Sn, Cr, Bi

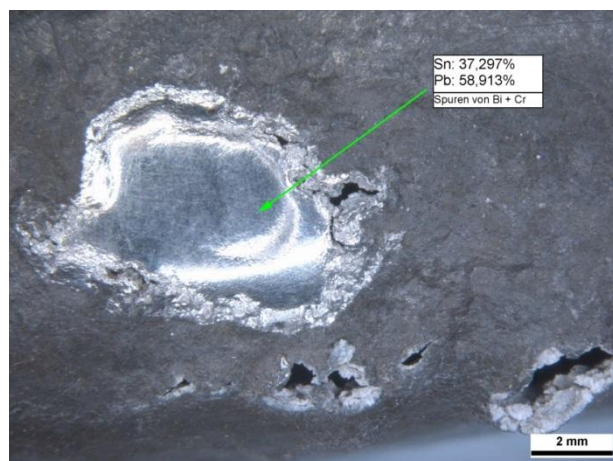


Abb. 10: Reparaturstelle an der historischen Pfeife „b-Blockflöit 4 Fuß“ der Orgel in Mariendrebber: Mischung aus Pb und Sn mit Spuren von Bi und Cr

Das Ausmaß der Korrosion in den befallenen Pfeifen wurde sichtbar nach der Möglichkeit, eine der Pfeifen unterhalb des Labiums abzutrennen und längsseitig zu halbieren. In Abb. 11 wird ersichtlich, dass die Korrosion flächendeckend bis zur abgetrennten Länge stattgefunden hat, überall im Innern des Pfeifenstückes ist der helle Belag der Korrosionsprodukte zu sehen.

Im Querschnitt durch Hauptkorrosionsstellen wird ersichtlich, wie sich die Korrosionsprodukte in die historische Legierung „hineingefressen“ haben. Auf dem rechtsseitigen Bild der Abb. 12 erkennt man, dass die Korrosionsprodukte mehr als die Hälfte der Wandstärke der Pfeife eingenommen haben. Es kann keine Aussage dazu getroffen werden, in welcher Zeit diese starke Zersetzung stattgefunden hat.



Abb. 11: Durchtrennter Pfeifenfuß einer historischen Blockflöte mit abgelagerten Korrosionsprodukten im Innern

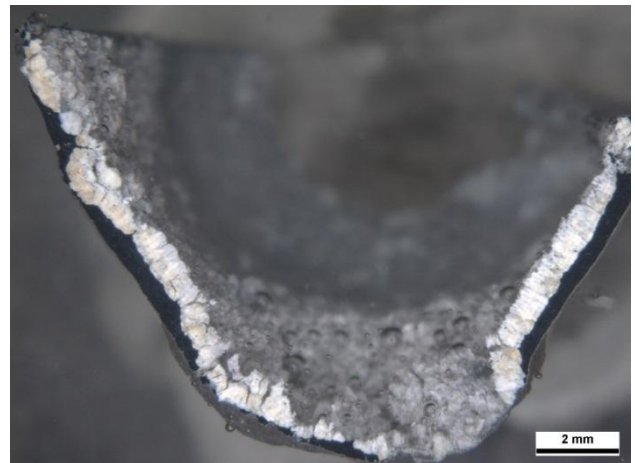
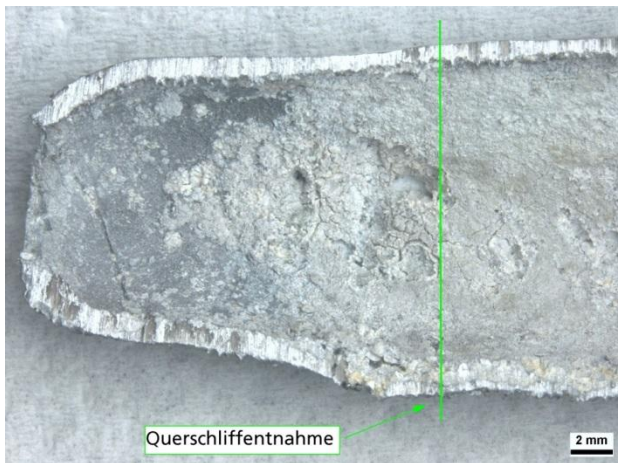


Abb. 12: Präparation durch den Querschnitt der korrodierten Pfeife: weiß aussehender Korrosionsbelag auf dunklem Pfeifenmaterial

Mittels EDX wurden die Korrosionsprodukte auf der Pfeifeninnenseite untersucht, siehe Abb. 13. Doch mit dem EDX-Verfahren kann nur auf die einzelnen Elemente geschlossen werden, so wurden Pb, O, C und Spuren von Ca nachgewiesen. Der Nachweis der Korrosionsverbindung kann damit nicht erfolgen.

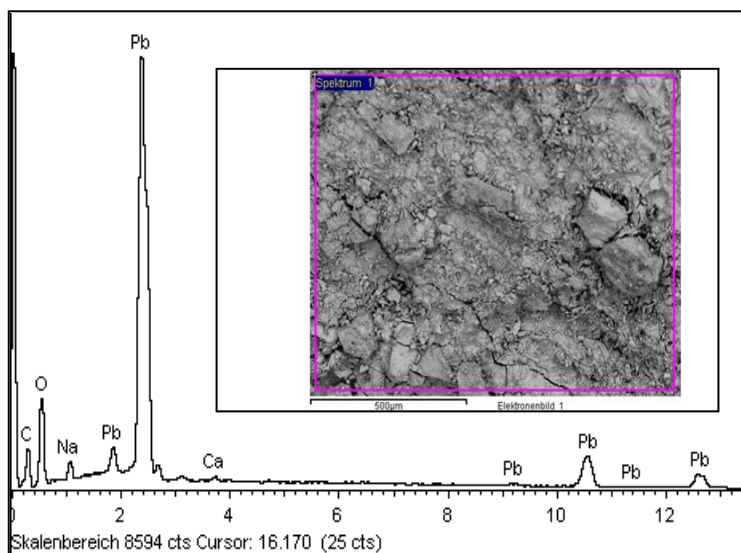


Abb. 13: EDX-Untersuchung und Messergebnis an den Korrosionsprodukten

4.2. Auslagerung von Proben in den Orgeln

Die Auslagerung sogenannter Couponproben diente dazu, das Korrosionsverhalten des Blei an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Orgel zu untersuchen. Hierzu wurden kleine Abschnitte des Orgelpfeifenmaterials, welches von der Fa. Klaist zur Verfügung gestellt wurde, beschriftet, gebeizt und gewogen. Dann wurden diese Coupons für einen Zeitraum von 3 Monaten an unterschiedlichen in den Orgeln eingebracht. Nach Ablauf der Auslagerungszeit wurden die Proben wieder entnommen, gewogen, und mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) auf Veränderungen der Oberflächenzusammensetzung hin untersucht.

Die Röntgenphotoelektronenspektroskopie beruht auf dem äußeren Photoeffekt, bei dem durch Röntgenstrahlung Photoelektronen aus einer Festkörperoberfläche ausgelöst werden. Die Bestimmung der kinetischen Energie dieser Elektronen erlaubt Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der untersuchten Probenoberfläche. Die zugehörige Informationstiefe, die durch die begrenzte Austrittstiefe der emittierten Elektronen bestimmt wird, beträgt ca. 10 nm und liegt somit in der Größenordnung von Passivschichten, im Gegensatz zu energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX), welche eine elementspezifische Eindringtiefe von ca. 1-3 µm aufweist und somit zur Charakterisierung dünner Schichten im Nanometerbereich nicht sensitiv genug ist.

4.2.1. Auslagerungsproben in Belum

In Abb. 14 sind die Proben, die in Belum für 3 Monate ausgelagert wurden, dargestellt. Auffallend ist, dass die Proben B3 bis B4, die in den Windladen ausgelagert wurden () sehr stark ins gräuliche angelaufen sind.

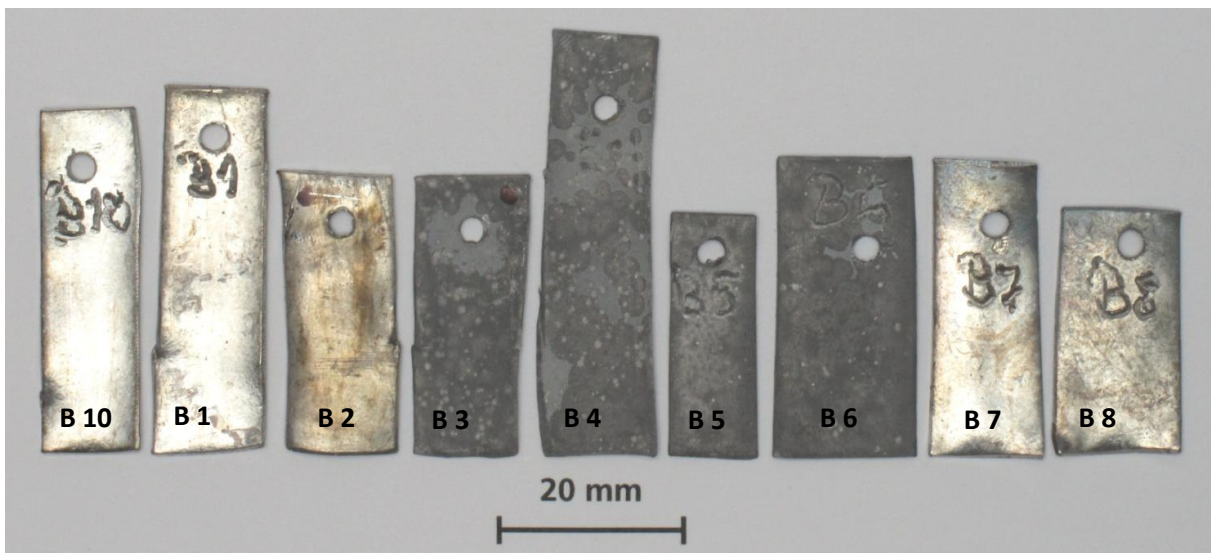


Abb. 14: Bleicoupons nach drei Monaten Auslagerung in der Orgel von Belum

Tab. 1: Positionierung der Auslagerungsproben innerhalb der Orgel in Belum

B1	Kanzel
B2	Kirchenraum Deckenbalken
B3	Windlade Hauptwerk C
B4	Windlade Brustwerk C
B5	Windlade Hauptwerk Cis
B6 *)	Windlade Brustwerk Cis
B7	Im Pfeifenraum, hinter Prinzipal 8 Cis 0
B8	Im Pfeifenraum, Rohrflöte 8 Fuß C1 im 1. Manual
B10	Referenzprobe, keine Auslagerung

*) : Probe B6 wurde für die XPS-Analysen verworfen

Für die XPS-Analysen musste die Probe B6 verworfen werden, da diese nach Ausbau bei der Analysenvorbereitung irrtümlich kontaminiert wurde.

Tab. 2: Elementzusammensetzung (XPS) der Oberflächen der Belum-Proben nach 3 Monatiger Auslagerung (Blei Pb auf 100%)

Probe	C (at%)	O (at%)	Na (at%)	S (at%)
Referenz B10	56,4	27,5	0,3	/
B1	41,6	39,6	0,3	/
B2	55	30,6	/	/
B3	45,3	38,3	/	/
B4	48,5	36,9	/	/
B5	49,2	36,2	/	/
B7	43,4	36,4	/	1,7
B8	39,5	40,7	0,4	/

Die Elementanalysen mittels XPS (Beispiel siehe Tab. 2) ergaben erwartungsgemäß einen hohen Anteil von Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) sowie Blei (Pb) auf der Oberfläche. Die große Menge an Kohlenstoff auf der Oberfläche auf sogenannten Adsorbaten aus der Luft auf Basis von ubiquitären aliphatischen Kohlenwasserstoffketten wird bei XPS-Messungen,

bei denen die Proben an der Luft lagern, oft nachgewiesen. Diese Adsorbate sind für den Korrosionsprozess nicht relevant. Ein Teil des Kohlenstoffes wird aber auf Korrosionsprodukte zurückzuführen sein, z. B. als Carbonate, aber auch auf Basis von Acetaten wie der Essigsäure. Sauerstoff (O) ist Bestandteil von oxidischen, hydroxidischen und carbonatischen Korrosionsprodukten. Weiterhin wurden vereinzelt Spuren von Natrium (Na) und Schwefel (S) gefunden. Diesen wird jedoch keine Relevanz eingeräumt. Chloride, welche für viele Korrosionsvorgänge als Auslöser fungieren können, wurden insgesamt nicht nachgewiesen.

Jedoch konnten teilweise Acetate bei einer detaillierten Betrachtung der sog. Kohlenstoff-C1-Peaks in den XPS-Spektren nachgewiesen werden. Hierbei wird die Verschiebung der Energien der nachgewiesenen Elektronenübergänge näher betrachtet; diese ist spezifisch zur betrachteten chemischen Bindung und gibt damit Rückschlüsse darauf, in welcher chemisch gebundenen Form ein Element vorliegt. Acetat ließ sich auf den Proben B3, B4 und B5 wiederfinden, allesamt Proben, die in Windladen ausgelagert wurden.

Die Informationstiefe von XPS-Messungen liegt bei ca. 10 nm. Durch sogenanntes „Sputtern“, also das „Beschießen“ mit Fremdionen, kann die Oberfläche langsam abgetragen und dann mittels weiterer XPS-Messungen auch Informationen in größeren Tiefen erhalten werden. In Abb. 15 sind die Tiefenprofile von 4 ausgewählten Proben an den am häufigsten auftretenden Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Blei (Pb) dargestellt.

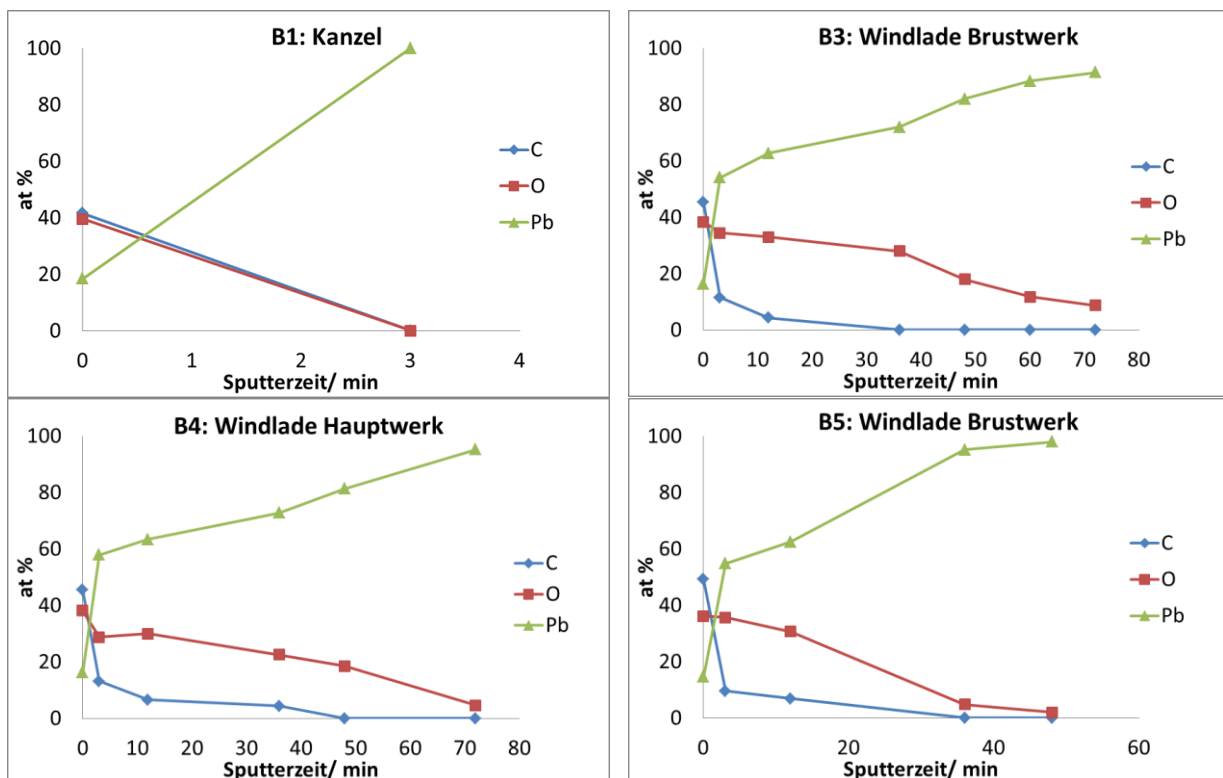


Abb. 15: XPS-Tiefenprofile der Belum-Proben, 1 min Sputterzeit entspricht ca. einer Tiefe von 18 nm (kalibriert an AlOx)

Für den Sputtervorgang wurde angenommen, dass erst ab einem Blei-Vorkommen von annähernd 100% die Deckschicht auf dem Material vollständig abgetragen ist.

Für die Probe B1 wird schon nach 3 min Sputtern kein Sauerstoff und Kohlenstoff mehr nachgewiesen, so dass eine oxidische Deckschicht eine Dicke von weniger als ca. 20 nm aufweist und somit in der Größenordnung einer Passivschicht liegt. Für die anderen drei Proben wurde erst nach viel längeren Sputterzeiten kein Kohlenstoff und Sauerstoff mehr nachgewiesen, hier liegen die geschätzten Schichtdicken für 72 min Sputterzeit bei ca. 430 nm (Proben B3 und B4) bzw. 48 min Sputterzeit bei ca. 290 nm. Diese Werte sind weitaus höher als es für Passivschichten zu erwarten wäre, sodass hier von einem aktiven Korrosionsvorgang auszugehen ist.

4.2.2. Auslagerungsproben Mariendrebber

Die Situation in Mariendrebber zeigt sich grundsätzlich nicht unterschiedlich zu Belum, wenngleich die Korrosionserscheinungen hier in dem Zeitraum von ca. 3 Monaten nicht ganz so stark ausgeprägt waren. In Abb. 16 ist zu sehen, dass einige der hier ausgelagerten Proben ebenso Verfärbungen ins Gräuliche aufweisen. Bei den Oberflächenanalysen fällt auf, dass hier auf einigen Proben das Element Natrium (Na) in teilweise recht großen Anteilen wiedergefunden wurde (Tab. 4). Die Herkunft ist unklar, da Na üblicherweise als Salz vorliegt und somit nicht über die Gasphase übertragen werden kann. Es ist daher nicht auszuschließen, dass es sich hierbei um Artefakte/Kontamination handelt. Die Präsenz von Na wird aber auch nicht als maßgeblich für den Korrosionsvorgang angesehen. Neben Spuren von Schwefel (S) (auf einigen Proben) sowie Zinn (Sn), welches wohl als Legierungselement in dem verwendeten Blei vorliegt, wurden außer Blei, Sauerstoff und Kohlenstoff keine weiteren Elemente nachgewiesen, auch kein Chlor (Cl). Acetate wurden auf den Proben A1, A5 und A8 wiedergefunden. Die Schichtdickenbestimmung mittels Sputtern ergab für die Proben A1 ca. 210 nm und A2 zwischen 30 und 60 nm (Abb. 17). Ansonsten wurden für alle Proben Schichtdicken < 20 nm festgestellt. Die am stärksten korrodierte Probe A1, auf der auch Acetate wiedergefunden wurden, stammt wie in Belum aus der Windlade. Die Anwesenheit von Acetat auf den Proben A5 und A8 erscheint unklar.

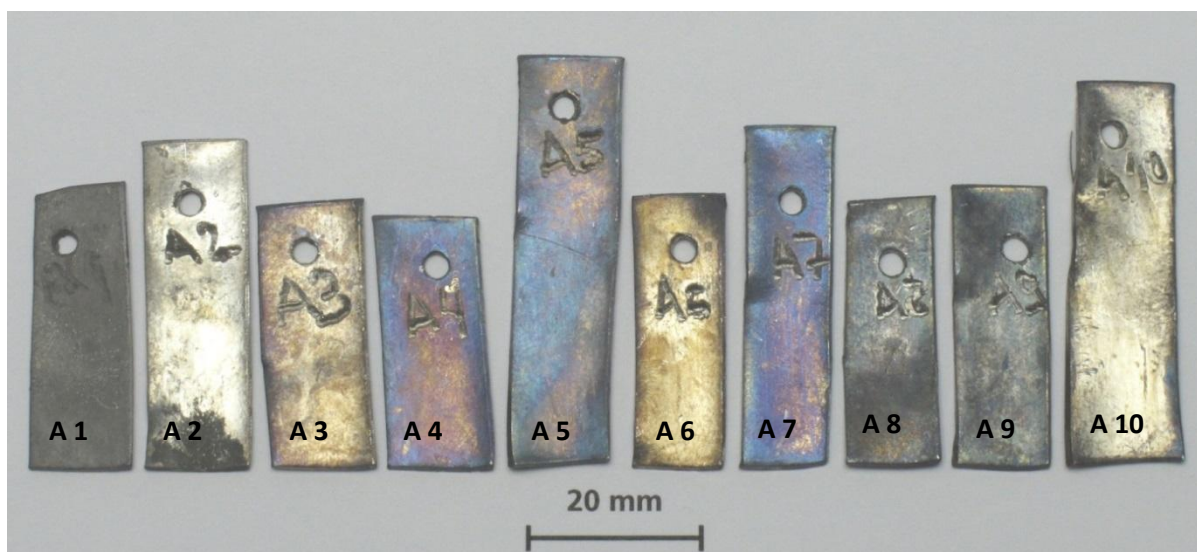


Abb. 16: Bleicoupons nach drei Monaten Auslagerung in der Orgel von Mariendrebber

Tab. 3: Positionierung der Auslagerungsproben innerhalb der Orgel in Mariendrebber

A1	Nördliche Windlade Brustwerk Cis
A2	Windlade Hauptwerk (linke Seite von hinten)
A3	Hauptwerk (Rasterlicht)
A4	Windlade Brustwerk
A5	Prospekt Nordseite (auf Holz)
A6	Pfeife (F 4 Fuß gedackt) Hauptwerk
A7	Windlade Brustwerk Pfeife (E 2 Fuß)
A8	Kirchenschiff Bogensockel Altar (Nordseite)
A9	Kirchenschiff Bogensockel Mittelschiff (Südseite)
A10	Balraum über dem Motor

Tab. 4: Elementzusammensetzung (XPS) der Oberflächen der Mariendrebber-Proben nach 3 Monatiger Auslagerung (Blei Pb auf 100%)

Probe	C (at%)	O (at%)	Na (at%)	S (at%)	Sn (at%)
A1	40,4	39,2	20,5	-	-
A2	49,3	33,7	16,9	0,2	-
A3	49,3	33,7	0,2	/	/
A4	53,8	31,2	0,3	/	0,1
A5	40,1	40,4	1,2	/	0,2
A6	49,6	34,1	/	/	/
A7	50,5	32,7	<0,1	0,6	0,2
A8	40,1	39,6	/	1	/
A9	46,3	36,3	/	0,7	/
A10	47,9	33,2	/	/	/

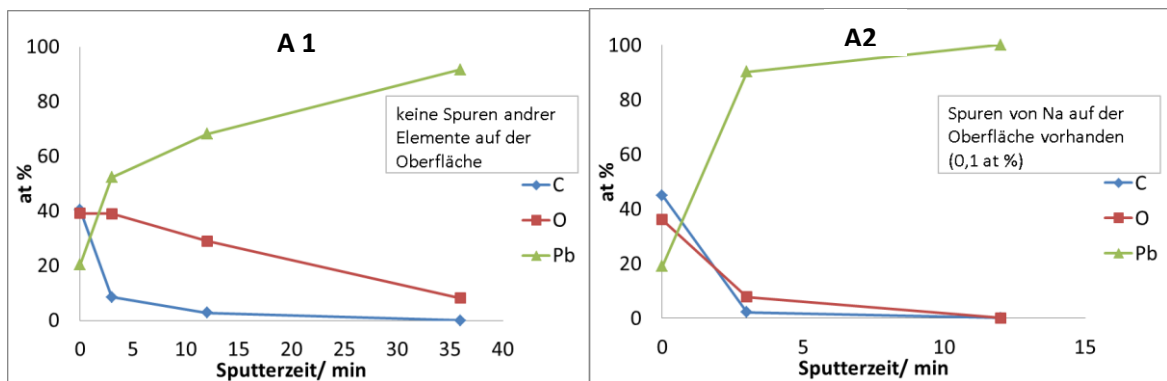


Abb. 17: XPS-Tiefenprofile der Mariendrebber-Proben, 1 min Sputterzeit entspricht ca. einer Tiefe von 18 nm (kalibriert an AlOx)

4.3. Mikroklimatische Untersuchungen an den Orgeln

Für den Korrosionsvorgang von Metallen ist das Vorhandensein von Wasser essentiell. Metalle können auch in der Atmosphäre korrodieren, da sich durch die Feuchtigkeit in der Luft ein dünner, meist nicht sichtbarer Wasserfilm auf der Oberfläche bilden kann. Das kann durch regelrechte Tauwasserbildung an der Materialoberfläche bei Unterschreiten des Taupunktes geschehen, aber auch durch Absorption von Wassermolekülen an der Oberfläche. Diese Vorgänge sind von der Luftfeuchtigkeit (insbesondere der absoluten Feuchte) und der Temperatur der Luft, sowie im Falle der Taupunktunterschreitung von der Temperatur der Metalloberfläche abhängig. Verschiedene Materialien weisen zudem unterschiedliche Wasseraktivitäten auf, also die Neigung, Wassermoleküle anzulagern. Es gibt auch hygroskopische Materialien (z.B. einige Salze), die aktiv Wassermoleküle aufnehmen.

Um die Gegebenheiten an und in den beiden untersuchten Orgeln beurteilen und analysieren zu können, wurden an 10 verschiedenen Stellen im Kirchenraum, in und am Instrument Sensoren angebracht, mit denen die relative Luftfeuchtigkeit (RF) und die Lufttemperatur gemessen wurden. Zusätzlich wurde ein Außensensor angebracht. Um auch kleinste Veränderungen erfassen zu können, wurden über den gesamten Projektzeitraum alle 5 min Messwerte aufgenommen. Gleichzeitig wurden die Kirchengemeinden gebeten, die Aktivitäten in der Kirche und an der Orgel zu protokollieren, um gemessene Effekte in den Messdaten entsprechenden Ereignissen zuordnen zu können.

Im Einzelnen wurden zwei Sensoren im Kirchenraum installiert, und zwar an zwei verschiedenen Stellen im oberen Luftraum (Kanzel, Deckenbalken, Pfeilerabsätze). Mit diesen Messstellen sollte der Einfluss des Außenklimas auf den Luftraum der Kirche erfasst werden. Im Orgelgehäuse wurden ebenfalls zwei Sensoren angebracht, die den Austausch zwischen Orgelgehäuse und Raumluft der Kirche erfassen sollten. Beide Orgeln verfügen über jeweils vier Windladen, in denen jeweils ein Sensorsystem eingebracht wurde. In Belm waren diese vier Windladen windtechnisch voneinander getrennt, so dass im weiteren Verlauf des Projektes vergleichende Versuche unter identischen Bedingungen durchgeführt werden konnten. Da die Sensorsysteme über eine Funkverbindung mit dem Datenserver verbunden waren, konnten die Messungen ohne störende Verkabelungen durchgeführt werden. Die Frage nach einer möglichen Taupunktunterschreitung an den Oberflächen der Metallpfeifen sollte mit einem Oberflächen-Temperatursensor überprüft werden. Im Endergebnis konnten keine Taupunktunterschreitungen an den Außenseiten der Pfeifen festgestellt werden. In wieweit die

Temperatur der Außenwand mit der Innenwand der Pfeife korreliert, wurde nicht näher untersucht. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit von Blei sind Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenwand der Pfeifen nicht zu erwarten.

Bei beiden Orgeln wird der benötigte Wind in Elektromotoren erzeugt, die in geschlossenen Motorkästen installiert sind und über Holzkanäle den Wind in die Windladen leiten. Um die Temperatur und die Luftfeuchte dieser Ausgangsluft zu ermitteln, wurden entsprechend Sensoren in den Motorkästen/-räumen installiert. In Belum war der Motorraum direkt hinter der Orgel zugänglich (Abb. 18), in Mariendrebber steht der Motor in einem Balraum im Kirchturm.



Abb. 18: Einbau von Klimasensoren, oben links: Außensensor Mariendrebber, oben rechts: Sensor im Kirchenraum (Kanzel) Belum, unten links: Sensor im Motorkasten Belum, unten rechts: Sensor in Windlade Belum

Die Vorgehensweise, über einen langen Zeitraum sehr detailliert die klimatischen Verhältnisse kontinuierlich zu überwachen, ist bisher einzigartig gewesen und hat sich für die Bewertung des Korrosionsrisikos als besonders zielführend herausgestellt.

Die Auswertung der Daten über den gesamten Messzeitraum zeigt bereits die grundlegende Situation in und an der Kirche (Abb. 19). Die Wintermonate sind durch Heizphasen an den Wochenenden geprägt, bei denen in relativ kurzen Zeiträumen die Lufttemperatur auf 19 °C und mehr angehoben wird. Gleichzeitig schwankt die relative Feuchtigkeit im Kirchenraum stark, beeinflusst durch Witterungsverhältnisse im Außenbereich. Ein besonderer Zeitraum in Belum ist die sog. Winterkirche, die nach Ende des Neujahrsgottesdienstes beginnt und bis Ostern andauert. In dieser Zeit wird die Kirche nicht genutzt und geheizt und auch die Orgel

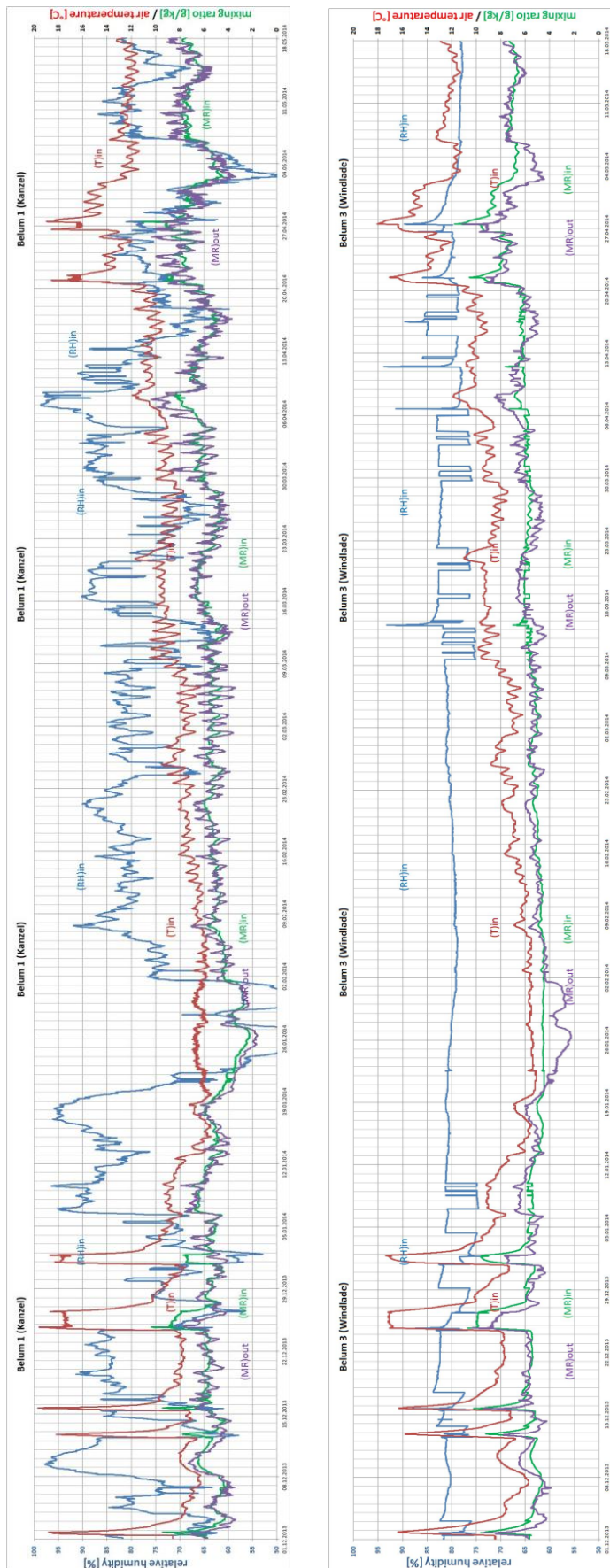


Abb. 19: Monitoring der Klimadaten, Beispiel zwei Sensoren in Belum (links Kanzel, rechts Windlade) für einen Zeitraum vom 01.12.2013 bis 18.05.2014

wird nicht gespielt. Dieser Zeitraum wurde genutzt, um erste orientierende Versuche zur Beeinflussung der mikroklimatischen Verhältnisse in den Windladen durchzuführen.

Ein Ausschnitt der Daten für die Herbstzeit zeigt, dass für beide Kirchen klimatisch über längere Zeiträume sehr hohe relative Luftfeuchtigkeiten vorliegen und im Außenbereich sehr oft die Sättigung mit 100% relativer Feuchte durch Regen, Nebel erreicht und auch gehalten wird (Abb. 20-21). Auch innerhalb der Kirchenräume (Abb. 23-23) treten hohe Werte in Größenordnungen von 70% - 80% relativer Luftfeuchte (RF) auf. Dies sind üblicherweise Feuchtigkeitsniveaus, bei denen Metallkorrosion grundsätzlich auftreten kann. Durch die Inbetriebnahme der Heizung, in der Regel am Tag vor den Gottesdiensten, nimmt die relative Feuchte ab, da durch die erhöhte Temperatur die Sättigungslöslichkeit von Wasser in Luft zunimmt. Kurz nachdem die Heizungen aber wieder abgestellt werden und die Temperatur sinkt, stellt sich der ursprüngliche Zustand hoher Luftfeuchtigkeit im den Kirchenräumen wieder ein.

Um eine genauere Analyse der Klimabedingungen während eines solchen Heizereignisses vorzunehmen, ist in Abb. 233-25 und ein typisches Wochenende (01.-04.11.2015) am Beispiel von Belum dargestellt.

Am Freitag betrug in der Kirche (Abb. 23), gemessen auf der

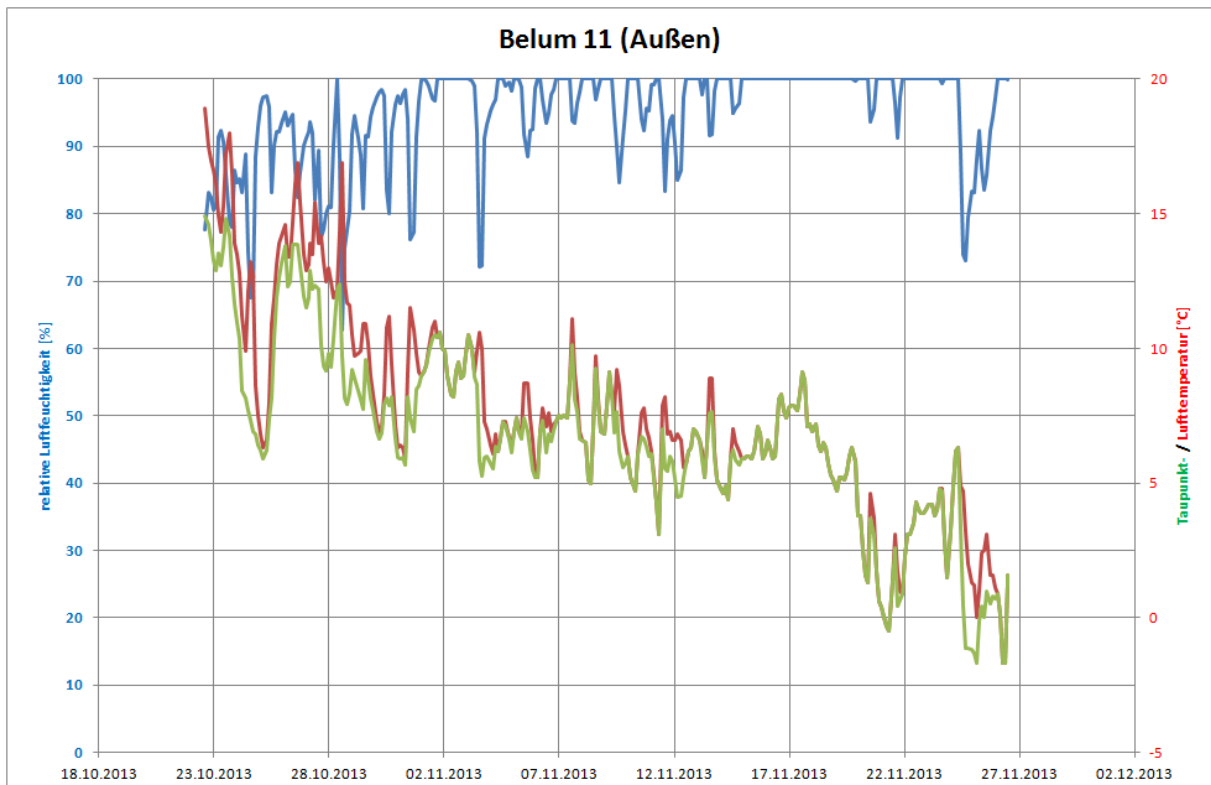


Abb. 20: Ausschnitte Klimadaten Außensensor in Mariendrebber

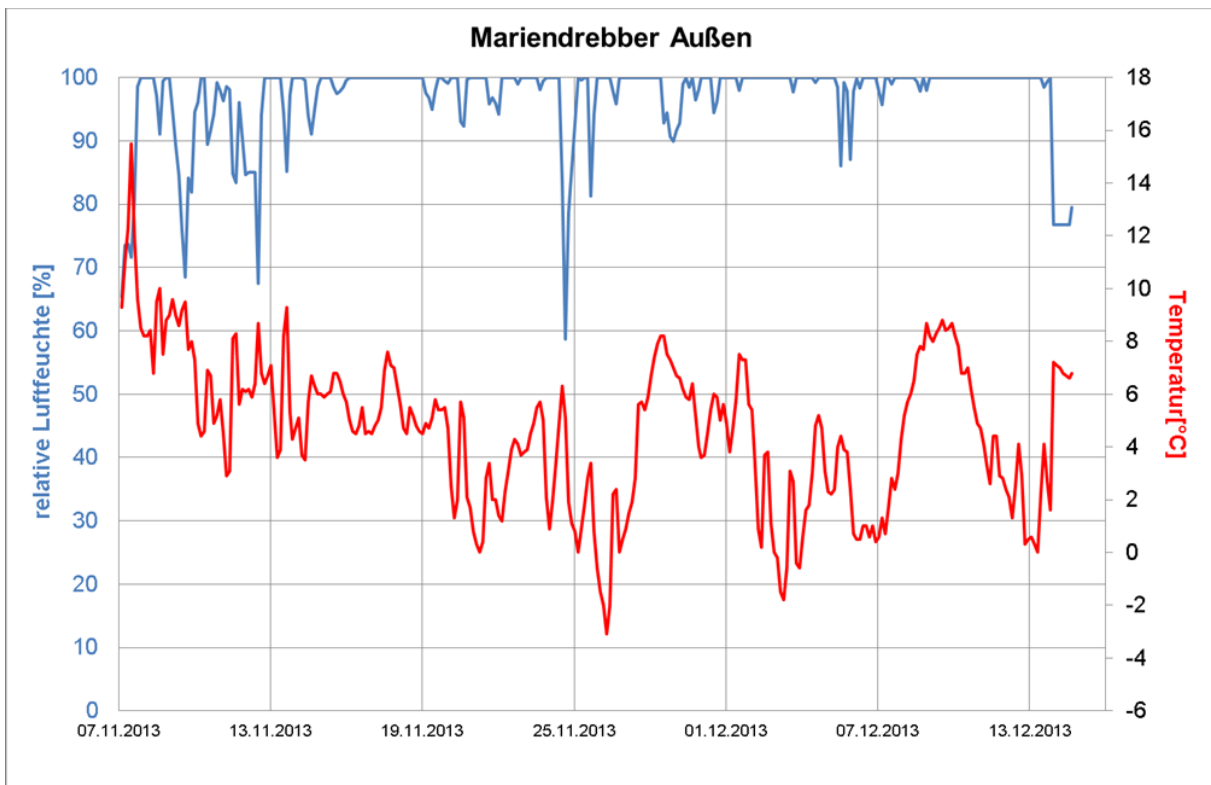


Abb. 21: Ausschnitte Klimadaten Außensensor in Belum

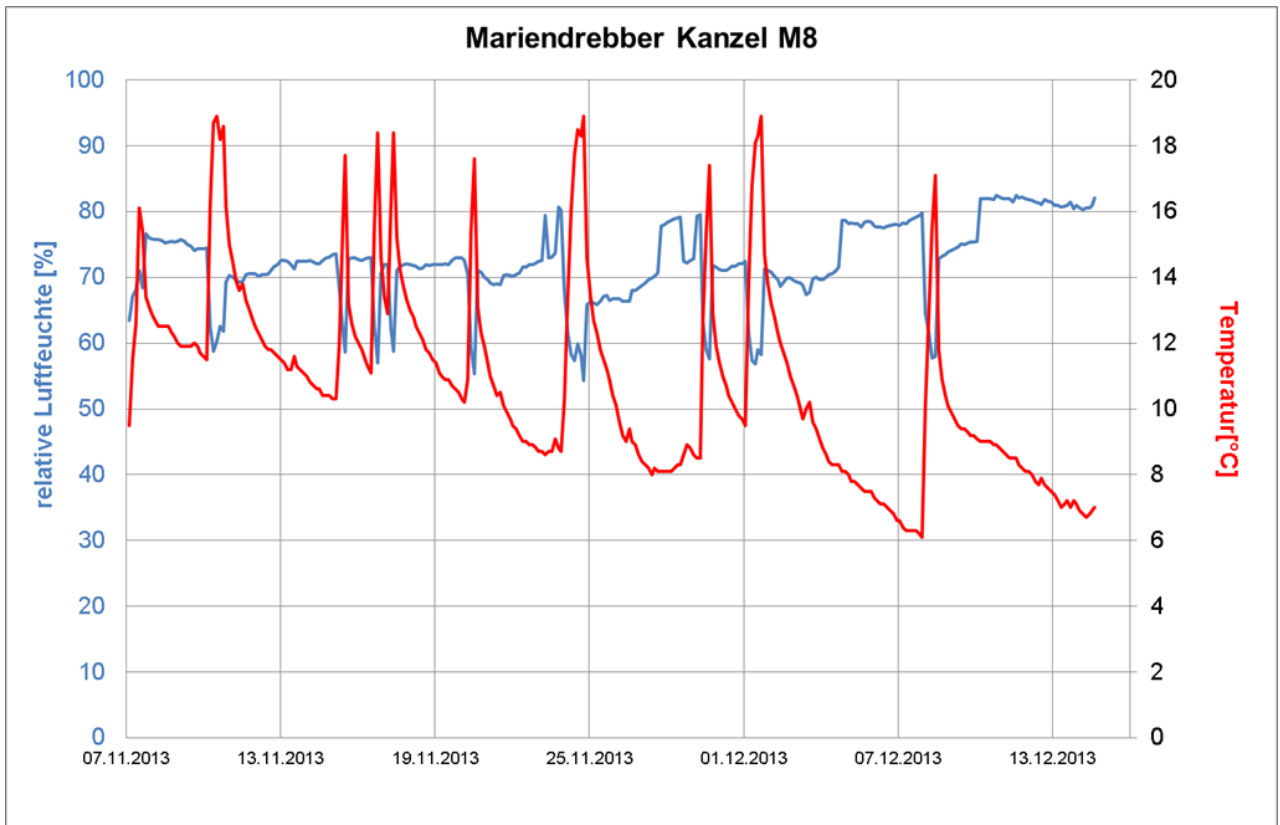


Abb. 22: Klimamessungen innerhalb der Kirche in Belum, Sensor im Bereich der Kanzel

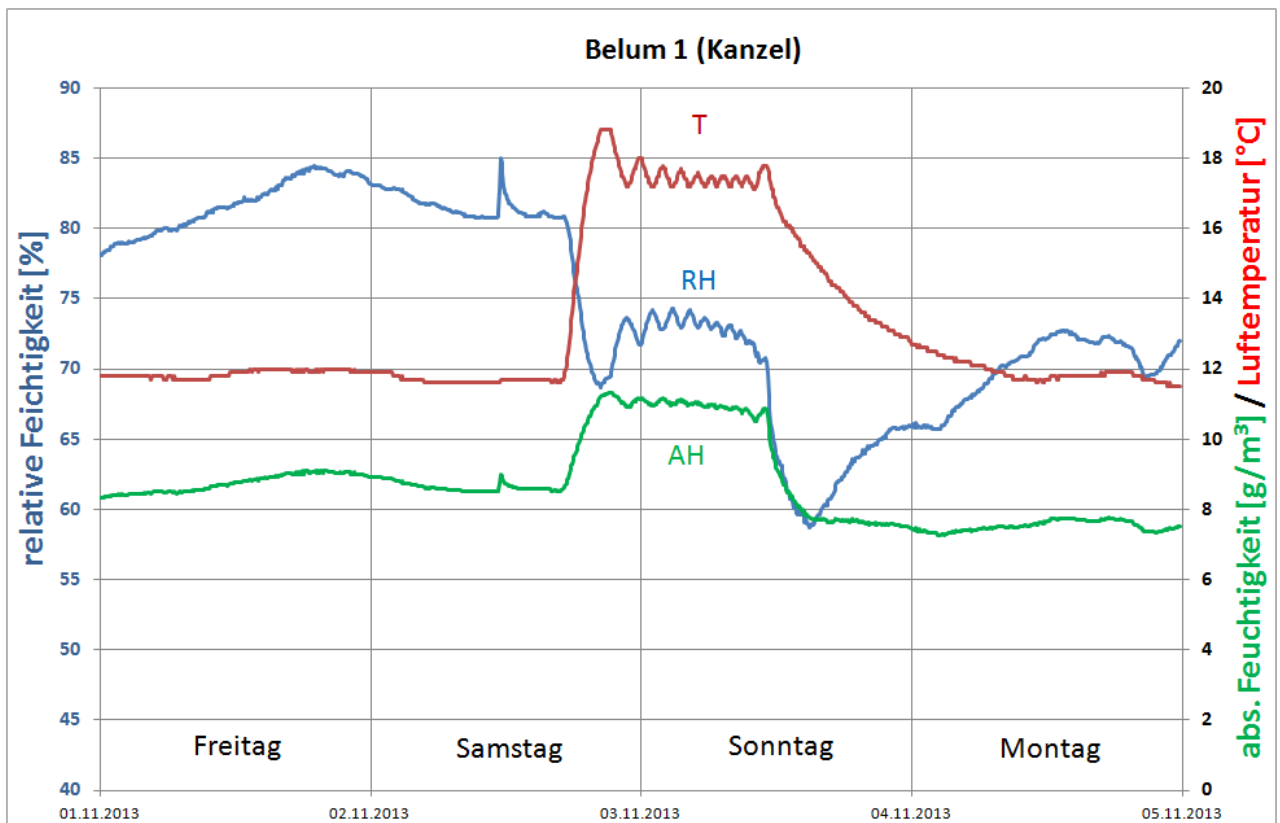


Abb. 23: Klimamessungen innerhalb der Kirche in Belum, Sensoren im Bereich der Kanzel.

Kanzel, die Temperatur 12°C. Mit Einschalten der Heizung am Samstag nachmittag stieg die Temperatur 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 Montag vormittag wieder das Ausgangsniveau von 12°C. Die relative Feuchtigkeit der Luft hatte am Freitag nachmittag im Kirchenraum ein sehr hohes Niveau von über 80% RF. Mit Erhöhung der Raumlufttemperatur 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 Raumluft 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. 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, üblicherweise an kälteren Oberflächen. Dies erscheint aus „Korrosions-sicht“ auch sehr kritisch.

Bei Betrachtung der Messergebnisse in einer Windlade über denselben Zeitraum ergeben sich überraschende Erkenntnisse (Abb. 24). Am Freitag nachmittag lag die Temperatur 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 Temperatursausgleich der Luft findet zwar verzögert, aber in derselben Größenordnung statt. Bezüglich der relativen Feuchtigkeit 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), 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 Samstag Nachmittag 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 (Abb. 23). Kurz darauf wurde der Motor für die Orgel angeschaltet. Auch dieses Ereignis ist mit einem deutlichen Peak der Luftfeuchtigkeit in der Windlade zu erkennen (Abb. 24).

In der Motorbox (Abb. 25) wird die Luft angesaugt und über einen (8-10 m langen) Windkanal der Windlade zugeführt. Die die Motorbox verlassene Luft ist stark aufgewärmt (am Ende des Gottesdienste am Sonntag mittag 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. Auf dem Weg durch den hölzernen Windkanal in die Windlade nimmt die warme Luft Feuchtigkeit auf. Die Temperatur der Luft hat sich bis zum Erreichen der Windlade wieder abgekühlt, so dass hier (Abb. 24) keine nennenswerte Erhöhung der Lufttemperatur gemessen wird. Die relative und absolute Feuchtigkeit der aus der Motorbox während des Orgelspiels gelieferten Luft steigt aber nen-

nenswert an, erkennbar an den deutlichen Peaks am Samstag nachmittag und Sonntag mittag in Abb. 24.

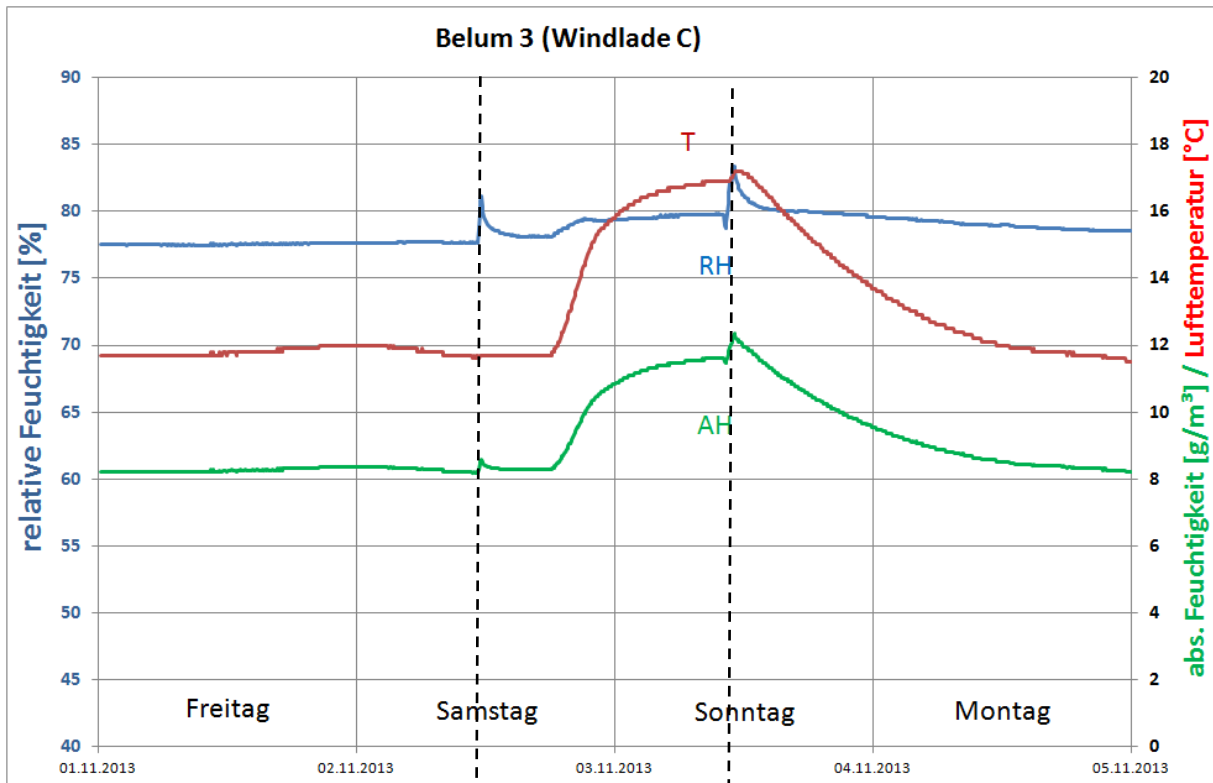


Abb. 24: Klimamessungen in der Windlade der Orgel von Belum, gestrichelte Linien: Orgelspiel

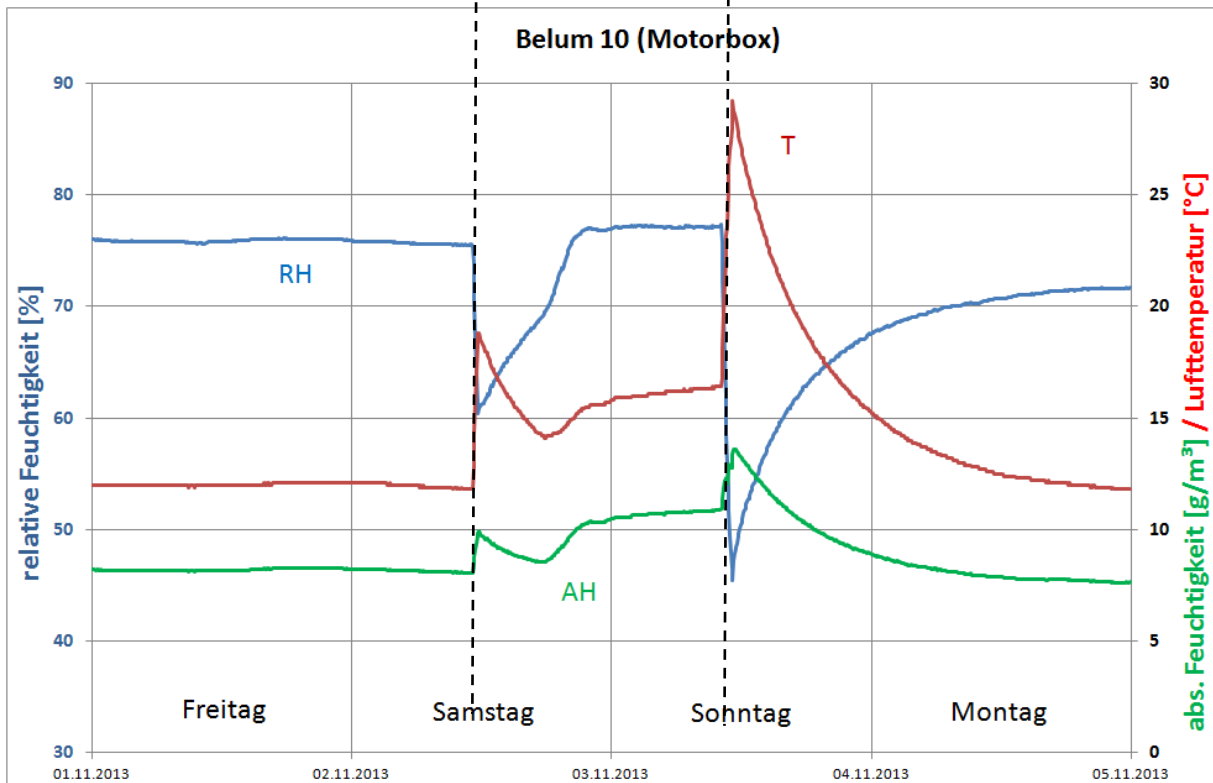


Abb. 25: Klimamessungen in der Motorbox der Orgel von Belum, gestrichelte Linien: Orgelspiel

4.4. Auslagerung von Absorptionsmitteln in Belum

In der Kirche Belum wird in Zeit von Neujahr bis Ostern eine „sogenannte“ Winterkirche durchgeführt, in der die sakralen Veranstaltungen nicht im Kirchenraum direkt, sondern im Nebenraum stattfinden. In diesem Zeitraum wird der Kirchenraum nicht beheizt (siehe z. B. Abb. 19 Januar bis April 2014).

Da für diesen Zeitraum keine Ereignisse wie z. B. Orgelspiel, Heizphasen usw. die klimatischen Zustände in der Kirche und in der Orgel beeinflussen, ergab sich hier die Möglichkeit, die Wirkung möglicher Maßnahmen zur Änderung der Korrosionsbedingungen zu untersuchen.

Aus Gesprächen während verschiedener öffentlicher Projektveranstaltung wurde auch immer mal wieder von den Orgelbauern berichtet, dass in früherer Zeit die Windladen gelegentlich mit Kalk ausgestrichen wurden, möglicherweise um die Emissionssituation hinsichtlich der Essigsäure, aber auch der Feuchteverteilung positiv zu beeinflussen. In einem einfachen Laborexperiment wurde dieser Frage nachgegangen. Um die in den Windladen gemessenen Luftfeuchtigkeiten zu simulieren, wurde in einen Exsikkator eine Ammoniumchlorid-Lösung eingefüllt. Im Gleichgewichtszustand stellt sich dann in dem geschlossenen Gefäß eine relative Luftfeuchtigkeit von 80% RF ein. Im ersten Versuch wurde in den Exsikkator ein Petrischale mit Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gestellt, die nach einer Woche nur eine geringe Gewichtszunahme (als Maß für die Aufnahme von Feuchtigkeit) zeigte (Abb. 26). Das Calciumhydroxid hat mit dem vorhandenen CO_2 im Gefäß Calciumcarbonat gebildet, wobei zusätzlich H_2O -Moleküle frei werden. Das CO_2 war bei diesem Prozess vermutlich schnell verbraucht. Ein Trocknungseffekt wird wohl nicht erzielt.

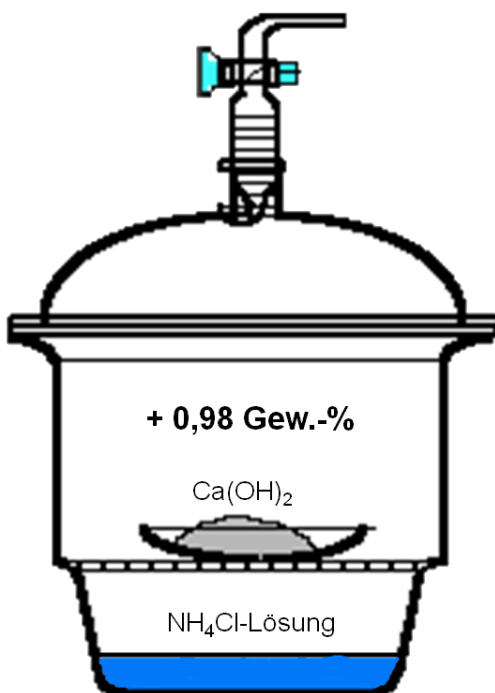


Abb 26: Gewichtszunahme von Calciumhydroxid nach einer Woche in 80% RF.

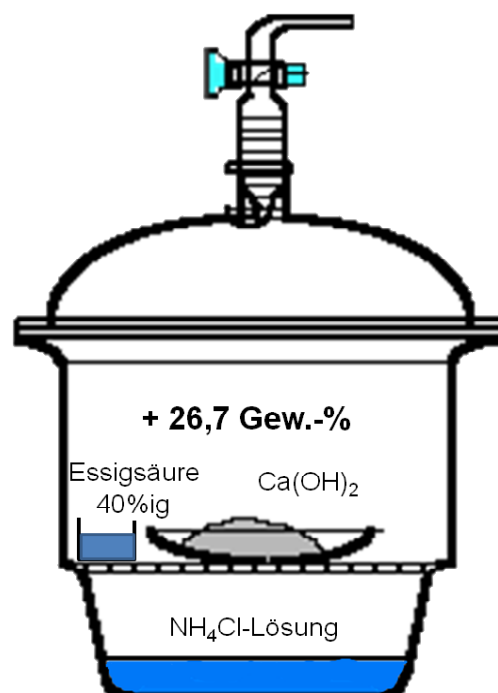


Abb. 27: Gewichtszunahme von Calciumhydroxid nach einer Woche in 80% RF unter Anwesenheit von Essigsäure

In einem weiteren Versuch wurde zusätzlich eine Schale mit 40%iger Essigsäurelösung in den Exsikkator gestellt. Nach einer Woche zeigte die Schale mit dem Calciumhydroxid eine Gewichtszunahme von mehr als 26%. Nachfolgend wurde qualitativ in der Schale Calciumacetat nachgewiesen. Offensichtlich hat die Essigsäure in der Luft zu einer chemischen Reaktion des Calciumhydroxid geführt, wobei Calciumacetat entstanden ist. Dieser Vorgang ist offenbar mit dem Ziel der Neutralisation von Essigsäure in der Gasatmosphäre durchaus geeignet.

Dieser Versuch wurde in den Windladen der Orgel Belum während der Wintekirche wiederholt. Eine mit Calciumhydroxid gefüllte Petrischalen wurde in eine Windlade für 14 Tage ausgelagert (Hauptwerk Cis). In einer weiteren Windlade wurde das Trocknungsmittel Silica-Gel (Hauptwerk C) und in einer dritten Windlade (2. Manual C) beide Absorptionsmittel eingelagert. In der 4. Windlade wurde (2. Manual Cis) als Referenz kein Absorptionsmittel eingeführt. Nach 14 Tagen wurden die Absorptionsmittel wieder entnommen und die Feuchtigkeitsaufnahme mittels Differenzwägung (Darr-Methode) bestimmt.

Zusätzlich wurde zu Beginn der Auslagerung in jede Windlade ein kleiner Silikonschlauch für eine Gasanalyse gelegt, mit dem dann vor Ausbau der Absorptionsmittel die Luft innerhalb der Windlade auf Essigsäure analysiert wurde. Die Ergebnisse der Massenveränderungen und der Gasanalysen sind in Abb. 28 und Tab. 5 zusammengefasst.

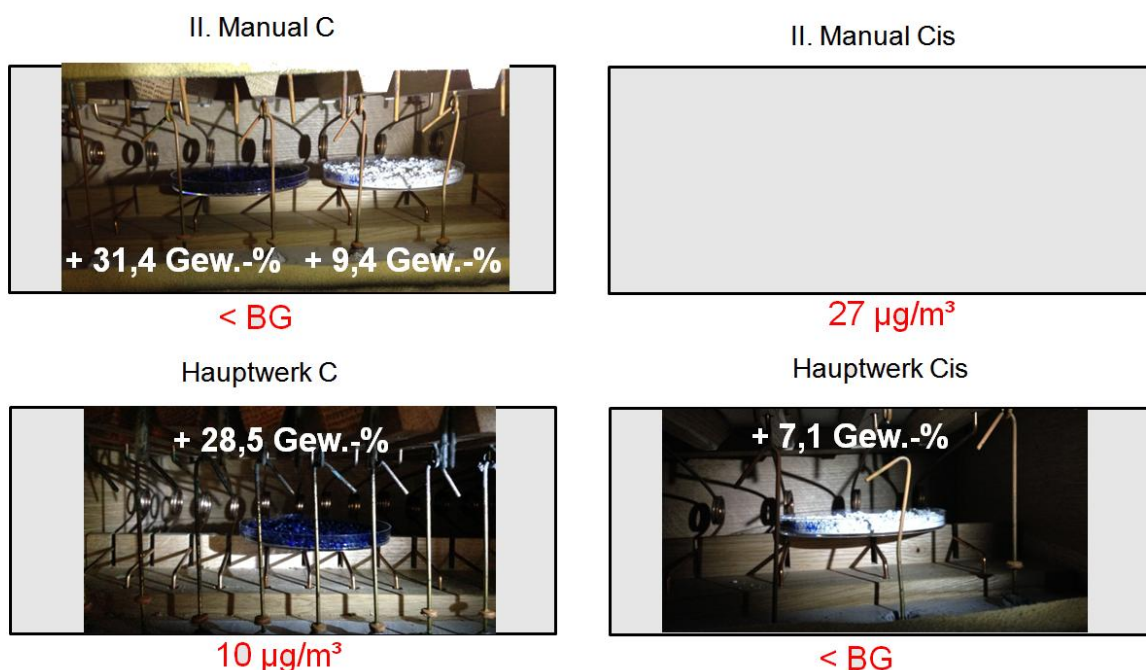


Abb. 28: Schematische Darstellung der vier Windladen in Belum mit Fotos der ausgelagerten Petrischalen, den Gewichtszunahmen (weiße Schrift) und den gemessenen Essigsäure-Konzentrationen (rot) nach 14 Tagen Auslagerung. (Hauptwerk C: Silica-Gel; Hauptwerk Cis: Calciumhydroxid; II. Manual C: Silica-Gel + Calciumhydroxid; II. Manual Cis: ohne Mittel (Referenz))

Da unterschiedliche Mengen an Absorptionsmitteln (zwischen 20 g und 50 g) eingesetzt wurden, sind die Ergebnisse rein qualitativ zu betrachten. Festzustellen ist, dass bei Anwesenheit von Calciumhydroxid der Essigsäure-Gehalt in den Windladen unterhalb der Bestimmungsgrenze abgesenkt wurde. In der Referenz-Windlade II. Manual Cis wurde ein deutlich

messbarer Essigsäuregehalt von $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bestimmt, auch in der nur mit Silica-Gel bestückten Windlade Hauptwerk C war noch ein signifikanter Wert messbar. Die Werte in den anderen beiden, mit Calciumhydroxid bestückten Windladen, lagen unterhalb der Nachweisgrenze ($< \text{BG}$).

Obwohl das eingesetzte Silica-Gel um die 30 Gew.-% Wasseraufnahme zeigte, konnte während des Experimentes eine Feuchteabsenkung nicht deutlich gemessen werden. Lediglich in der Windlade, in der Silica-Gel + Calciumhydroxid ausgelagert wurde, konnte ein messbarer Trocknungseffekt nachgewiesen werden (Abb. , II. Manual C). Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass bezogen auf das Raumvolumen der Windladen, nur eine verhältnismäßig geringe Menge an Silica-Gel verwendet wurde und eine signifikante Feuchtigkeitsabnahme erst bei größeren Mengen feststellbar wäre. Die Ergebnisse zeigen aber, dass eine Trocknung der Luft und eine Neutralisierung der Essigsäure grundsätzlich möglich ist.

Tab. 5: Ergebnisse der Auslagerung von Absorptionsmitteln und Gasanalysen innerhalb der Windladen während der Winterkirche in Belum (BG: Bestimmungsgrenze = $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Positionierung in der Orgel	2. Manual C,	Hauptwerk C,	2. Manual Cis,	Hauptwerk Cis,	Kirchenraum
Maßnahme	Silica-Gel und Calciumhydroxid	Silica Gel	-	Calciumhydroxid	-
Massenzunahme nach 14 d	31,4 % Silica-Gel 9,4 % Ca-Hydroxid	28,5 %	-	7,1 %	
Essigsäure-Analyse	$< \text{BG}$	$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$27 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$< \text{BG}$	Vor den Tasten: $< \text{BG}$

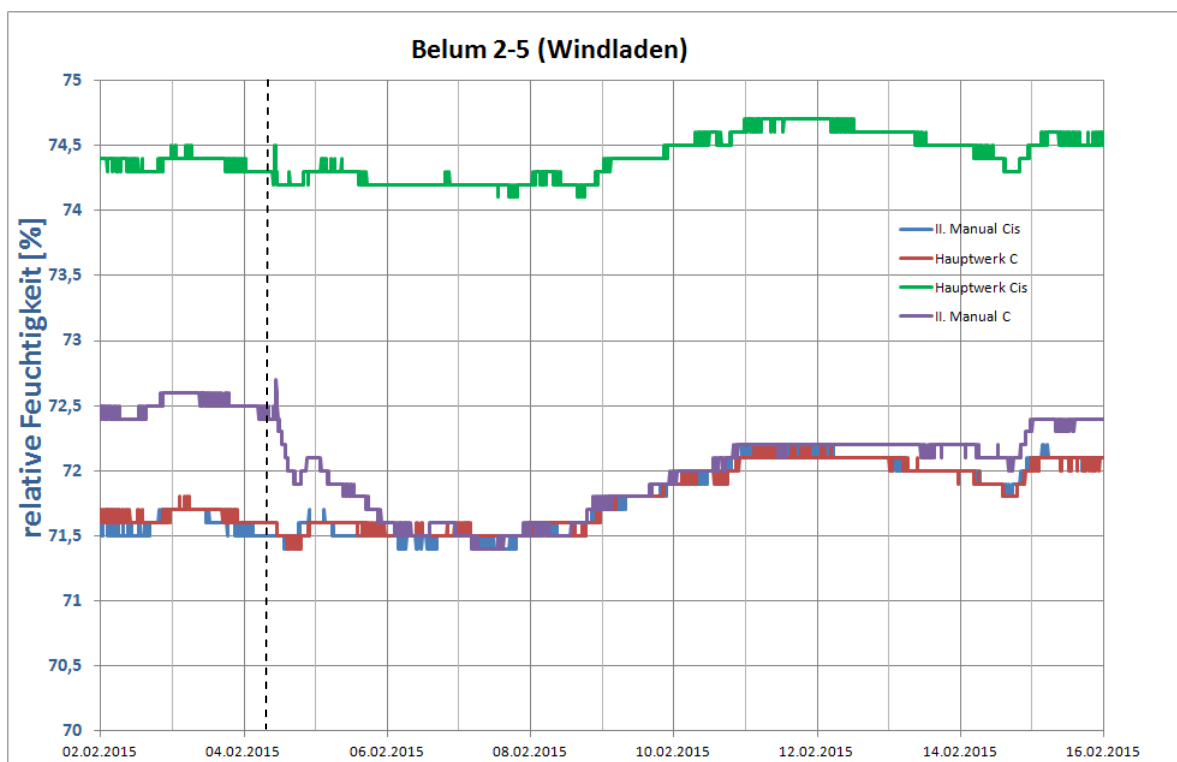


Abb. 29: Verlauf der Luftfeuchtigkeit in den Windladen während der Auslagerung von Silica-Gel und Ca-hydroxid. Nur in der Windlade II. Manual C, in der Silica-Gel + Calciumhydroxid ausgelagert wurden, konnte ein geringer Feuchtigkeitsabfall nach Beginn des Experimentes (04.02.2015, gestrichelte Linie) gemessen werden.

5. Bewertung der Ergebnisse

Die materialografischen Untersuchungen an beschädigten Orgelpfeifen zeigen, dass intensiver Metallangriff von der Innenseite ausgehend auftritt. Dies ist insofern tückisch, als dass der beginnende Korrosionsvorgang von außen zunächst nicht zu erkennen ist. Veränderungen in der Tonhöhe oder Tonqualität werden dann meist nicht mit Korrosion in Verbindung gebracht, so dass der Korrosionsangriff bisher erst zu einem späten Zeitpunkt, wenn der Schaden schon beträchtlich (und ggfs. irreparabel) ist, festgestellt wird. Die aufgefundenen Korrosionsprodukte sind vornehmlich weiß und können keine schützende Deckschicht ausbilden. Der „natürliche“ Schutz des Materials durch Ausbildung einer sehr dünnen, sogenannten Passivschicht ist hier also außer Kraft gesetzt. Gemäß energiedispersiver Röntgenmikroanalysen (EDX) enthalten die Korrosionsprodukte im wesentlichen Sauerstoff (O) und Blei (Pb). Da Bleioxide farbig sind, wird angenommen, dass es sich bei den umfangreichen Ablagerungen vornehmlich um Bleicarbonat und/oder Bleiacetat handelt.

Durch die Auslagerung von frisch gebeizten Bleiprobe innerhalb der Orgel wurde festgestellt, dass schon innerhalb kurzer Zeit nachweisliche Veränderungen auf den Bleioberflächen stattfinden, die für den weiteren Korrosionsfortschritt maßgeblich sind. Schon nach 3 Monaten Auslagerung treten sichtbare Veränderungen auf. Insbesondere auf Proben, die in den Windladen ausgelagert wurden, wurden Acetate gefunden. Acetate sind Salze der Essigsäure und können die Passivierung von Blei, also den Aufbau einer sehr dünnen oxidischen Schicht, die vor weiterer Korrosion schützt, nachweislich stören. Gemessene Schichtdicken von Proben, die Acetate auf den Oberflächen aufwiesen, wiesen meist auch signifikant dickere Schichten an Korrosionsprodukten auf, so dass hier keine Schutzfunktion durch die Ablagerungen mehr angenommen werden kann. Weitere Spezies, die als Korrosionsauslöser in Betracht kommen, wie z. B. Chloride, wurden insgesamt nicht nachgewiesen. Die anfängliche Vermutung, dass dies insbesondere für die Orgel der Kirche Belum aufgrund der Küstennähe (höherer Salzgehalt der Außenluft) eine Rolle spielen würde, hat sich nicht bestätigt.

Acetat bzw. Essigsäure als Auslöser für die Korrosion von Orgelpfeifen wurde schon in dem Forschungsprojekt „Collapse“ beschrieben, welches von der EU im 5. Rahmenprogramm gefördert wurde². Als Quelle für die Essigsäure kommt grundsätzlich das Holz der Orgel in Frage. Abhängig vom Alterungszustand und Baumart können Hölzer aufgrund der Zersetzung des enthaltenen Lignins Essigsäure abgeben. Aber auch Hilfsmittel wie moderne Leime können Essigsäure abspalten.

Die reine Anwesenheit von Acetaten reicht für den Korrosionsvorgang jedoch nicht aus. Es muss zusätzlich Feuchtigkeit vorhanden sein, die ab einem gewissen Wert einen sehr dünnen, nicht sichtbaren Wasserfilm auf der Metalloberfläche bildet, in dem der Korrosionsvorgang dann ablaufen kann. Dazu bedarf es nicht unbedingt einer Kondensation von Wasser an der Oberfläche infolge von Taupunktunterschreitungen. Auch die reine Absorption an den Oberflächen ist grundsätzlich ausreichend. Die umfangreichen Klimaaufzeichnungen haben ergeben, dass grundsätzlich sehr hohe Feuchtigkeitswerte in den Kirchen und innerhalb der Kirchenorgeln vorherrschen und so gute Bedingungen für die Korrosion der Orgelpfeifen (hohe Feuchte und Essigsäureanwesenheit) vorliegen. Eine wichtige, neue Erkenntnis wurde gewonnen, dass das Holz der Orgel auch als Wasserreservoir wirkt. Daher ist zu erwarten, dass die Trocknung der von der Orgel angesaugten Luft erst nach einem mittelfristigen Erreichen eines Gleichgewichtszustandes eine Wirkung zeigen wird. Kurzfri-

² <http://goart.gu.se/collapse/>

stige Abhilfe könnte die Trocknung der Luft unmittelbar vor dem Eintritt in die Windladen durch geeignete Maßnahmen sein. Vorversuche dazu sind bereits durchgeführt worden, können aber nur als orientierend betrachtet werden. Für jedes betroffene Instrument müssen hier individuelle mikroklimatische Analysen und technische Umsetzungen erfolgen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich einige Ansätze ableiten, die für Abhilfemaßnahmen in Frage kommen.

Grundsätzlich gilt, dass jede konkrete Abhilfemaßnahme hinsichtlich Effektivität und Verträglichkeit zu validieren ist!

So ist die Vermeidung von Essigsäure-abgegebenen Komponenten wesentlich, um Korrosion an neuen und noch nicht korrodierten Pfeifen zu verhindern. Seitens der Orgelbauer sollten die verwendeten Betriebshilfsmittel (wie z. B. Klebstoffe usw.) daraufhin geprüft werden, ob Essigsäure abgegeben wird und in Zukunft ebenso wie Hölzer, die Essigsäure abgeben können, vermieden werden. Ebenso ist denkbar, mit neutralisierenden und essigsäureabsorbierenden Innenbeschichtungen (z. B. Kalk) den Essigsäuregehalt in der Luft in den Windladen zu reduzieren.

Es ist zunächst davon auszugehen, dass mit diesen Maßnahmen der Korrosionsfortschritt von schon korrodierten Pfeifen nicht wesentlich reduziert oder gestoppt wird, da hier ja schon Acetate auf den Oberflächen präsent sind und diese auch nicht so ohne weiteres entfernt werden können. Daher sind zusätzliche Maßnahmen zur Reduzierung der Feuchte innerhalb der Orgel empfehlenswert.

Die klimatischen/mikroklimatischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Kirchenraum und Orgel haben sich als sehr komplex herausgestellt und erfordern daher für jede betroffene Kirche eine eigene Bewertung. Daher muß es ein Ziel sein, die Aufzeichnung von Klima- und Mikroklimadaten auch auf andere Kirchen, die von der Korrosion der Orgelpfeifen betroffen sind, auszuweiten.

Die Temperatur im Kirchenraum beeinflusst die mikroklimatischen Bedingungen innerhalb der Orgel. Es hat sich gezeigt, dass trotz gegenteiliger Erwartungen die Temperatur der Luft in den Windladen relativ schnell der Temperatur im Kirchenraum folgt. So werden innerhalb einer Heizungsperiode am Wochenende auch in den Windladen größenordnungsmäßig dieselben Temperaturspitzen erreicht. Die stark schwankenden Luftfeuchtigkeitsverhältnisse dagegen wirken sich auf die Luftfeuchtigkeit den Windladen nicht aus. Allerdings liegt dort eine gleichbleibend sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit vor. Daher ist die Entwicklung und Etablierung eines effizienten Heiz- und Lüftungskonzept zwingend, welches mit den spezifischen Anforderungen weiterer erhaltenswerter Artefakte wie Bilder, Altäre, Epitaphien usw. sowie den Bedürfnissen der Kirchenbesucher abzustimmen ist. Hierzu sind allgemeine Vorschläge schon formuliert worden³, die dann auf den jeweiligen Einzelfall anhand der Mikroklimamessungen angepasst und validiert werden müssen.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die bisherige Praxis der kurzzeitigen starken Erhöhung der Raumtemperaturen des Kirchenraumes (mit Auswirkungen auf die mikroklimatischen Bedingungen in der Orgel) anlässlich von Gottesdiensten oder Konzerten zu vermeiden ist. Es konnte eindeutig nachgewiesen werden, die starke Aufhebung der Lufttemperatur in den Windladen zu einer kurzfristigen Erhöhung der Feuchte führt, und das insbesondere zu einem Zeitpunkt, in der die Orgel gespielt wird. Für den Fall, dass gleichzei-

³ Dario Camuffo, "Microclimate for Cultural Heritage: Conservation and Restoration of Indoor and Outdoor Monument", Elsevier, 2013

tig die in der Windlade vorhandene Luft eine angereicherte Konzentration an Essigsäure aufweist, ist von einer hohen Korrosionsbelastung der Innenwände der Pfeifen auszugehen.

Aus heutiger Sicht wäre eine weitgehend konstante mittlere Temperatur der Raumluft im Kirchenraum anzustreben. Plötzliche Temperaturschwankungen sollten in jedem Fall vermieden werden. Das Behaglichkeitsgefühl der Kirchenbesucher wird weniger durch die Temperatur der Luft als eher durch die Strahlungswärme der Wände und des Inventar bestimmt. Die Temperatur der Oberflächen im Kirchenraum kann aber nicht durch kurzfristige Heizphasen wesentlich erhöht werden. Daher wäre eine gleichbleibende Temperatur auf niedrigerem Niveau vorteilhaft, die anlässlich einer Veranstaltung nur gering erhöht werden müsste. Auch aus energetischer Sicht kann das durchaus vorteilhaft sein.

Die Zuführung von aufbereiteter, also getrockneter Luft in die Orgel mag sinnvoll sein. Aber auch diese Maßnahme ist auf den jeweiligen Einzelfall abzustimmen. Das Holz der Orgeln wirkt als „Wasserreservoir und -puffer“ und ist bei konsolidierenden Maßnahmen zu berücksichtigen. Die in der Motorbox aufgeheizte Zuluft ist hinsichtlich der in der Windlade ankommenden Temperatur unkritisch. Allerdings nimmt die warme Luft auf dem Weg durch die hölzernen Zuluftkanäle Feuchtigkeit auf, die dann in der Windlade ankommt. Trocknungsmaßnahmen sind daher vornehmlich direkt vor dem Eintritt der Zuluft in die Windladen sinnvoll. Auch Auskleidungen der Luftkanäle mit geringer Wasserabsorption wären denkbar.

Das vorliegende Projekt hat einen sehr wichtigen Beitrag zur Ursachenermittlung, zur Anwendbarkeit von Untersuchungsmethoden und zur Ableitung und Bewertung allgemeiner Abhilfemaßnahmen geleistet. Die Ergebnisse wurden im Verlauf des Projektes sowohl national wie auch international einem wissenschaftlichen und auch anwendungsorientierten Publikum vorgestellt und dort diskutiert und anerkannt. Gleichwohl wurde aufgezeigt, dass noch längst nicht alle Zusammenhänge in ihrer Komplexität hinreichend verstanden sind und somit weitere Forschung gefordert ist. So waren Instandhaltungsmaßnahmen an korrodierten Orgelpfeifen, um diese wieder in einen korrosionsbeständigeren Zustand zu überführen, nicht Gegenstand der Untersuchungen und können auch nicht aus den Ergebnissen abgeleitet werden. Hierzu sind weitere und umfangreiche materialwissenschaftliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Da Blei in den letzten dreißig Jahren in der technischen Anwendung außer im Strahlenschutz immer mehr an Bedeutung verloren hat, kann man hier kaum auf neue Erkenntnisse aus anderen Anwendungsbereichen zurückgreifen. Entsprechend hoch ist der Forschungsbedarf. Daher ist es auch eine wichtige und zeitnahe Aufgabe, auf politischer Ebene ein Bewusstsein für diesen Bedarf zu schaffen und nationale und internationale Forschungsförderungen auf die Thematik der Vermeidung der Korrosion historischer Orgelpfeifen auszurichten.

Geschieht dies nicht, ist mittelfristig mit einem Verlust dieses Kulturschatzes zu rechnen.

6. Diskussion der Ursachenanalyse

Es bleibt die Frage, wieso insbesondere in den letzten 20 Jahren über dramatische Verluste von historischem Orgelpfeifenmaterial berichtet wird. Diese Berichte stammen vorwiegend von Orgelbauern, die mit der Pflege und Wartung beauftragt sind, aber z.T. hilflos dem Schadensprozess zusehen müssen.

Dafür lassen sich folgende Gründe angeben:

1. Unkenntnis der Schadensproblematik

Das Wissen über den tatsächlichen Schadensverlauf und die Zusammenhänge von Essigsäureemissionen und erhöhter Feuchtigkeit ist noch nicht lange vorhanden. Insbesondere die Tatsache, dass die Korrosion an der Innenseite der Pfeifen beginnt und letztendlich zu einer Lochfraßkorrosion führt, während an der Außenseite keine Hinweise zu sehen sind, verhinderte ein sicheres Erkennen der Gefahr durch Orgelbauer und -revisoren. Heute ist die Sensibilität dafür vorhanden.

2. Unkenntnis des Werkstoffverhaltens

Blei wird seit Jahrhunderten eingesetzt und gilt erfahrungsgemäß als sehr beständig. Für die meisten technischen Anwendungen (außer Strahlenschutz) wurde es jedoch aus gesundheitlichen und umwelttechnischen Gründen verboten, so dass in den letzten 20 Jahren hauptsächlich zu Alternativen geforscht wurde, jedoch nicht zu Blei. Daher gibt es kaum wissenschaftliche Veröffentlichungen über systematische Untersuchungen mit modernen Untersuchungsmethoden wie der hier angewendeten Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), um das Passivierungsverhalten des Werkstoffes fundiert untersuchen zu können. Ein entsprechendes Wissen hätte man schon früher auf die Problematik anwenden und ggfs. so manchen Schaden abwenden können

3. Unkenntnis über Essigsäureproblematik

Vor 20 Jahren waren die Gefahren von Essigsäure emittierenden Materialien noch nicht bekannt. Die mit der Wartung (und z.T. Neuaufbau) der Orgeln betrauten Orgelbauer verwendeten frisches Eichenholz, was als intensiver Essigsäure-Emitter gilt. Auch in Museen ist dieses Problem mittlerweile bekannt und sehr augenfällig. Als dauerhaft angesehene Eichenmagazine und -vitrinen führen zu erheblichen Problemen bei der Lagerung von Museumsartefakten. Blei-, Silber- und Messingbeschläge zerfallen in kürzester Zeit unter Einwirkung sehr hoher Essigsäure-Konzentrationen zu Acetat-Reaktionsprodukten. Es wurde von Essigkonzentration in betroffenen Vitrinen mit mehr als 4000 ppm berichtet. Aber nicht nur das Holzmaterial selbst gilt als Essigsäurelieferant. Die Orgelbauer verwendeten auch moderne Acetatkleber und -leime, die vor 20 Jahren dem Stand der Technik entsprachen, aber leider die Konzentration an Essigsäure im abgeschlossenen Windsystem weiter erhöhten. Heute sind diese Problematiken den Orgelbauern bekannt.

4. Geändertes Nutzungsverhalten

Das Nutzungsverhalten der Kirchen hat sich in den vergangenen Jahrzehnten grundlegend verändert. Während früher wöchentliche oder gar tägliche Gottesdienste abgehalten wurden, in denen auch die Orgeln gespielt wurden, finden heute z.T. wochenlang keinen Veranstaltungen in den Kirchen mehr statt. Das bedeutet, dass die Luft im Windsystem der Orgeln lange ohne Bewegungen steht und währenddessen die Essigsäure- und Feuchtigkeitskonzentration kontinuierlich ansteigt. Im Moment des ersten Spiels nach einer solchen Pause gelangt diese konzentrierte Luft in die Pfeifenkörper und erhöht die Wahrscheinlichkeit der Schadreaktion.

5. Ungünstige Heizungssysteme

Die Kirchengemeinden streben danach, den immer weniger werdenden Kirchenbesuchern ein angenehmes Raumklima zu bieten und beheizen zu Gottesdiensten die Kirchen in z.T. extremer Weise. In den letzten Jahrzehnten wurden deshalb neue Heizungssysteme eingebaut, die auf Konvektionsbasis in der Lage sind, die Lufttemperatur im Kirchenraum innerhalb weniger Stunden auf eine Temperatur von 19-20 °C aufzuheizen. Aus den Untersuchungen in diesem Projekt wissen wir, dass sich diese schnellen Temperaturschwankungen leicht verzögert, aber in gleicher Intensität im Windsystem angleichen. Möglicherweise ist darin eine Ursache für die dauerhaft hohe Luftfeuchtigkeit im geschlossenen Windsystem zu suchen.

6. Abdichtungsmaßnahmen der Raumschale

Der zunehmende Druck nach Heizkosteneinsparung hat die Gemeinden dazu bewogen, Abdichtungsmaßnahmen an Türen und Fenstern vorzunehmen, z.T. durch Einbau neuer, luftdichter Fenster. Die seit Jahrhunderten vorliegende Zwangslüftung fällt damit weg zusammen mit der regelmäßigen Luftbewegung. In der Vergangenheit stellten die einfach verglasten Fenster Kondensationsflächen für Luftfeuchtigkeit dar. Das an der Innenseite kondensierte Wasser floss in eine Auffangrinne und wurde über Lochkanäle nach außen geleitet. Diese Kondensationsflächen sind nicht mehr vorhanden, so dass die Kondensation an anderen kalten Flächen (z.B. an Wänden und Inventar) stattfindet. In vielen Fällen ist damit auch die zunehmende Schimmelbildung begründbar.

7. Ungünstiges Lüftungsverhalten

Sowohl aus Energiespargründen, aber auch aus Personalmangel werden die Kirchenräume nur noch unzureichend belüftet. War es in vergangener Zeit üblich, dass der Küster die Kirchen regelmäßig lüftete, ist das heute nicht mehr grundsätzlich der Fall. Richtiges Lüften ist essentiell wichtig, um das Raumklima positiv zu beeinflussen. Empfehlenswert sind nicht etwa ständig offene Kippfenster, sondern Stoßlüftung mit möglichst vollständigem Austausch des Luftvolumens. Auch der Zeitpunkt des Lüftens muss sich an den Außenbedingungen orientieren. Wenn die absolute Luftfeuchtigkeit außerhalb der Kirche unter der Luftfeuchte im Kirchenraum liegt, sollten sie Fenster geöffnet werden und niemals umgekehrt. Erfahrene Kirchenverantwortliche wussten um dieser Problematik. Heute bestehen daran Zweifel. Es gibt aber mittlerweile kostengünstige Lösungen entweder halbautomatisch, indem durch Messsysteme günstige Bedingungen angezeigt werden, oder aber vollautomatische Lüftungsmethoden, die über Stellmotoren Fenster oder Zuluftkanäle öffnen und schließen.

8. Konstant hohe Luftfeuchtigkeit

Aus den hier beschriebenen Untersuchungen an zwei betroffenen Orgeln wissen wir, dass im Windsystem zusätzlich eine konstant sehr hohe Luftfeuchtigkeit vorliegt. Die chemische Reaktion der Essigsäure mit dem Bleimaterial der Pfeifen kann nur bei hoher Feuchtigkeit ablaufen. Es ist fraglich, ob diese Situation auch in der länger zurückliegenden Vergangenheit in diese Weise vorgelegen hat. Die genauen Gründe dafür sind zurzeit noch nicht bekannt.

7. Zusammenfassung

Aufgrund des gehäufteten Auftretens von Korrosionserscheinungen an historischen Orgelpfeifen im norddeutschen Raum wurden umfangreiche materialwissenschaftliche Untersuchungen zur Ursachenermittlung durchgeführt. Die Untersuchungen fanden an den historischen Orgeln der St. Vitus Kirche in Belum und der Ev. Kirche St. Marien und Pankratius in Mariendrebber statt.

Neben materialografischen Untersuchungen wurden u.a. Oberflächenanalysen an ausgelagerten Bleiprobe sowie umfangreiche Klimaaufzeichnungen in den Kirchen und direkt in den Orgeln durchgeführt.

Der Korrosionsangriff geht von der Innenseite der Orgelpfeifen aus und ist dementsprechend erst spät feststellbar. Als korrosionsauslösende Komponente wurde Acetat identifiziert, welches in Form von Essigsäure z. B. vom Holz der Orgel abgegeben wird und die Ausbildung einer sehr dünnen schützenden Oxidschicht, einer sogenannten Oxidschicht, auf dem Blei stört und somit dessen Beständigkeit herabsetzt. Als weitere wichtige Einflußgröße ist die Feuchtigkeit zu sehen. In den Kirchen und in den Orgeln wurden sehr hohe Feuchtigkeitswerte ermittelt, die sich korrosionsförderlich auswirken. Das Holz der Orgeln stellt selber ein Wasserreservoir dar, welches Feuchtigkeit wieder abgibt, wenn trockene Luft die Orgel durchströmt.

Die Zusammenhänge der Feuchtigkeit in den Orgelpfeifen mit Orgelinstrument selber und den Klimabedingungen in den Kirchen sind derart komplex und spezifisch, so dass auch für andere befallene Orgeln die Erfassung der spezifischen Klimabedingungen ratsam scheint.

Aus den Untersuchungen lassen sich einige Abhilfemaßnahmen, wie die Vermeidung essigsäureemittierender Materialien, Anpassung des Heiz- und Lüftungsverhaltens der Kirche ableiten, mit denen das Korrosionsrisiko verringert werden kann.

Dabei sollte die bisherige Praxis der kurzzeitigen starken Erhöhung der Raumtemperaturen des Kirchenraumes (mit Auswirkungen auf die mikroklimatischen Bedingungen in der Orgel) anlässlich von Gottesdiensten oder Konzerten möglichst vermieden werden. Es wäre eine weitgehend konstante mittlere Temperatur der Raumluft anzustreben, was aus energetischer Sicht auch durchaus vorteilhaft sein kann.

Diese Maßnahmen sind jedoch im Einzelfall noch zu validieren und betreffen im Wesentlichen neue bzw. unbefallene Orgelpfeifen.

Es sind jedoch noch umfangreiche materialwissenschaftliche Forschungen notwendig, um Möglichkeiten aufzuweisen, wie z. B. die schon korrodierten, aber noch funktionierenden Orgelpfeifen restauriert werden können.

Hierfür ein förderpolitisches Bewusstsein zu schaffen, muss das Ziel aller Beteiligten und Interessierten sein, um mittelfristig weitere Schäden und damit die Zerstörung dieses Kulturschatzes zu verhindern.