

0. Kurzfassung

Im Projekt MATEKUR wurden historische Dachwerke untersucht, die Schäden in Folge von Holzkorrosion (Mazeration) zeigen, wie sie seit Anfang der 1990er Jahre zunehmend beobachtet werden. Einbezogen wurden auch Konstruktionen, die als gefährdet einzustufen sind, weil die Hölzer mit großen Mengen und ggf. mehrfach hochdosiert mit Flammschutzmitteln behandelt wurden. Ein Ziel des Projektes war, den Schadensprozess besser zu verstehen, weshalb der Einfluss der beteiligten Salze und des Umgebungsklimas näher untersucht wurden. Die Resultate von Sanierungen oder Sanierungsversuchen der letzten 20 Jahre wurden dokumentiert und bewertet. An Probeflächen am Dachwerk des Naumburger Domes wurden etablierte und neue Sanierungsansätze erprobt und verglichen. Auf der Basis der Ergebnisse wurden Empfehlungen für den Umgang mit von Mazeration betroffenen Holzkonstruktionen formuliert.

1. Bericht

1.1 Anlass und Zielsetzung

Die Behandlung von Dachstühlen mit salzbasierten, anorganischen Flammschutzmitteln (FSM) im Zweiten Weltkrieg und das dadurch hervorgerufene Auftreten von Mazerationsschäden ist keine regionale Ausnahme, sondern ein Problem, das viele historische Dächer in Deutschland, Tschechien, Österreich, der Slowakei, Luxemburg, Belgien und Polen betrifft. Fast alle Dachwerke der großen mittelalterlichen Kirchen und anderer Baudenkmäler im ehemaligen „Reichsgebiet“ wurden zwischen 1942 und 1945 mit FSM behandelt.



Abb. 1 Naumburg, Dom, Mazeration: Auffaserung der Holzoberfläche. Gut erkennbar sind auch die Abbundzeichen (Dreiecke, sog. „Fähnchen“)

Die als Mazeration bezeichnete Schädigung der Holzsubstanz wird hervorgerufen durch Feuerschutz-Salze, die über die Oberfläche des Holzes eingetragen wurden. Der Schädigungsprozess geht also von der Holzoberfläche aus, an der sich die chemisch-physika-

lischen Vorgänge abspielen, die im vorausgegangenen Projekt MATE beschrieben und denen im Projekt MATEKUR weiter nachgegangen wurde.

Ausgehend von den Ergebnissen des Forschungsprojekts *Mazeration historischer Dachkonstruktionen. Erhebung und Klassifizierung des Schadensumfangs in Sachsen-Anhalt. Entwicklung und Erprobung eines Schnelltestverfahrens (MATE)* wurden bestehende Ansätze für die Sanierung von Dachkonstruktionen, die von der Mazeration bedroht sind, evaluiert und modifiziert, außerdem neue Sanierungsansätze entwickelt und erprobt. Aufwand und Nutzen der erfolgversprechenden Methoden zur Sanierung von Mazerationsschäden wurden bewertet.

Im Projekt MATEKUR konnte der Schadensprozess zumindest annäherungsweise modelliert werden.

1.2 Arbeitsschritte und Methoden

1.2.1 Auslöser und Wirkzusammenhänge der Mazeration

In Folge von hochdosierten FSM-Behandlungen treten, wie im Projekt MATE gezeigt wurde, unterschiedliche Schadensbilder auf. Das Ausmaß der im allgemeinen erst nach Jahrzehnten erkennbaren Schädigung hängt ab von den beteiligten Salzen, die unterschiedlich viel Wasser aus der Umgebungsluft aufnehmen, wodurch sich das Volumen der Salzkristalle mehr oder weniger stark vergrößert. FSM auf Phosphat-Basis bewirken seltener Schäden, während solche, die auf Basis von Alkalisulfaten (z.B. Natriumsulfat/ Ammoniumsulfat) hergestellt wurden, zu stärkeren Mazerationerscheinungen führen (s. 1.2.4.3). Über den Wassergehalt der Umgebungsluft und saisonal auftretende Oberflächenkondensation ist ein Einfluss des Umgebungsklimas gegeben, der im Projekt MATEKUR näher untersucht wurde.

In einem Langzeitversuch, während dessen FSM-behandelte Probekörper bei wechselnder Luftfeuchte gelagert werden, konnte der sehr langsam ablaufende Schadensprozess zumindest annäherungsweise nachgestellt werden. Außerdem wurde das Verhalten unterschiedlicher Holzarten in den Blick genommen. Die als Vertiefungsfälle ausgewählten Objekte wurden auf Phosphate, Fluoride und Sulfate untersucht.

1.2.2 Nachuntersuchung und Bewertung bekannter Sanierungsbeispiele

Seit den frühen 1990er Jahren werden vermehrt Mazerationfälle festgestellt, Sanierungsansätze entwickelt und erprobt. Im Projekt MATEKUR wurden die mittel- und langfristigen Wirkungen verschiedener Ansätze dokumentiert und einer Bewertung unterzogen. Untersucht wurden Konstruktionen, die durch Strahlen oder Abbürsten mechanisch gereinigt wurden, nass gereinigte Hölzer, solche, die Beschichtungen („Maskierungen“) mit film- und nicht filmbildenden Substanzen erhalten haben, sowie Konstruktionen, an denen versucht wurde, die Oberflächenfeuchte durch eine chemische Pufferung zu stabilisieren. In allen Fällen wurden die vorgefundenen Klimaverhältnisse, die 15 bis 20 Jahre nach einer Behandlung bestehende Salzbelastung, der optische Eindruck und die messbare Holzfeuchte der nachbehandelten Konstruktionen in die Untersuchung einbezogen. Sofern verfügbar wurden auch archivalisch überlieferte Daten berücksichtigt. Auf der Grundlage dieser Studien wurden Verfahrensmodifikationen hinsichtlich der Waschverfahren und nicht filmbildender Beschichtungen entwickelt.

1.2.3 Entwicklung neuer Sanierungsansätze

Neue Sanierungsansätze wurden mit der chemischen Überführung der Salze in inerte Verbindungen und der Entsalzung der Hölzer mittels Kompressen gefunden. Diese neuen Ansätze – die Entsalzung mittels Kompressen ist ein in der Steinkonservierung etabliertes Verfahren – wurden zunächst im Labor erprobt, dann an Testflächen am Dachwerk des Naumburger Domes. Im Leitfaden (s. Anhang) werden die geeignet erscheinenden Verfahren und Verfahrenskombinationen und ihre Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

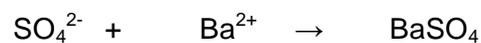
Ergänzend wurden andernorts aktuell erprobte neue Verfahren (Trockeneisreinigung) einbezogen.

1.2.4 Erprobung und Vergleich von Sanierungsansätzen

Insgesamt zehn Probeflächen (F1 bis F10) am stark von Mazerationserscheinungen betroffenen Dachwerk des Naumburger Domes wurden angelegt und über ein Jahr beobachtet, um die Verarbeitungsweise und die mittelfristige (> 1 Jahr) Wirksamkeit unterschiedlicher Verfahren zu vergleichen. Die jeweils etwa 1 m langen Flächen befinden sich auf der Südseite des Langhausdaches an einem gut zugänglichen Riegel in Brusthöhe. Die nahe des Zugangs vom Südwestturm aus befindlichen Flächen wurden nummeriert. Auch nach Abschluss des Projektes sind die Probeflächen weiter zugänglich; sie sollen in regelmäßigen Abständen beobachtet werden (kostenneutrale Nachuntersuchung).

Die Wirkungsmechanismen der versuchsweise eingesetzten Präparate folgen mehrheitlich naturgesetzlichen Abläufen

- Demobilisierung und Inaktivierung durch Fällung z.B.



- Inaktivierung von Säuren durch Neutralisation oder Pufferung
- mechanische Stabilisierung durch Härtings- oder Polymerisationsprozesse
- Kombination der bezeichneten Mechanismen

Die **praktische Umsetzung** der Mechanismen ist von gewissen Unwägbarkeiten geprägt, so müssen die Reaktionspartner bei ungleichmäßiger Verteilung der FSM im inhomogenen Substrat Holz zuverlässig zusammengeführt werden. Auch die Penetrationsgeschwindigkeit der Mittel ist von Bedeutung. Um hier eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen, kann es sinnvoll sein, mehrere Behandlungen mit niedriger Konzentration einer einmaligen bei höherer Konzentration vorzuziehen. Wasser ist sowohl Transportmittel als auch Reaktionsmedium (Ionenreaktionen). Eine Herabsetzung der Oberflächenspannung der Präparate durch Tenside kann die Benetzbarkeit und die Diffusion deutlich verbessern.

Die **Verarbeitung der Zubereitungen** erfolgt generell in wässriger, lösemittelfreier Form und je nach Zusammensetzung in 10 – 30%-iger Lösung oder Emulsion. Zur Aufbringung eignen sich die üblichen handwerklichen Verfahren insbesondere Streichen und Sprühen (Spritzen wenig geeignet!). Zu beachten sind die Arbeitsschutzmaßnahmen, insbesondere bei Zubereitungen auf Basis von Barium (s. u.) und bei alkalischen Präparaten (Silikate, s. u.). Außerdem ist Umsicht bei der Verarbeitung gefordert, denn Streich- und Sprühverluste (Tropfverluste etc.) können Schäden an der Bausubstanz verursachen, wenn die Substanzen z.B. in Kontakt zu Stuck oder Malereien kommen.

Im einzelnen wurden bei den Versuchen in Naumburg, bei den Nachuntersuchungen früher nachbehandelter Objekte und der Dokumentation andernorts laufender Erprobungen die nachfolgend beschriebenen Verfahren berücksichtigt.

1.2.4.1 Reinigungsverfahren

Akute Mazerationsfälle zeigen eine deutliche Auffaserung der Holzoberflächen. Die losen Fasern enthalten neben hohen Salzkonzentrationen häufig auch Rückstände von organischen Holzschutzmitteln, weshalb die Stäube als problematisch anzusehen sind und nicht in den Gebäuden verschleppt werden dürfen. Aus Sicht des Arbeitsschutzes erscheint deshalb eine Reinigung/ Entstaubung der Hölzer (und des Dachraums insge-

samt) am Beginn der Arbeiten jedenfalls sinnvoll. Außerdem lassen sich die meisten anderen Sanierungsverfahren besser auf vorgereinigten Flächen anwenden (s.u.). Bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen sind besondere Schutzmaßnahmen einzuhalten. Der Auftraggeber (z.B. Eigentümer, Bauherr) sowie die Arbeitgeber der ausführenden Gewerke haben Erkundungs- und Informationspflichten zu erfüllen (Arbeitssicherheitsplanung). Die gesetzliche Basis bildet das Arbeitsschutzgesetz. Darüber hinaus enthalten eine Reihe von Verordnungen und deren Regelwerke sowie Vorschriften der Unfallversicherungsträger spezielle Festlegungen.¹

1.2.4.1.1 Handreinigung

Die ersten gründlichen Reinigungsversuche mazerierter Hölzer erfolgten mit Handbürsten. Dabei zeigte sich schnell, dass nur relativ weiche Kunststoffbürsten geeignet waren, die losen Fasern vom Holz zu entfernen, Metallbürsten setzten sich sehr schnell zu und rissen die Holzoberfläche auf. Die folgende Staubentwicklung führte zu erheblichen Problemen des Arbeitsschutzes. Darüber hinaus mussten die Arbeitsbereiche sorgfältig abgeplant werden. Auf der anderen Seite ist der Reinigungseffekt gut und leicht zu steuern, was bei maschinellen Verfahren oft nicht der Fall ist.

Da eine Grundregel für Sicherheit und Gesundheitsschutz hinsichtlich der zu treffenden Arbeitsschutzmaßnahmen lautet, dass der Gefährdung zuerst durch technische Maßnahmen begegnet und zuletzt zu persönlichen Schutzmaßnahmen gegriffen werden soll, ist eine umfangreiche Reinigung per Hand aus der Sicht des Arbeitsschutzes kaum zu rechtfertigen.

Effektiver und weit weniger belastend ist die Handreinigung mit geeigneten Staubsaugern, die mit einem Bürstenkopf bestückt sind. Die relativ weichen Kunststoffbürsten entfernen effektiv Stäube und lose Fasern, die dann leicht zur Entsorgung gesammelt werden können.

1.2.4.1.2 Trockenreinigung mit Bürstenschleifern

Bürstenschleifer sind Elektrowerkzeuge, die zum Schleifen, Strukturieren und Säubern eingesetzt werden können. Die Bürsten sind in unterschiedlichen Materialien (Nylon, Messing) und in verschiedenen Körnungen lieferbar. Die Schleiftiefe ist einstellbar und eine Fremdabsaugung möglich.

Nachteile des Verfahrens bestehen darin, dass nicht alle Flächen an den Holzteilen mit der Maschine erreicht werden können und z.B. kleinteilige Holzverbindungen, Vertiefungen, Spalten oder Risse nachgearbeitet werden müssen.

Zudem besteht die Gefahr, dass bei festen Oberflächen anhaftende Substanzen in das Holz eingearbeitet werden, was auch bei kristallinen Ausblühungen der Fall sein könnte.

Das Verfahren verursacht trotz Fremdabsaugung eine intensive Staub- und Lärmbelastung. Persönliche und organisatorische Schutzmaßnahmen (Arbeitssicherheitsplanung) müssen veranlasst werden.

In Naumburg wurden rotierende Kunststoff- und Messingbürsten verwandt (F3). Weitere Versuche fanden in Meisenheim statt, wo zudem ein Staubsauger und ebenfalls Kunststoff- und Messingbürsten getestet wurden.

¹ Eine ausführliche Darstellung der Problematik gibt es im Abschlussbericht MATE unter Punkt 10.5.: Schlussfolgerungen Arbeits – und Gesundheitsschutz.



Abb. 2 Trockenreinigung mit Staubsauger



Abb. 3 Bürstenschleifer mit Kunststoffbürste

1.2.4.1.3 Nassreinigung mit und ohne dem Wasser beigefügten Tensiden

Ebenfalls häufiger angewandt werden Waschverfahren mit und ohne dem Wasser zugesetzten Tensiden, die zunächst entwickelt wurden, um Rückstände von Bioziden zu entfernen. In Naumburg wurde ein Waschsauger der Firma Kärcher erprobt (F4), wobei dem destillierten Waschwasser ein Tensid zugesetzt wurde.



Abb. 4 Nassreinigung



Abb. 5 Transport Nass-Sauger

Die Reinigung mit dem Waschsauger hat den Vorteil, dass keine nennenswerte Staubbelastung eintritt und somit die Arbeitsschutzmaßnahmen weitgehend reduziert werden können. Weitere Reinigungsmaßnahmen im Nachgang sind kaum erforderlich. Nachteilig ist die Befeuchtung des Holzes, wodurch bei der nachfolgenden Trocknung Salze an die Oberfläche gelangen und dort kristallisieren. Allerdings findet dieser Prozess auch bei trocken gereinigten Hölzern statt, wenn durch hohe Luftfeuchtigkeit Wasserdampf auf den Holzoberflächen kondensiert. Die abgelösten Fasern führen bei den erprobten einfachen Geräten leicht zur Verstopfung der Saugschläuche. Die Entsorgung umfasst auch das abgesaugte Waschwasser mit den darin gelösten Holz- und Flammschutzmittelbestandteilen. Analysen des abgesaugten Wassers zeigten erhebliche Anteile von eluierten Sulfaten.

1.2.4.1.4 Vakuumwaschverfahren

Das Vakuumwaschverfahren ist den Feucht-/Nass-Saug-Reinigungsverfahren zuzuordnen. Es vereinigt einen wasserbasierten Waschprozess mit einer Reinigung durch Absaugen.²

Versuchsweise gab es Anwendungen an Dachkonstruktionen im Bad Doberaner Münster und in der Meißener Albrechtsburg. Vorrangig sollen Biozide aus Holzschutzmitteln aus dem Holz gewaschen werden.³ Bei Anwendungen auf stark aufgefaserten Oberflächen ohne vorgeschaltete Trockenreinigung verstopften die abgelösten Fasern regelmäßig die Mundstücke und Schläuche der Sauger.

1.2.4.1.5 Strahlverfahren (abrasive Verfahren) mit Trockeneis (CO₂-Pellets) oder anderem Strahlgut (organisch, anorganisch)

Bei Strahlverfahren wird ein organisches oder anorganisches Strahlgut (Sand, Partikel aus Kirschkernen u.a.) mit hohem Luftdruck auf die zu reinigende Oberfläche geblasen, so dass lose Bestandteile von dieser entfernt werden.

Das Strahlen mit Trockeneis (CO₂-Pellets) ist ein gängiges Industrieverfahren, das Holzbeschichtungen durch Versprödung lockert.⁴

Durch den Einsatz der Trockeneispartikel mit einer Temperatur von ca. -78°C verspröden Beschichtungen und Verschmutzungen. Der Übergang des eisförmigen CO₂ (ca. 5 bar) in gasförmiges CO₂ (ca. 73 bar) erfolgt mit einer Volumenerhöhung auf das 600- bis 760-fache, in deren Folge sich die versprödeten Schichten ablösen. Durch den Aufprall der Partikel (kinetische Energie) kommt es zu einem Abtrag der Oberfläche.⁵ Dieses Verfahren wird derzeit in Potsdam, Schloss Cecilienhof und im Schloss Bodmer (Mecklenburg-Vorpommern) erprobt. Anzumerken ist zum Trockeneisverfahren allerdings, dass der im Industriegebrauch wichtige Versprödungseffekt, etwa bei der Entfernung von Lacken, bei mazerierten Hölzern keine Vorteile bietet. Nachteilig ist die Verwendung von Trockeneis auf der Baustelle durch erhebliche Transport- und Lagerprobleme. Gegenüber anderen Strahlverfahren ist dagegen von Vorteil, dass kein Strahlgut zu entsorgen ist, sondern nur die Menge der abgestrahlten Holzfasern. Beim Trockeneisverfahren müssen überdies Hautverletzungen durch Kälte ausgeschlossen werden. Das entstehende CO₂ ist schwerer als Luft und sammelt sich am Boden. Bei erhöhter Konzentration besteht Erstickungsgefahr.⁶

Die Anlage von Probeflächen in Schloss Cecilienhof bestätigte die geschilderten Probleme bei der Verwendung von Trockeneis. Hinzu kam im Vergleich zu herkömmlichem Strahlgut ein mangelhaftes Ergebnis mit sehr rauen Oberflächen.

Andere Strahlverfahren verursachen eine größere Lärm- und Staubbelästigung bei inzwischen allerdings guten Reinigungsergebnissen, die stark von der Qualifikation des Reinigers abhängen. Durch aufwändige persönliche Schutzmaßnahmen muss sichergestellt werden, dass weder das Strahlgut noch die gelösten Partikel eingeatmet werden. Das Strahlgut muss zusammen mit den abgelösten Holzfasern aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden. Allerdings stellte sich die entstehende Menge bei den Versuchen in Cecilienhof als überraschend gering dar. Danach ist meist eine weitere Reinigung erforderlich.

1.2.4.2 Oberflächenverfestigung

Die Strukturlockerung oder die Stukturauflösung kann es sinnvoll erscheinen lassen, Mittel zur Verfestigung der mazerierten Holzoberflächen einzusetzen. Um die Oberflächen

² Vgl. WTA Merkblatt1-9 Ausgabe: 11.2013/D, Dekontamination von Holzschutzmittel belastetem Holz, Teil 2: Verfahren zur Abreicherung, S.8

³ Ausführliche Information im Abschlussbericht zum Projekt Az 17314 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

⁴ Vgl. WTA Merkblatt 1-9 Ausgabe 11.2013/D Dekontamination von Holzschutzmittel belastetem Holz, Teil 2: Verfahren zur Abreicherung, S.10.

⁵ Ebenda, S.10

⁶ Ebenda, S.10

optisch möglichst wenig zu verändern, kommen hier synthetische und natürliche Bindemittel in Betracht, als solche sind beispielhaft zu nennen Polyacrylate und andere Polymere in gelöster oder dispergierter Form oder trocknende Öle bzw. Modifikate (Alkydharze) in gelöster oder emulgierter Form. Der Bindemittelgehalt der Zubereitungen ist so einzustellen, dass kein zusammenhängender Film entsteht, aus optischen Gründen und um Diffusionsvorgänge (den Austausch mit der Umgebung) nicht vollständig zu unterbinden. Den Zubereitungen, die möglichst tief und gleichmäßig von der Holzoberfläche aufgenommen werden sollen, können ggf. weitere Stoffe oder Additive zur Unterstützung der Wirksamkeit beigefügt werden. Ziel der Behandlung ist eine (nicht sichtbare) dauerhafte Verklebung der Zellulosefasern zur Stabilisierung der Holzoberflächen.

Natriumsilikat (Natronwasserglas) ist wasserlösliches Salz der Kieselsäure und härtet an der Luft unter Bildung von wasserunlöslichen Polysilikaten aus. Insofern ist Natriumsilikat als anorganisches Bindemittel zu verstehen, das zur Verfestigung und mechanischen Stabilisierung verwendet werden kann. Die wässrigen Lösungen von Alkalisilikaten sind stark alkalisch und neutralisieren Säuren zuverlässig. Silikat behandelte Hölzer zeigen einen deutlich erhöhten Feuerwiderstand. Nachteilig ist der Umstand, dass durch die Behandlung weitere Salze (Natrium) eingebracht werden und durch die Polysilikate eine Farbvertiefung und wenig ansprechende Veränderungen der Holzoberflächen eintreten können.

1.2.4.2.1. Trockenreinigung und Verfestigung mit Natriumsilikat

Nach der mechanischen Reinigung wurde eine Probefläche in Naumburg mit Natriumsilikat eingestrichen (F8).

Natriumsilikat (Natronwasserglas) ist ein wasserlösliches Salz der Kieselsäure und härtet an der Luft unter Bildung von wasserunlöslichen Polysilikaten aus. In so fern ist Natriumsilikat als anorganisches Bindemittel zu verstehen, das zur Verfestigung und mechanischen Stabilisierung verwendet werden kann. Die wässrigen Lösungen von Alkalisilikaten sind stark alkalisch und neutralisieren Säuren zuverlässig. Silikat behandelte Hölzer zeigen einen deutlich erhöhten Feuerwiderstand. Nachteilig ist der Umstand, dass durch die Behandlung weitere Salze (Natrium) eingebracht werden und durch die Polysilikate eine Farbvertiefung und wenig ansprechende Veränderungen der Holzoberflächen eintreten können.

1.2.4.2.2. Trockenreinigung und Beschichtung mit einem Präparat auf Basis eines nicht filmbildenden Polyacrylates

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurde eine Fläche mit einem nicht filmbildenden Polyacrylat beschichtet (F5).

1.2.4.2.3. Trockenreinigung und Beschichtung mit einem Präparat auf Basis eines Alkydharzes

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurde eine Fläche mit einem Alkydharz beschichtet (F6).

1.2.4.3. Umwandlung

Zweifelsfrei wird die Mazeration durch Anionen aus den anorganischen FSM ausgelöst, wobei die Art und die Konzentration derselben den Umfang des Schadens prägen. FSM enthalten hohe Mengen an Alkalisulfaten und/oder -phosphaten. Unter Alkali-Salzen sind hier vornehmlich (bis ausschließlich) die Ammonium- und Natriumsalze zu verstehen.

Primäre Merkmale der Ammoniumsalze sind die Hydrolyse und Freisetzung von Schwefelsäure und Phosphorsäure, deren Acidität die Holzsubstanz unter Verlust an Festigkeit (Angriff des Lignins) entgegen zu wirken versucht. Die Natriumsalze hingegen weisen eine hohe Hygroskopizität auf und beeinflussen die Holzfeuchte maßgeblich. Weiter ist den Natriumsalzen zu eigen, dass sie im Wechsel der Umgebungsfeuchte einen hohen Kristallisationsdruck durch Wasseranlagerung entwickeln können. Sowohl die Hydrolyse der Ammoniumsalze als auch die Rekristallisationsneigung der Natriumsalze tritt nur in

Verbindung mit Feuchtigkeit auf, so dass als weitere Komponente die Umgebungsfeuchte und deren Differenzen von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Die Aktivität der Alkalisalze kann durch Überführung in wasserunlösliche oder zumindest wenig lösliche Verbindungen beseitigt werden.

Im Falle der Sulfate und Phosphate oder deren Mischungen bietet sich die Fällung als Erdalkalisalze an, denn die Sulfate und Phosphate von Calcium und Barium (ggf. Strontium) sind praktisch wasserunlöslich und absolut hydrolysefest. In der Natur kommen Calciumsulfat als Gips und Bariumsulfat als Schwerspat (Baryt) vor, sie sind inert, immobil und untoxisch. Die Applikation kann in Form der Acetate (Calciumacetat bzw. Bariumacetat) in wässrigen Lösungen erfolgen. Gleichzeitig wirken die Erdalkaliacetate neutralisierend auf freie Säuren.

Die Behandlung erfolgt durch ein- bis mehrmaliges Beschichten der betroffenen Oberflächen mit einer ca. 10%-igen Acetatlösung, je nach Sulfat- und/oder Phosphatgehalt (Voruntersuchung!). Es resultiert eine geringe Aufhellung der Oberfläche in Folge der Gips- bzw. Barytbildung, die Reaktion ist irreversibel und quantitativ.

In der Praxis stellt sich bei den Versuchen zur Inaktivierung des Schadensprozesses durch Applikation von Barium- oder Calciumacetatlösungen das Problem der Flächendosierung, da die FSM nicht überall in der gleichen Dosis aufgebracht wurden und demzufolge nicht überall dieselbe Menge Barium- oder Calciumacetat umgesetzt werden kann.

Da sich die chemischen Reaktion zur Überführung der Salze in stabile Verbindungen im oberflächennahen Bereich abspielt, kann eine Veränderung der mechanischen Holzeigenschaften im Sinne einer Versprödung o. ä. ausgeschlossen werden.

Ebenso sind keine negativen Folgen der im Verlauf der Reaktion freiwerdenden Essigsäure zu erwarten, da diese im durchlüfteten Dachraum rasch verdunstet.

Die Barium- oder Calciumacetatbehandlung hat keinen Einfluss auf die DDT-, Lindan und PCP-Problematik.

1.2.4.3.1. Trockenreinigung und Beschichtung mit Bariumacetat

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurden zwei Flächen mit einer unterschiedlich hoch konzentrierten Bariumacetatlösung eingestrichen (F9, F10).

1.2.4.3.2. Trockenreinigung und Beschichtung mit Calciumacetat

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurde eine Fläche mit einer Calciumacetatlösung eingestrichen (F7).

1.2.4.4. Entsalzung

Im Bereich der Natursteinkonservierung sind Verfahren etabliert, die mittels Kompressen, die auf die Oberflächen aufgelegt werden, substanzschädliche Stoffe aus dem Stein entfernen. Insbesondere Salzbelastungen können so reduziert werden. Dieses Verfahren wurde zunächst unter Laborbedingungen auf Hölzer übertragen, die mit FSM definiert vorbehandelt worden waren (s. u.) und dann an zwei Probeflächen in Naumburg getestet.

1.2.4.4.1 Trockenreinigung und Entsalzung mit einer Zellulosekompresse, befeuchtet mit destilliertem Wasser

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurde eine Fläche mit einer Zellulosekompresse belegt, die mit destilliertem Wasser befeuchtet war (F2). Der Zellulosebrei wurde per Hand an liegenden und auch hängenden Flächen etwa 10-12 mm dick aufgebracht und leicht ange-drückt.



Abb. 6 Kompressen, oben rechts Holzoberfläche nach Abnahme, 3 Monate nach der Anbringung

Vier Wochen nach der Anbringung wurde die Kompressen teilweise abgenommen, teilweise belassen, um zu beobachten, ob sich Schimmel bildet oder andere Nebenwirkungen eintreten. Das abgenommene Material wurde auf Sulfat und Phosphat untersucht.

1.2.4.4.2 Trockenreinigung und Entsalzung mit einer Zellulosekompressen, befeuchtet mit destilliertem Wasser mit Tensid-Zusatz

Nach der mechanischen Reinigung mittels rotierenden Kunststoffbürsten und angeschlossenem Staubsauger wurde eine Fläche mit einer Zellulosekompressen belegt, die mit destilliertem Wasser, dem ein Tensid zugesetzt wurde, befeuchtet war (F1). Die Verarbeitung und weitere Behandlung entsprach der mit destilliertem Wasser befeuchteten Kompressen.

1.2.4.5 Pufferung

Der Freisetzung von Säuren (Hydrolyse) und dem wechselnden Kristallisationsdruck kann man durch Abpuffern der Säure und Konstanthaltung der Systemfeuchte entgegenwirken. Hierzu eignen sich die Salze von (schwachen) organischen Säuren wie z.B. Milchsäure, Essigsäure etc., angewandt in Form wässriger Lösungen vorzugsweise von Kaliumlactat. Kaliumlactat bindet die freien Säuren und hält die Holzfeuchte konstant. Damit sind dem Mazerationsprozess die wesentlichen Voraussetzungen entzogen.

Schwierig gestalten sich allerdings auch hierbei die Feststellungen der notwendigen Aufwandmengen (Flächendosierung). Eine konkrete Aussage zur Wirkungsdauer der Kaliumlactatbehandlung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich, ein interessanter Nebeneffekt ist der Umstand, dass Stoffe wie Kaliumlactat auch zu einer Reduzierung der Belastung mit Organochlorinsektiziden durch Zersetzung derselben führen. Dies betrifft z.B. DDT, HCH und PCP.

Versuche mit Kaliumlactat wurden 1997 im Lutherhaus, Wittenberg, und 2003 in St. Stephan, Tangermünde, gemacht. Da die Ergebnisse nicht zufriedenstellend ausgefallen sind – die Puffer haben sich offenbar erschöpft – wurde auf entsprechende Versuche in Naumburg verzichtet.

1.3 Ergebnisse

1.3.1 Modellierung des Schadensprozesses: Ergebnisse des Wechsellagerungsversuchs

Ein Anliegen des Projektes war es, erneut zu versuchen die Schadensmechanismen im Fall der Mazeration zu verstehen und unter Laborbedingungen zu reproduzieren.

Mit diesem Ziel führte bereits Andreas Schwar 2004 im Rahmen seiner Dissertation⁷ Untersuchungen durch. Er versuchte an behandelten Hölzern durch thermische und hygri-sche Wechsellagerung Mazerationsprozesse auszulösen. Dies gestaltete sich ausgesprochen schwierig. Insbesondere aus mikroskopischen Untersuchungen ergaben sich zumindest Hinweise auf beginnende Strukturschäden.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden in Abstimmung mit dem beteiligten Projektpartner und Holzschutzexperten Hans-Norbert Marx Holzproben mit einem von ihm bereitgestellten Flammschutzmittel getränkt, um diese sodann ausschließlich einer hygri-schen Wechsellagerung auszusetzen. Damit sollte der Einfluss von nur zwei Einflussgrößen, in diesem Fall der Holzsorte sowie der Lagerung unter wechselnden Luftfeuchtebedingungen, untersucht werden.

Für den Wechsellagerungsversuch wurden drei verschiedene Hölzer eingesetzt.

- Kiefersplintholz Einschlag 03/2010
- Fichtensplintholz Einschlag ca. 2009
- Fichtensplintholz Einschlag < 1750

Parallel zu diesem Versuch sollte ermittelt werden, wie sich die Sorptionseigenschaften des Holzes durch Behandlung mit Feuerschutzsalz verändern. Die für die Untersuchungen der Sorptionseigenschaften und die Tests zur hygri-schen Wechselbeanspruchung notwendigen Holzproben wurden durch Dr. Ute Schoknecht, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), zur Verfügung gestellt und formatiert. Die Konzeption der Versuche sowie die Abstimmung der Versuchsplanung erfolgten unter Anleitung von Hans-Norbert Marx.

Probenvorbereitung für die Bestimmung der Sorptionseigenschaften:

1. Lagerung der Proben 100 x 30 x 4 mm bei einer Raumlufffeuchte von 55%-60% rel. F und ca. 10-20°C
2. Beschriftung der Proben
3. Bestimmung der Ausgangsmasse der Proben
4. Tränkung der Probe in 10%iger Flammschutzmittellösung
5. Anlegen von Unterdruck -0,8 bis -0,85 bar bis Blasenfreiheit plus Wartezeit (insgesamt ca. 2 h)
6. Belüftung des Exsikkators
7. Lagerung der Probe bis zum nächsten Morgen (ca. 20 h)
8. leichtes Abtupfen der Probe
9. Bestimmung der Masse der Probe
10. Lagerung der Probe bei Raumlufffeuchte 55%-60% rel. F und ca. 10-20°C
11. Bestimmung der Trockenmasse

Probenvorbereitung für hygri-sche Wechsellagerung durch eine Tränkung mit Hilfe von Unterdruck (Probenserie 1)

1. Lagerung der Proben 100 x 30 x 20 mm bei einer Raumlufffeuchte von 55%-60% rel. F und ca. 10-20°C

⁷ Schwar, A. Physiko- Mechanische Untersuchungen des Schadensmechanismus bei Dachstuhl-hölzern durch spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel .Dissertationsarbeit an der Fakultät Bauingenieurwesen und Stadtplanung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, betreut durch Prof. Dr. Ing. habil- E. Kothe und Prof. Dr. rer. Nat., habil. Ing. R. Frey, Tag der Disputation 15.04.2004.

2. Beschriftung der Proben
3. Bestimmung der Ausgangsmasse der Proben
4. Tränkung der Probe in 10%iger Flammschutzmittellösung
5. Anlegen von Unterdruck -0,8 bis -0,85 bar bis Blasenfreiheit plus Wartezeit (insgesamt ca. 2 h)
6. Belüftung des Exsikkators
7. Lagerung der Probe bis zum nächsten Morgen (ca. 20 h)
8. leichtes Abtupfen der Probe
9. Bestimmung der Masse der Probe
10. Lagerung der Probe bei Raumluftfeuchte (55%-60% rel. F und ca. 10-20°C)
11. Bestimmung der Trockenmasse

Probenvorbereitung für hygri sche Wechsellagerung durch eine Tränkung unter Normaldruck (Probenserie 2)

1. Lagerung der Proben 100x30x20 mm bei Raumluftfeuchte (55%-60% rel. F und ca. 10-20°C)
2. Beschriftung der Proben
3. Bestimmung der Ausgangsmasse der Proben
4. 24 Stunden Tränkung der Probe in 30%iger Flammschutzmittellösung
5. leichtes Abtupfen der Proben
6. Bestimmung der Masse der Probe
7. Ermittlung der Salzaufnahme in g/m²
8. Trocknung der Probe unter Raumklimabedingungen bis zur Massekonstanz

Probenbezeichnung	Probenabmessung [mm]	Bearbeitung	Behandlung	Methode der Behandlung	Angabe der aufgenommenen Salzmenge Mittelwert aus fünf Proben	
Kiefernspineholz Einschlag 03/2010						
1.1.1	100x30x4	sägerauh	unbehandelt	Unterdruck	148,5 g/m ²	87,1 kg/m ³
1.1.2	100x30x20	sägerauh	getränkt			
1.2.1	100x30x20	gehobelt	unbehandelt	Unterdruck	374,5 g/m ²	69,9 kg/m ³
1.2.2			getränkt			
1.3.1	100x30x20	gehobelt	unbehandelt	24 Lagerung	300,4 g/m ²	56,1 kg/m ³
1.3.2			getränkt			
Fichtenspineholz Einschlag ca. 2009						
2.1.1	100x30x4	sägerauh	unbehandelt	Unterdruck	141,7 g/m ²	83,1 kg/m ³
2.1.2	100x30x20	sägerauh	getränkt			
2.2.1	100x30x20	gehobelt	unbehandelt	Unterdruck	252,6 g/m ²	47,2 kg/m ³
2.2.2			getränkt			
2.3.1	100x30x20	gehobelt	unbehandelt	24 Lagerung	165,0 g/m ²	30,8 kg/m ³
2.3.2			getränkt			
Fichtenspineholz Einschlag < 1750						
3.1.1	100x30x4	sägerauh	unbehandelt	Unterdruck	111,8 g/m ²	65,6 kg/m ³
3.1.2	100x30x20	sägerauh	getränkt			
3.2.1	100x30x20	sägerauh	unbehandelt	Unterdruck	162,2 g/m ²	30,3 kg/m ³
3.2.2			getränkt			
3.3.1	100x30x20	sägerauh	unbehandelt	24 Lagerung	99,6 g/m ²	18,6 kg/m ³
3.3.2			getränkt			

Tabelle 1 Berechnung der flächen- und volumenbezogenen Salzaufnahme der Holzprobekörper

Im Ergebnis der Probenvorbereitung standen von jeder der genannten Holzproben je fünf unbehandelte und fünf mit Unterdruck behandelte Holzproben der Abmessung 100 x 30 x 4 mm sowie fünf unbehandelte, fünf mit Unterdruck sowie fünf unter Normaldruck getränkte Holzprobekörper mit der Abmessung 100 x 30 x 20 mm zur Verfügung.

Nach dem Abschluss der Probenvorbereitung war wie erwartet festzustellen, dass die unterschiedlichen Tränkungstechnologien der Holzproben sowohl flächen- wie auch volumenbezogen zu deutlichen Unterschieden in der Salzaufnahme führten (siehe Tabelle 1). Aus Vorversuchen innerhalb des Vorgängerprojektes *Mazeration historischer Dachkonstruktionen, Erhebung und Klassifizierung des Schadensumfangs in Sachsen-Anhalt Entwicklung und Erprobung eines Schnelltestverfahrens (MATE)* zur Untersuchung der Verbreitung der Mazeration sowie aus der Literatur (s. Literaturverzeichnis) und Archivadokumenten ergab sich der Hinweis, dass die Feuerschutzsalze aus sehr unterschiedlichen Salzgemischen bestehen können, mit einem breiten hygrischen Übergangsbereich zwischen vollständiger Kristallisation und vollständiger Lösung der Feuerschutzsalze. Wie sich dies auf das Sorptionsverhalten behandelter Hölzer im Vergleich zu unbehandelten Referenzproben auswirkt, wurde durch die Bestimmung der Sorptionsisothermen der Hölzer sowie einer reinen Salzprobe untersucht (s. Diagramme 1 und 2). Trotz der Verwendung sehr dünner Probekörper von nur 4 mm Dicke benötigte die Bestimmung der Sorptionsisothermen einen langen Zeitraum von Mai 2012 bis Januar 2014.

Aus der Darstellung der Sorptionsisothermen wird erkennbar, dass die Probekörper mit Feuerschutzsalz ab einer relativen Luftfeuchte von 76% rel. Feuchte unabhängig von der Holzart und dem Einschlagalter fast in gleichem Maß erheblich sorptiv Feuchtigkeit aufnehmen. Insbesondere für die Praxis ist dieser Aspekt von Relevanz. Oberhalb von 76% bis 92% relativer Luftfeuchte lagert das behandelte Holz der Dachstühle ohne direkte Befeuchtung bis zu 25% Masseprozent Feuchtigkeit ein, mit allen für Holzbaustoffe damit verbundenen Schadensszenarien.

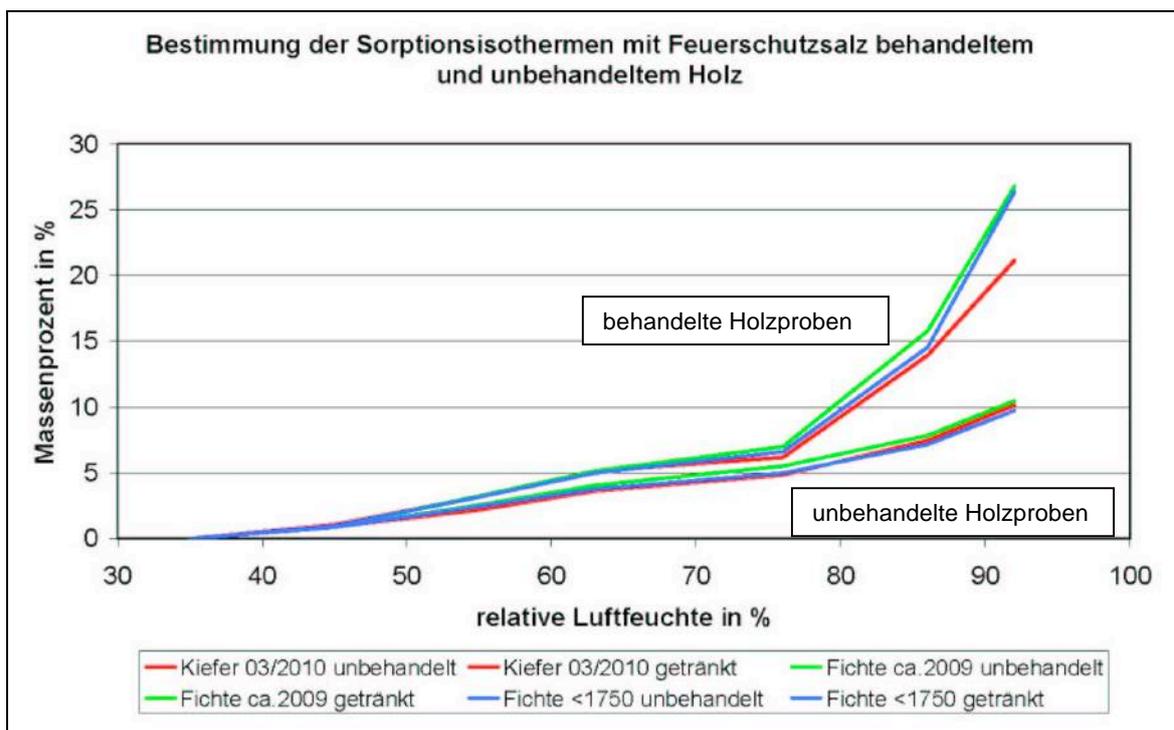


Diagramm 1 Darstellung des Verlaufs der Sorptionsisothermen der mit Feuerschutzsalz behandelten Proben 1.1.2, 2.1.2 und 3.1.2 sowie der unbehandelten Proben 1.1.1, 2.1.1 und 3.1.1

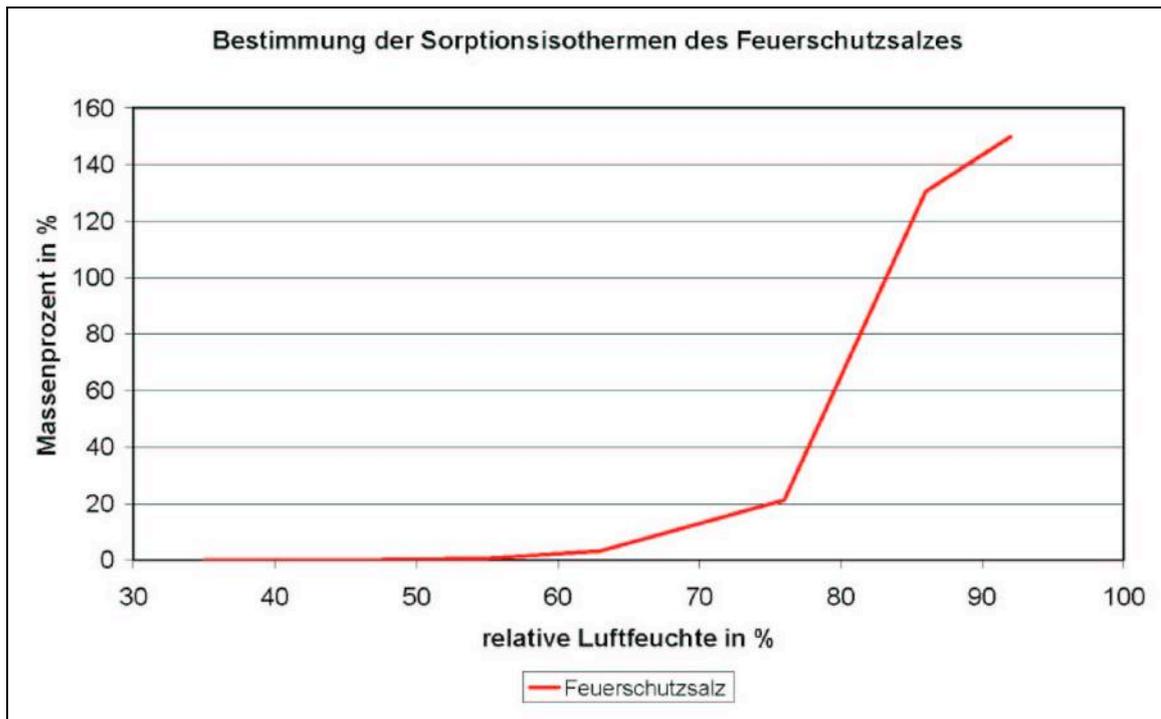


Diagramm 2 Darstellung des Verlaufs der Sorptionsisothermen des reinen Feuerschutzsalzes

Bei der Beurteilung der Sorptionsisothermen des untersuchten Feuerschutzsalzes fällt auf, dass diese von den Sorptionswerten aus dem Vorgängerversuch deutlich abweichen. Mögliche Ursachen dafür könnten in der unterschiedlichen Zusammensetzung der verwendeten Feuerschutzsalze oder in den deutlich längeren Verweilzeiten im vorliegenden Versuch begründet sein.

Die hygri sche Wechsellagerung der unbehandelten und behandelten Holzproben erfolgte in einem Exsikkatorschrank (s. Abb. 7). Die Konditionierung der relativen Luftfeuchte auf 92% und 35% rel. Feuchte wurde durch Einleiten der Exsikkatorluft in gesättigte Natriumcarbonat- bzw. Calciumchloridlösung im Umluftprinzip mit Hilfe einer Aquarienpumpe ermöglicht. Dieser Versuchsaufbau erwies sich als robust und für den Dauerbetrieb geeignet.

Einer Erprobung bedurfte der Zeitraum, innerhalb dessen sich die entsprechende relative Luftfeuchte im Exsikkatorschrank einstellte und zur vollständigen Lösung bzw. zur Kristallisation der Salze führte. Für den Dauerbetrieb der Wechsellagerung erwies sich eine jeweilige Verweildauer von ca. 12 Tagen pro Luftfeuchte als notwendig, so dass ein vollständiger Zyklus etwa 24 Tage in Anspruch nimmt. Dies lässt erkennen, welche Zeiträume für einen derartigen Versuch einzuplanen sind.

Maß für die jeweilige Änderung der relativen Luftfeuchte sind Lösungserscheinungen bzw. das Auskristallisieren des eingelegten Feuerschutzsalzes. Durch diese Vorgehensweise soll sichergestellt werden, dass sich die Kristallisationsdrücke im Holzgefüge tatsächlich aufbauen können. Um die jeweiligen Zeiträume zu straffen, wird in der Phase der Befeuchtung eine Schale mit Wasser eingestellt sowie in der Phase der Trocknung ein Trockenmittel mit dem Namen Desi Pak. Insgesamt konnten seit dem Beginn des Versuches am 16.05.2012 88 Wechsellagerungen erfolgen und damit 44 vollständige Zyklen realisiert werden. In den Eck- und Kantenbereichen zeigen sich inzwischen erste Lockerungen des Holzgefüges. Von der Reproduktion des Schadensbildes, welches aus der Praxis bekannt ist, kann man jedoch noch nicht sprechen (s. Abb. 8).



Abb. 7 Der Prüfaufbau zur Erzeugung der hygrischen Wechselbeanspruchung entspricht dem Prüfaufbau zur Untersuchung der Sorptionseigenschaften



Abb. 8 Ansätze einer Lockerung des Holzgefüges in den Eckbereichen nach dem 44. Wechsellagerungszyklus

Parallel zu den systematischen Wechsellagerungsversuchen erfolgte ein Versuch mit Feuerschutzsalz getränkten Pappstreifen. In der Praxis wurde immer wieder beobachtet, dass die Hinweisschilder zur Holzschutzbehandlung auf den Dachstühlen extrem mazeriert und aufgequollen sind. Aus diesem Grund durchliefen ein behandelter und ein unbehandelter Pappstreifen ebenfalls den Wechsellagerungsversuch bis zum Auftreten von Stockflecken und Schimmel. Zum Zeitpunkt des Abbruchs des Versuches nach ca. 42 Wechsellagerungszyklen trat keine optische oder haptische Veränderung der Pappstreifen auf, die sich auf Mazerationseffekte zurückführen lassen (s. Abb. 9).



Abb. 9 In Feuerschutzsalz getränkte Pappstreifen nach 30 Wechsellagerungszyklen

Aus dem Wunsch heraus die Belastung zu erhöhen, um dadurch die Zyklenzahl der Simulation zu reduzieren, erfolgten drei weitere Tastversuche.

Bei dem ersten Versuch handelte es sich um den Salzsprengtest, der auf dem Gebiet der Natursteinuntersuchung bekannt ist und durch die DIN 52111 beschrieben wird.

In Anlehnung an diesen Test wurden die Probekörper aus Kiefernspiltholz in gesättigter Lösung aus 1:1 Ammoniumphosphat- und Natriumsulfatlösung getränkt, bei 60 °C getrocknet und erneut getränkt. Insgesamt durchliefen die Proben neun Mal diesen Test ohne erkennbare makroskopische Gefügeschäden (s. Abb. 10). Die meisten Sandsteine weisen nach einem solchen Wechsellagerungstest erheblich Gefügeschäden auf.

Parallel dazu erfolgte dieser Versuch mit 30%iger Feuerschutzsalzlösung über acht Zyklen der Tränkung in gesättigter Lösung und anschließender Trocknung, ebenfalls ohne erkennbare Schädigung des Kiefernholzgefüges (s. Abb. 11).

Bei dem dritten Tastversuch wurde ein Holzprobekörper mit der Stirnseite 10 mm tief in 10%ige Schwefelsäure gestellt. Verschlössen in einer Flasche wurde die Probe wiederholt bis auf 60°C erwärmt.

Insgesamt lagerte die Probe ca. 9 Monate in der Lösung und veränderte ihre Färbung aber ohne erkennbare Gefügeschäden (s. Abb. 12).



Abb. 10 In gesättigter 1:1 Natriumsulfat- und Ammoniumphosphatlösung getränkte Kiefernholzsplintprobe nach 9 Zyklen der Trocknung und erneuter Tränkung in der Salzlösung



Abb. 11 In 30%iger Feuerschutzsalzlösung getränkte Kiefernholzsplintprobe nach 8 Zyklen der Trocknung und erneuter Tränkung in der Salzlösung



Abb. 12 Fichtensplintholzprobe nach ca. neun Monaten Lagerung der Stirnseite 10 mm tief in 10 %iger Schwefelsäure

Im Ergebnis der bisherigen Untersuchungen ist festzustellen, dass sich aus der hygrischen Wechsellagerung behandelter Holzprobekörper Hinweise auf beginnende Mazerationsschäden ergaben. Das bisherige Schadensbild ist aber noch nicht so signifikant, als dass es als eine Reproduktion jenes Schadensbildes gelten kann, das aus der Praxis bekannt ist. Da der Versuchsaufbau relativ robust und leicht zu bedienen ist sowie auch langfristig keine zu großen technischen oder personellen Ressourcen bindet, wird er auf absehbare Zeit weitergeführt.

1.3.2 Ergebnisse der Klimauntersuchungen

Ein Aspekt der Ursachenforschung zu den unterschiedlich stark ausgebildeten Schadensbildern der Holzmazeration bei ähnlicher Behandlungsstärke mit Feuerschutzsalzen beschäftigte sich mit der Erfassung der klimatischen Bedingungen in ausgewählten Dachstühlen. Dazu wurden durch die Projektgruppe 17 Dachräume ausgewählt, in denen die relative Luftfeuchtigkeit und Raumlufttemperatur erfasst wurden. Alle Objekte wurden auf Phosphat und Sulfat untersucht. An dieser Stelle ist den 16 Ansprechpartnern an den Bauwerken für ihre teilweise umfangreiche Hilfe noch einmal ausdrücklich zu danken. Für die Aufzeichnung der relativen Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur kamen 15 Messgeräte der Firma testo vom Typ 174 sowie zwei Thermo-Hygro-Stationen von TFA-Germany Kat.- Nr. 30.3015 zur Anwendung. Die Auswertung und Zusammenstellung der Messwerte erfolgte mit Hilfe der Comfort Software Professional V3.1 der Firma testo.

Bedingt durch unterschiedliche Geräteprogramme für die Klimaaufzeichnung wechseln die Werteachsen für die relative Luftfeuchte [% rel F] bzw. die Lufttemperatur [°C] zwischen der linken und der rechten Seite der Diagramme. Die durchgezogenen blauen Gitternetz-inien beziehen sich immer auf die relative Luftfeuchte. Einheitlich werden alle Werteverläufe der relativen Luftfeuchte als rote Kurven und die der Lufttemperatur als grüne Kurven dargestellt. Die Raumklimaaufzeichnungen in den folgenden Bauwerken begannen im Zeitraum zwischen dem 23.02. und dem 02.07.2012 und endeten zwischen dem 19.02. und dem 25.06.2013. Die Aufzeichnungszeiträume an den einzelnen Bauwerken sind in den jeweiligen Diagrammlegenden vermerkt.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass, wie vermutet, starke Schwankungen der **Luftfeuchte** und periodisch eintretende sehr hohe Luftfeuchtwerte den Schadensverlauf begünstigen. Dies wird im wesentlichen bestätigt durch die an den 17 ausgewählten Objekten über ein Jahr gemessenen Luftfeuchtwerte. So weisen besonders jene Objekte deutliche Schäden auf, an denen starke Schwankungen und/oder sehr hohe Luftfeuchtwerte ermittelt wurden: Schlosskirche Meisenheim, Dom zu Naumburg, St. Stephan in Tangermünde, Schloss Oranienbaum, Albrechtsburg Meißen, Lutherhaus Wittenberg, Klosterkirche Wechselburg, Rathaus Brandenburg, Dom zu Zeitz; vgl. die nachfolgenden Diagramme 3-19.

Diagramm 3 Schloss Meisenheim

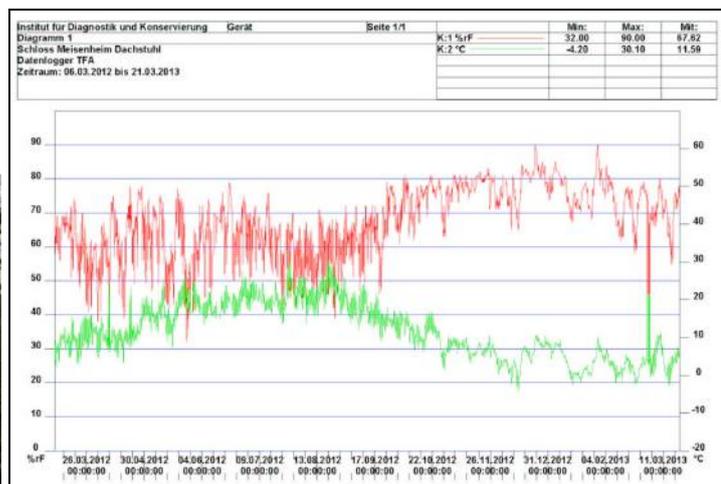


Diagramm 4 Soest, Wiesenkirche
Foto: Dr. Strohmann

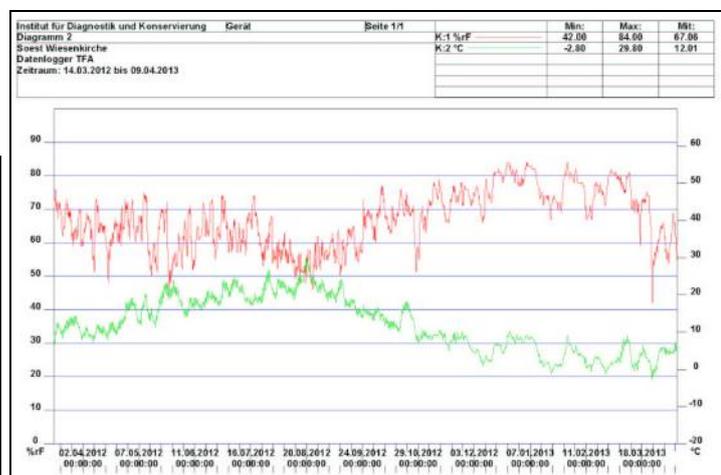


Diagramm 5 Naumburg, Dom

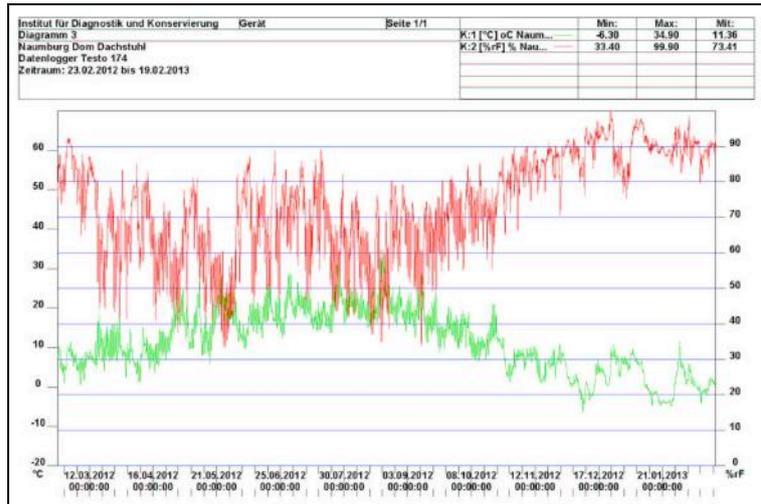


Diagramm 6 Merseburg, Dom

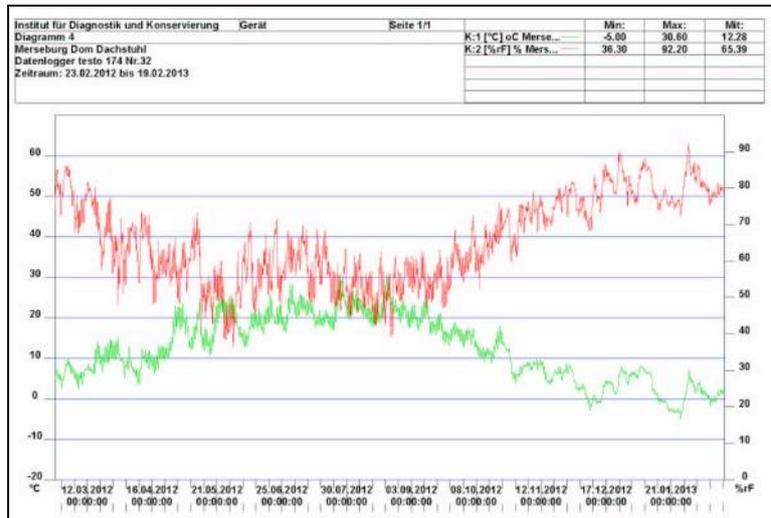


Diagramm 7 Weimar, Goethes Gartenhaus

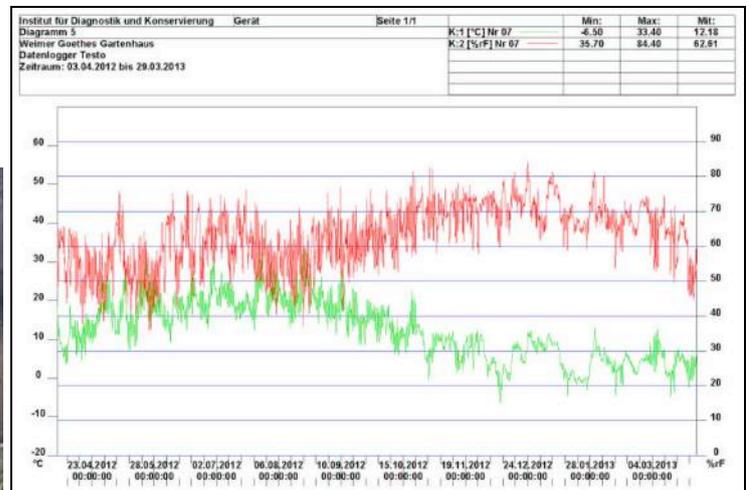


Diagramm 8 Weimar, Römisches Haus

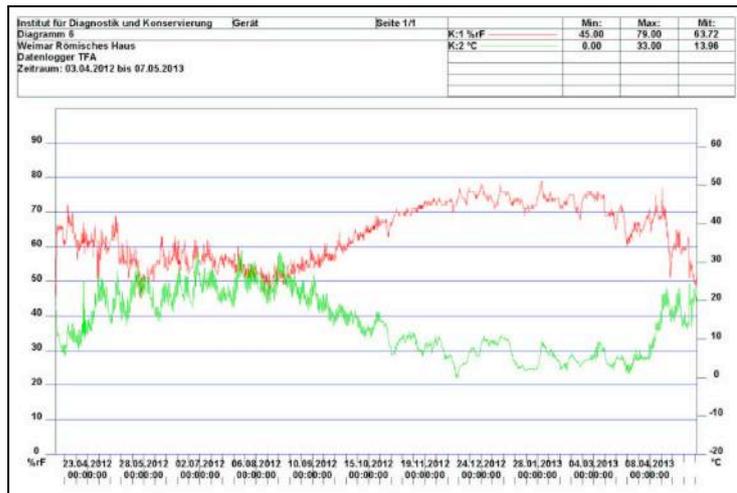


Diagramm 9 Tangermünde, Altes Rathaus

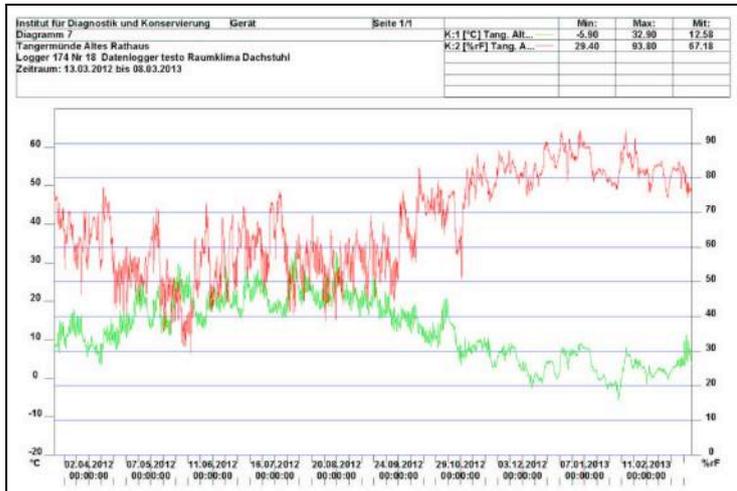


Diagramm 10 Tangermünde, St. Stephan

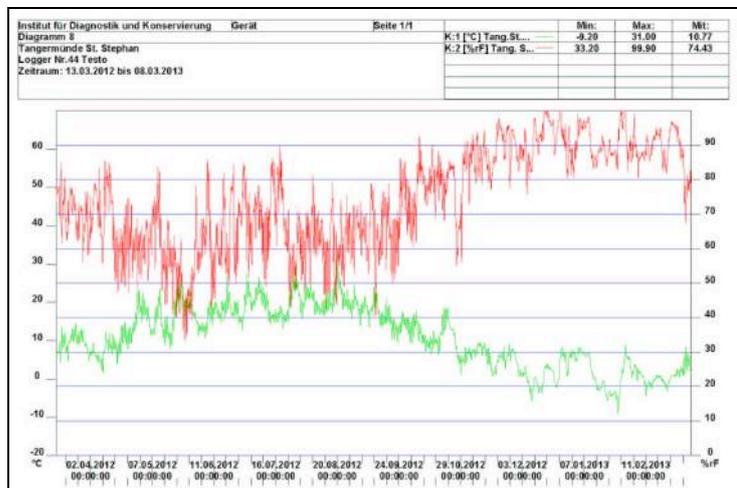


Diagramm 11 Gotha, Schloss Friedenstein

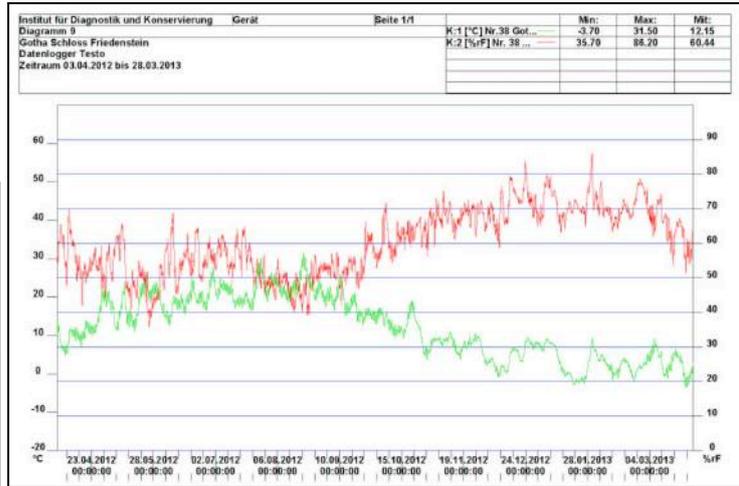


Diagramm 12 Schloss Oranienbaum

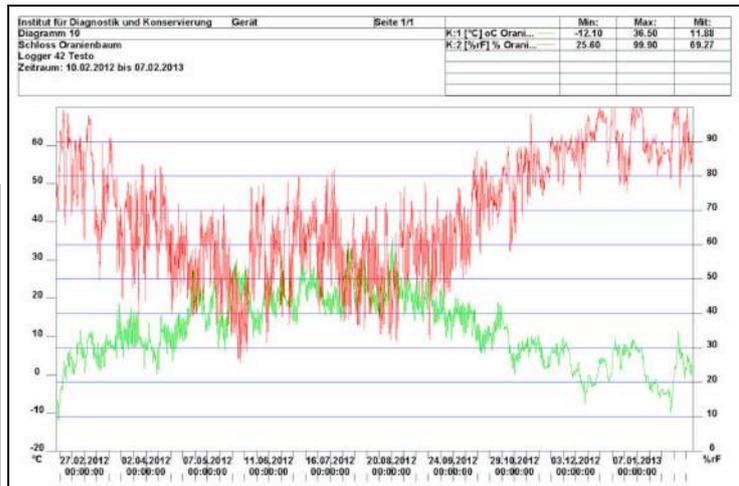


Diagramm 13 Wörlitz, Gotisches Haus

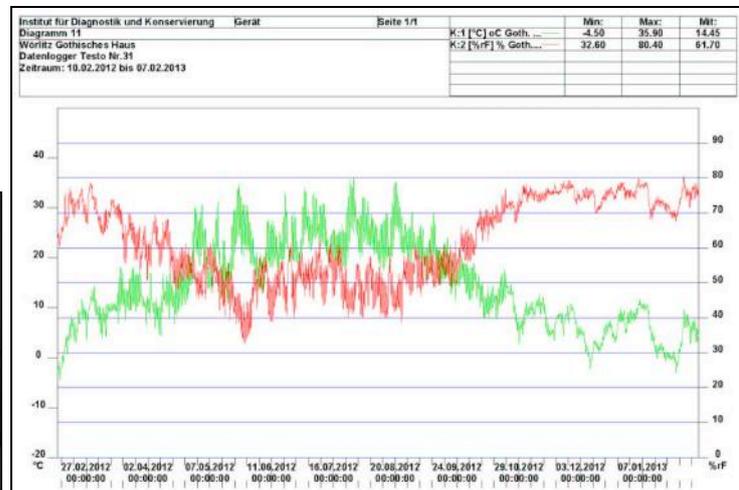


Diagramm 14 Meißen, Albrechtsburg

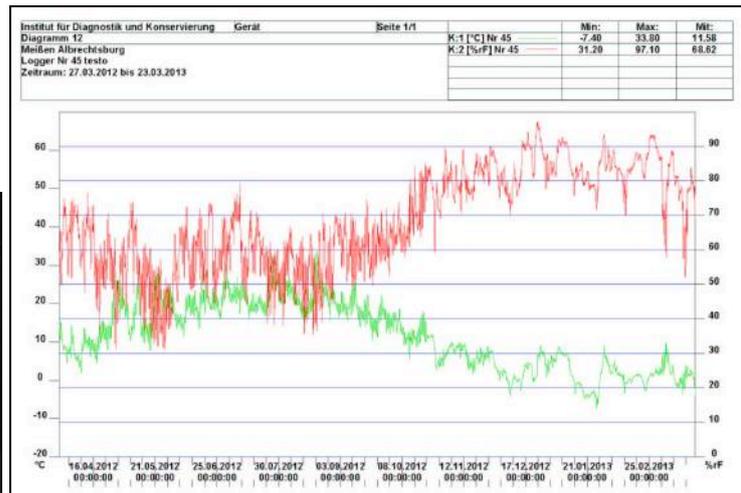


Diagramm 15 Meißen, Dom

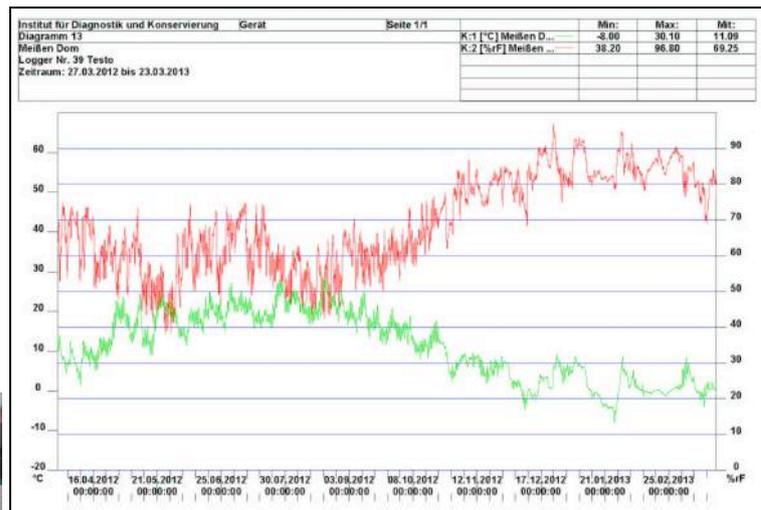


Diagramm 16 Wechselburg, Klosterkirche

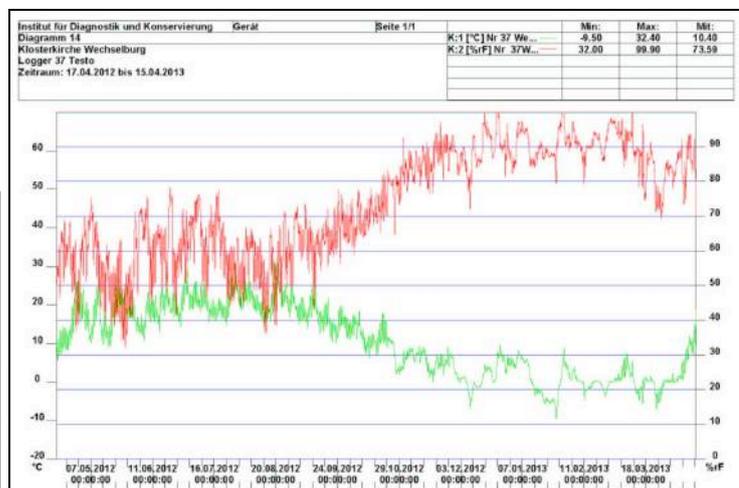


Diagramm 17 Wittenberg, Lutherhaus



Institut für Diagnostik und Konservierung		Gerät	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
Diagramm 15				K:2 [%rF] ref. F L...	40.20	96.60	75.53
Wittenberg Lutherhaus, Dachstuhl				K:1 [°C] Temp. Lu...	-9.70	30.90	8.87
Datenlogger testo 174							
Zeitraum: 21.08.2012 bis 21.06.2013							

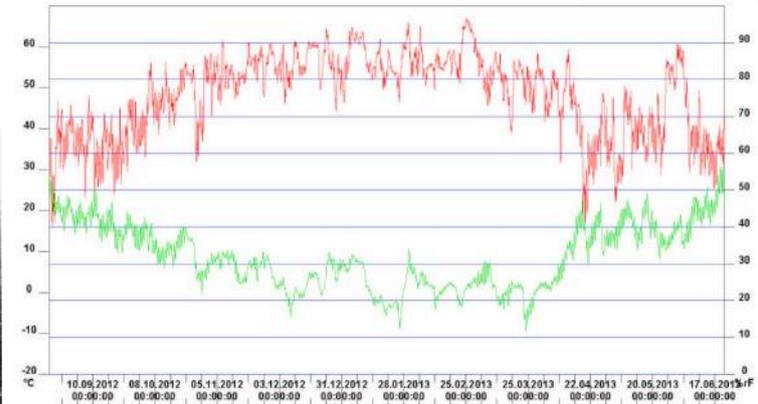


Diagramm 18 Brandenburg, Rathaus



Institut für Diagnostik und Konservierung		Gerät	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
Diagramm 16				K:1 %rF	28.00	88.00	66.69
Brandenburg Rathaus Dachstuhl				K:2 °C	-8.40	35.80	12.03
Datenlogger TFA							
Zeitraum: 29.02.2012 bis 08.04.2013							

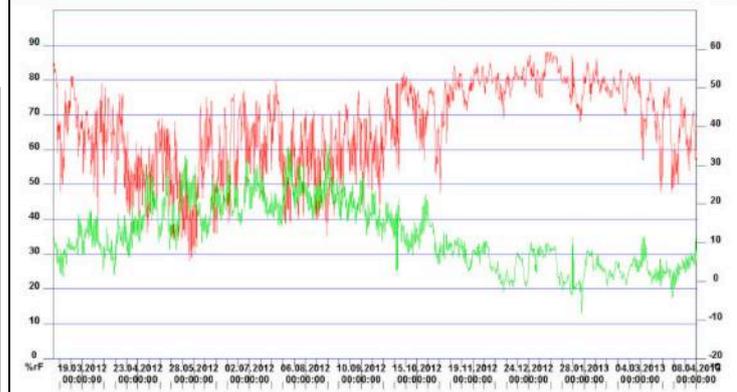
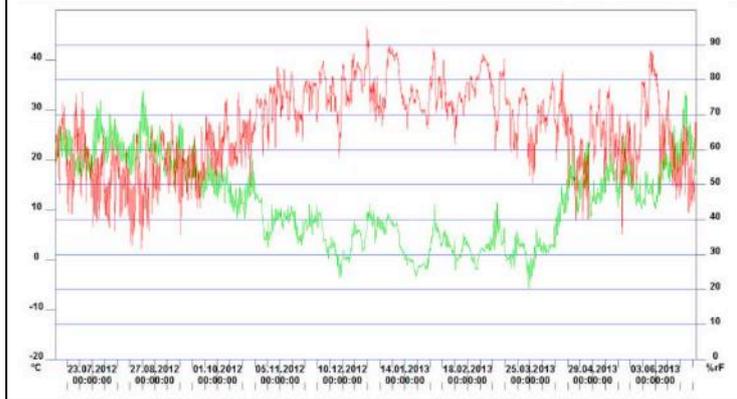


Diagramm 19 Zeitz, Dom



Institut für Diagnostik und Konservierung		Gerät	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
Diagramm 17				K:1 [°C] Temp. Ze...	-5.90	34.00	11.56
Moritzburg Zeitz, Dachstuhl Dom				K:2 [%rF] rel. F. Z...	31.50	95.30	68.58
Datenlogger testo 174							
Zeitraum: 02.07.2012 bis 25.06.2013							



Die stark betroffenen Objekte wiesen Sulfatwerte von 25.850 mg/kg Holz (Tangermünde, St. Stephan) bis 240.000 mg/kg Holz (Wittenberg, Lutherhaus) auf.
Die Objekte, an denen ein ruhigerer Klimaverlauf und geringere Schäden beobachtet wurden, wiesen ähnlich hohe Sulfatwerte zwischen 27.000 mg/kg Holz (Soest) und 190.000 mg/kg Holz (Gotha, Friedenstein) auf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Umgebungsklima einen Einfluss auf die Mazeration hat. Diese entwickelt sich schneller und deutlicher, je stärker das Klima schwankt und je öfter hohe Luftfeuchtwerte erreicht werden. Je mehr Feuchtigkeit im Umgebungsklima vorhanden ist, desto deutlicher der Schadensverlauf!

Tabelle 2
Übersicht Untersuchungsergebnisse

Ort	Probe	Art der Probe	Sulfat mg/kg Holz	Phosphat mg/kg Holz	Beschreibung der Oberfläche	Abbildung
Blankenburg, Schloss	P32	Holz bis 4 mm	12.300	27.500*	Fichte Langfaserige Auflösung der Oberfläche, „Girlandenbildung“, Holz weich bis t = 1 cm, Aufbrechende Oberflächen	
Gotha, Schloss Friedenstein	P1	Oberflächen-substrat Nordflügel	190.000	--	Fichte weißlicher Salzbelag, Gipsähnlich auf der Oberfläche, leicht ablösbar. Holzzerstörung relativ gering	
Gotha, Schloss Friedenstein	P4	Südost-turm, Oberflächen-substrat	105.000	14.000	Fichte Geringe Mazeration	
Meisenheim Schlosskirche	P1	Oberer Glockenstuhl	15.000	1.450	Eiche Geringe Mazeration, stark belüftet	
Meisenheim Schlosskirche	P4	Schabe probe Dachstuhl B8	57.000	8.900	Eiche Starke Mazeration, samtartiger Beginn, staubförmige, kurzfasrige Ablösungen	

Ort	Probe	Art der Probe	Sulfat mg/kg Holz	Phosphat mg/kg Holz	Beschreibung der Oberfläche	Abbildung
Meißen, Albrechtsburg Südseite	P1	Schabe-probe Sparren Süd-seite	50.000	13.000	Fichte beginnende Mazeration nach Reinigung. Zunächst samtartig	
Meißen, Albrechtsburg, Nordseite	P4	Dach-konstruktion Nord, Oberfläche	21.000	4.500	Fichte, mit Maskierungsmittel behandelt nach Reinigung mit Strahlverfahren. Keine neue Mazeration	
Meißen, Dom	P7	Oberflächen-substrat	38.000	12.000	Fichte rel. Geringe Schäden	
Naumburg, Dom	P2	Oberfläche bis 5 mm	39.000	14.000	Fichte Starke Schäden, schnell fortschreitend, langfaserig, Holzoberfläche weich bis 10 mm	
Naumburg, Wenzelskirche	P1	Oberflächen-substrat	165.000	17800	Fichte Starke Mazeration, helle Salzschiicht auf dem Holz. Stark staubend, teilweise völlige Zerstörung der Oberfläche	
Oranienbaum Schloss	P26	Oberflächen-substrat	125.000	10.600*	Kiefer? nach Reinigung neue Mazeration, teilweise sehr stark, Rotfärbung durch Holzschutzmittel	
Oranienburg Schloss	ORA 1	Westflügel, Tiefenprobe	27.000	k.A.	Kiefer Starke Salzausblühungen nach Überarbeitung, verwendete Produkte unbekannt, neue	

Ort	Probe	Art der Probe	Sulfat mg/kg Holz	Phosphat mg/kg Holz	Beschreibung der Oberfläche	Abbildung
					Mazeration	
Soest, ev. Wiesenkirche	T 1	Südl. Seitenschiff Sparren 9, Holz bis 5 mm	39.000		Leichte Mazeration	
Soest, ev. Wiesenkirche	T2	Chor, östl. Kreuzstrebe 0 – 5 mm	37.000			
Soest, ev. Wiesenkirche	T3	Chor. NO Kreuzstrebe am Kaiserstiel 0 – 5 mm	27.000			
Tangermünde St. Stephan	S 4	Spanprobe	25.850*	2.830*	Nadelholz und Eiche, im Untersuchungsbereich (südl. Querschiff) geringe Mazeration im allgemeinen, stellenweise nach Reinigung ungewöhnlich stark	
Wechselburg Basilika	P13	Stütze, Oberflächensubstrat	34.000	8.200	Nadelholz? Nur geringe Altholzbestände nach Sanierung. Sehr geringe Mazeration. Dachkonstruktion ist stark belüftet	
Wechselburg Basilika	P17	Stütze im W-Querhaus, Holz bis 1 mm	74.000	1.950	Stütze mit exemplarischer Maskierung, keine Mazeration	

Ort	Probe	Art der Probe	Sulfat mg/kg Holz	Phosphat mg/kg Holz	Beschreibung der Oberfläche	Abbildung
Weimar, Römisches Haus	P7	Sparren, Oberflächen-substrat	48.000	--	Fichte Geringe Mazeration nach Reinigung	
Weimar, Goethes Gartenhaus	P10	Sparren, Oberflächen-substrat	7.000	16.000	Fichte Keine Mazeration nach Reinigung	
Wittenberg Lutherhaus	P 27	Westteil, Oberflächen-substrat	240.000		Fichte Sehr starke Mazeration weißlicher Belag nach Reinigung 1998 und Laktatbehandlung, Holzverbindungen stark angegriffen. Nach dem Krieg Verpressung von Holzschutzmitteln	
Wittenberg Lutherhaus	P 30	Ostteil, Holz bis 4 mm	50.000		Fichte Sehr starke Mazeration Nach Reinigung 1998 Holzverbindungen stark angegriffen. Nach dem Krieg Verpressung von Holzschutzmitteln	
Wörlitz, Gotisches Haus	P22	Oberer Bereich, Holz bis 4 mm			Keine Mazeration, Holz wurde mit Maskierungsmittel behandelt	

1.3.3 Ergebnisse der Archivforschungen

Aus der Akte R/4901/12292 im Bundesarchiv Berlin-Lichterfelde, die Dokumente bzgl. der „Luftschutzaktion 1943“ enthält, geht hervor, dass der Ostturm des Schlosses **Friedenstein in Gotha** mit FM I, der Mittelbau mit FM II, der Ost- und der Westflügel wie auch der Westturm mit einem Kalkanstrich behandelt wurden (Bl. 76r).

Für **Weimar** sind u.a. **Goethes Gartenhaus** (FM I) und das **Römische Haus** (FM II) aufgeführt (Bl. 80). In **Meißen** wurden bis Januar 1944 „**Dom Nebengebäude**“ mit F.M. III behandelt (Bl. 9r und Bl. 10v).

Aufschlussreich sind die Angaben zu den verwendeten Präparaten und deren Dosierung. Als Feuerschutzmittel werden u.a. Kalk mit beigemischem Kochsalz und Karbidkalk mit Kochsalz (100 g Kochsalz auf 10 l Kalkschlämme) eingesetzt (Bl. 5r/v). Bzgl. der Dosierung der unterschiedlichen Mittel werden pro qm Holz bei Anwendung des Streichverfahrens folgende Mengen vorgeschrieben:

FM I	150 gr
FM III	150 gr
FM II	450 gr
FSA 101	1300 gr
FSA 102	1300 gr

Für Spritzverfahren sind zum Ausgleich des Spritzverlustes 20 % aufzuschlagen.
Es versteht sich, daß bereits früher imprägnierte Holzflächen keinesfalls mit einem anderen Mittel als dem früheren behandelt werden dürfen.

Unterschiedliche Mittel sollten nicht an ein und demselben Bauwerk eingesetzt werden. Als alternative Stoffe wurden u.a. Emaille-Asbest-Farbe (Bl. 15) und Gips (Bl. 16) diskutiert.

Der für Wien zuständige Konservator berichtet im Frühjahr 1944 von Schwierigkeiten beim Aufbringen von FSM auf ölhaltig vorimprägnierten Untergründen, die aber ausgeräumt worden seien (Bl. 23). Außerdem teilt er mit, dass bald ein neues Flammenschutzmittel auf den Markt komme, das als Abfallprodukt der Zellstoffgewinnung anfalle; die „Sulfitablauge“ besitze sehr gute Feuerschutzeigenschaften, gleichzeitig aber auch den Nachteil der Hygroskopizität.

Der Chef der Ordnungspolizei, SS-Brigadeführer Gerloff, macht am 24.05.1944 per Runderlass 25 (Bl. 53r-Bl.54r) die Zulassung neuer Feuerschutzmittel bekannt, da es Engpässe bei der Versorgung mit Kalk gäbe. Neu ist das Feuerschutzmittel „Koba“, bei dem es sich vermutlich um „Sulfitablauge“ (Bl. 53r) handelt.

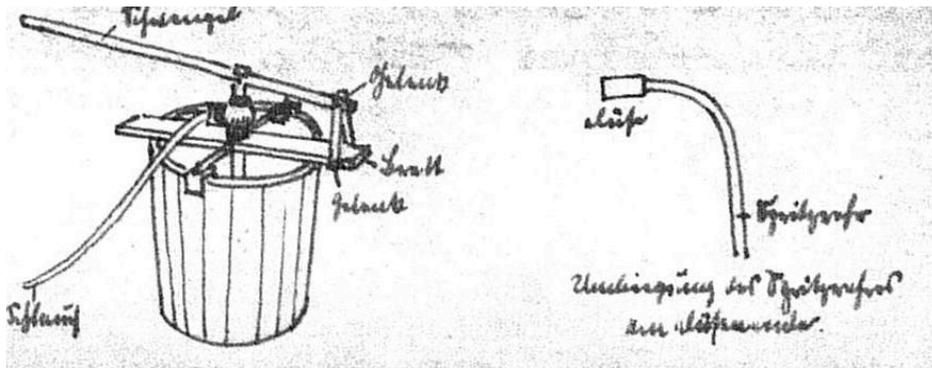
Außerdem wird das sog. „Bollinger-Schutzmittel“ zugelassen (Bl. 53v), das zumindest hinsichtlich der Verarbeitung dem FM III entsprach.

Mit dem selben Runderlass 25 wird die Verwendung von „Intravan“ verboten, da unter dieser Bezeichnung Präparate unterschiedlicher Zusammensetzung vertrieben worden seien. Der „Gaukonservator“ für Kärnten berichtet über Imprägnierungen mit Kalk, dem verschiedene Zusätze beigegeben waren (Bl. 28r).

Aus diesen Aussagen ist zu schließen, dass in der Praxis der Feuerschutzbehandlungen improvisiert wurde, indem Zusatzstoffe wie Kochsalz hinzugefügt oder u. U. nicht eindeutig deklarierte Ersatzstoffe verwendet wurden.

Die ordnungsgemäße Applikation von FM III und FSA 102 wurde durch die Zugabe von Farbstoffen kontrollierbar (Bl. 29 und Bl. 35, Bl. 44 und Bl. 45).

In seinem Reisebericht vom April 1944 (Bl. 42r/v) beschreibt Dr. Ing. Franke, Reichenberg, detailliert den Imprägnierungsvorgang mit FM i, FM III, Kalk und die dazu verwendete Spritze.



Franke bewertet die unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Verfahren und Feuerschutzmittel und kommt zu dem Schluss, dass das Spritzen dem Streichen vorzuziehen sei und dem Kalk die chemischen Schutzmittel.

Im September 1944 erhält Konservator Hiecke aus Nürnberg einen Bericht, in dem jedoch Zweifel an der Wirksamkeit von FM III geäußert und alternative Verfahren vorgeschlagen werden (Bl. 81r/v).

Untersuchungen des Chemischen Material- Prüfungsamtes der Bayerischen Landes- Gewerbe- Anstalt , Nürnberg, durch Dr. Kummerer führten zum Ergebnis, daß die Imprägnierungen mit FM III, die im Zuge der Feuerschutzmittelaktion 1943 erfolgt waren, unwirksam waren. Das aufgebrachte FM III war durch die im Laufe der Jahrhunderte in dem Holzwerk gebildeten Säuren zerstört worden. Die Ursache des Säurehaltes in dem alten Holzwerk ist noch ungeklärt. Die Säurebildung wird in Abgasen der Industrie, zum erheblichen Teile als Folge des Hopfenschwefelns, vermutet. Es kann aber auch hinzukommen, daß das Holz in früherer Zeit mit Ochsenblut behandelt wurde und vielleicht auch mit uns nicht mehr geläufigen mittelalterlichen Schutzmitteln gegen Wurmfraß. Das Holz ist vollkommen glatt, da es nur mit dem Beil bearbeitet ist und zeigt eine braun-schwarze Färbung.

(...)

In Nürnberg wurde an Ort und Stelle in Gegenwart des Polizeipräsidenten beschlossen:

Die Dachstühle, bei denen der Kalkanstrich eine ungenügende Haftfähigkeit gezeigt hat, sollen noch einmal einer vollkommenen Kalkbehandlung unterzogen werden, und zwar unter Zusatz von Sulfitlauge, die er-

fahrungsgemäß ein gutes Netzmittel ist und Kalk zu einem langsameren Abbinden veranlaßt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Recherchen im Bundesarchiv

Aus den ausgewerteten Dokumenten geht hervor, dass die 1943 bis 1945 ausgeführte Feuerschutzaktion streckenweise experimentellen Charakter hatte. Langzeiterfahrungen lagen für keinen der Stoffe vor, neue Chemikalien wurden kurzfristig in großem Stil eingesetzt. Schwierigkeiten ergaben sich aus Vorbehandlungen, aus Staubablagerungen und aus dem Alter des Holzes.

Vertiefende Archivforschungen wurden zu den an der **Albrechtsburg** in Meißen seit 1990 ausgeführten Nachbehandlungen unternommen.

Die Bauakten werden seit 1991 durch die Sächsische Landesbauverwaltung (SIB) verwahrt. Für die Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt!

Ältere Unterlagen befinden sich evtl. in HStA Dresden oder im LDA Dresden.

Auf eigene ältere Forschungen zu Flammschutzmittelbehandlungen im Rahmen des Luftschutzes konnte zurückgegriffen werden. Aus der Akte R/4901/12292 im Bundesarchiv Berlin-Lichterfelde (Bl. 9r und Bl. 10v) geht hervor, dass bis Januar 1944 in Meißen „Dom Nebengebäude“ mit F.M. III behandelt wurden.

Ausgewertet wurden zunächst nachfolgende Unterlagen, die vom SIB und der Verwaltung der Albrechtsburg zur Verfügung gestellt wurden:

1. Sanierungskonzept HSM-Wirkstoffe (DDT) mit gleichzeitiger Beseitigung von Mazerationsschäden (Lino Projekt, Dipl. Ing. Ulrich Wesser), 1998
2. Abschlussbericht Nr. 154531 (IHD), 26.11.2003
3. Bericht zur Nachkontrolle auf Schäden durch Pilze und Insekten (Wolfram Knobel), 10.10.2008
4. Prüfbericht Nr. 259364 „Holzschutzmittelwirkstoffe in der Raumluft (EPH), 09.10.2009
5. Prüfbericht Nr. 250253 „Holzschutzmittelwirkstoffe in der Raumluft (EPH), 07.10.2010
6. Bericht „Bestandtrecherche Holzschutzmittelwirkstoffe“ (Baubiologe René Lenk), 30.10.2010
7. Prüfbericht Nr. 251351 „Holzschutzmittelwirkstoffe in der Raumluft der Dachböden“ (EPH), 30.09.2011

Diese Unterlagen werden im Folgenden gemäß dieser Nummerierung zitiert.

Als hinsichtlich der Mazerationproblematik unergiebig erwiesen sich der Kontrollbericht (3) und die Prüfberichte zum Raumluftmonitoring (4,5,7).

Zu folgenden Gutachten gab die zuständige Archivarin freundlicherweise Auskunft; auf eine Einsichtnahme wurde verzichtet:

8. Holzschutztechnische Gutachten für das Dachgeschoss der Albrechtsburg in Meißen (Südflügel, Mittelbau, Nordflügel, Westflügel, – Teil 1-4) (Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnose Wolfram Knobel), 2000: Untersuchungen an Holzbauteilen, Raumluft und Stäuben zur Ermittlung der Schadstoffbelastung. Aufgrund der Messergebnisse (Fa. Lino Projekt GmbH) wurden Rückschlüsse auf einen überdurchschnittlich hohen Eintrag von Holzschutzmitteln (u.a. *Hylotox 59*, damit DDT/ Lindan); *Dohnalit Ull*, damit Fluor, Chrom) gezogen. „Die zulässigen Höchstwerte der Schadstoffe PCP und DDT werden um ein Vielfaches überschritten.“
9. Holzschutztechnisches Gutachten für das DG der Albrechtsburg (Wolfram Knobel), 1999: tragende/ aussteifende Dachhölzer wurden in der Vergangenheit im Strahlverfahren gereinigt und eine Oberflächenbeschichtung mit *Aidol Holzsanierung MZ* vorgenommen. Die Schadstoffuntersuchung brachte das gleiche Ergebnis wie 2000.

Ergebnisse der Archivrecherche zur Albrechtsburg

Im Fokus der in den Dachräumen der Albrechtsburg ab den 1990er-Jahren unternommenen Untersuchungen und nachfolgenden Sanierungsmaßnahmen standen die Belastung der Hölzer und vor allem der Raumluft durch die Holzschutzmittelbestandteile DDT, Lindan und PCP (1). Dementsprechend wurden Holz-, Staub- und Luftproben genommen und ausgewertet. Aus dem Bericht des Baubiologen Lenk (6, S. 6) geht hervor, dass die Baumaßnahmen außerdem durch Schwammbefall veranlasst wurden, der bereits 1945 festgestellt worden war und zu einer ersten Kampagne in den Jahren 1963 bis 1979 (!) geführt hatte, die auch die „chemische Imprägnierung“ des Holzwerks umfassen sollte.

Mögliche Mazerationursachen werden in den ausgewerteten Berichten nicht explizit angesprochen wie auch nicht der Zusammenhang von Mazeration und Staubbildung. Das Sanierungskonzept von Wesser (1, S. 14) legt die Vermutung nahe, dass die Mazeration von den HSM-Bestandteilen DDT, Lindan und Fluorid hervorgerufen wurde. Der 2003 durch das IHD erstellte Abschlussbericht (2) stellt fest, dass die HSM-Bestandteile DDT, Lindan und PCP ‚vor ca. 30 Jahren mit Holzschutzmitteln eingebracht wurden‘. Auch im Abschlussbericht des IHD wird ein Zusammenhang zwischen einer durch die genannten HSM-Bestandteile hervorgerufenen Kristallbildung und der Mazeration nahegelegt (2, S. 3).

An Feuerschutzsalzen wurden im Zuge des Sanierungskonzepts (1) Phosphat- und Fluoridverbindungen nachgewiesen, außerdem Chromate. Das IHD (2, S. 10, S.16-18) bestimmte 2003 aus Materialproben Phosphate/ Phosphatverbindungen.

Die Schäden bzw. Belastungen wurden im Sanierungskonzept von Wesser (1) und im IHD-Abschlussbericht (2) auf nach 1945 erfolgte Behandlungen zurückgeführt; dem entsprechend werden die nachgewiesenen Bestandteile als Hinweise auf *Hylotox 59* und *Dohnalit Ull* verstanden (1). Eventuell früher vorgenommene (Flammschutzmittel-) Behandlungen wurden nicht in Betracht gezogen.

Das Sanierungskonzept (1) zeigt diverse Maßnahmen zur Schadstoffminderung auf, vom Lüften über die Reinigung bis zur Abdeckung und Beschichtung (Maskierung) der Holzoberflächen, evtl. nach vorherigem Abtrag der belasteten Holzschichten.

Ausgeführt werden sollte ein mehrstufiges Verfahren: 1. Entstaubung (offenbar zunächst mit Staubsaugern und dann mittels Feinstrahltechnik, 2. Versiegelung der Oberflächen. Außerdem sollten die Lehmfüllungen der Decken entfernt werden. 3. Abschließend sollte eine Feinreinigung, möglichst feucht von Decken, Fußböden, Balken erfolgen, die ggf. regelmäßig wiederholt werden sollte.

Der Abschlussbericht des IHD (2) beschreibt, dass das Vakuumwaschverfahren zur Dekontamination eingesetzt wurde, wodurch eine oberflächliche Reduktion der HSM-Bestandteile um 75 % erreichbar sei. Aus diesem Grund hatte das IHD dem Architekten 2002 die Anwendung des Verfahrens empfohlen (2, S. 4).

Das IHD ermittelte auch erhöhte Holzfeuchtwerte, die auf Feuerschutzsalze zurückgeführt wurden (2, S. 20). Auf S. 27 wird das Vakuumwaschverfahren ausdrücklich empfohlen und auf erfolgreiche Anwendungen auf Schloss Weesenstein hingewiesen. Auf S. 52 wird vermutet, dass die Feuerschutzsalze ein Ausgasen von PCP verhindern könnten.

Lenk (7, S. 9) beschreibt, dass der 1. BA 1999 den Nordflügel der Albrechtsburg betraf, wo die Holzoberflächen abgestrahlt und mit AIDOL MZ beschichtet (maskiert) wurden. Unter der Maskierung sei es bereits nach wenigen Jahren zu „Nachkristallisierungen von DDT“ gekommen. Darauf hin seien „alle Holzbauteile einer Reinigung im Vakuumwaschverfahren unterzogen“ worden. Außerdem habe eine Trockenreinigung stattgefunden (7, S. 10). Der Westflügel wurde laut Lenk (7, S. 12) ebenfalls zunächst (1998) gestrahlt und mit AIDOL MZ beschichtet, dann (2002) (Reihenfolge?) mit dem Vakuumwaschverfahren gereinigt, anschließend ebenfalls trocken gereinigt. In derselben Weise seien auch der Mittelbau (S. 14), der Südflügel (S. 16), der Kapellenturm (S.19) behandelt worden. Der Südwestflügel wurde 2002 nur mit dem Vakuumwaschverfahren und trocken gereinigt (S. 21). Am Gärtnerhäuschen hätten bis 2010 weder Erkundungen hinsichtlich HSM (oder anderer Stoffe) noch Sanierungsmaßnahmen stattgefunden (S. 23).

Bei der Auswertung der ihm zur Verfügung gestellten Unterlagen stieß Lenk auf folgende HSM: *Vogelfluat*, *Dohnalit FPI*, *Dohnalit Ull* und *Hylotox 59*, wobei die Applikationen nicht eindeutig datiert werden konnten.

Diese Deutungen decken sich nicht in allen Punkten mit unseren Beobachtungen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass auf der Albrechtsburg die aus HSM herrührenden DDT-, Lindan- und PCP-Belastungen die seit den 1990er-Jahren ausgeführten Maßnahmen bestimmten. Die Ursachen der Mazeration wurden dabei nicht erkundet.

Der damals zuständige Bauleiter widersprach auf Nachfrage der Darstellung von Lenk, dass einige Abschnitte nach der Maskierung mit dem Vakuumwaschverfahren behandelt worden seien. Dieser Widerspruch ist nicht ohne weiteren Analyseaufwand aufzulösen. Es scheint sich hier zu zeigen, dass, vor allem wenn noch nicht erprobte Verfahren eingesetzt werden, auf die **Ausführungsdokumentation** (HOAI LP 9) größten Wert gelegt werden sollte.

Die am 27.03.2012 erfolgte Beprobung ergab in allen Bereichen sehr hohe Sulfat- und Phosphatgehalte. Der Südwestflügel (= „südlicher Teil“?) zeigte z.T. erneut (?) Mazerationerscheinungen. Ausgangswerte für die Sulfatgehalte waren aus den ausgewerteten Unterlagen nicht zu ermitteln. Auf einen Vergleich mit den Werten des Gärtnerhäuschens, das nicht nachbehandelt wurde, wurde verzichtet.

1.3.4 Schnelltest auf Sulfat

Im Verlauf des Projektes wurde immer klarer, welche Bedeutung dem Sulfatgehalt bei der Schädigung der Holzstruktur zukommt (s. 1.3.1 und 1.3.2). In diesem Zusammen-

hang erfolgten wiederholt Versuche zur Entwicklung eines Sulfatschnelltestes für die Vorortanwendung.

Zum Einsatz kamen handelsübliche Produkte zur pH-Wert- und Sulfationenbestimmung. Die Vorgehensweise bestand darin, die zu untersuchende Oberfläche mit destilliertem Wasser anzufeuchten, den pH-Wert zu kontrollieren und anschließend mit einem Sulfationenteststreifen den Sulfatgehalt abzuschätzen (siehe Abb. 13 und 14).

Leider bestätigten sich die positiven Erfahrungen aus der Laborerprobung nicht unter den Einsatzbedingungen an den verschmutzten Hölzern in den Dachstühlen. Insbesondere die bis in die 1990iger Jahre einwirkenden schwefelsauren Luftschadstoffe verfälschen die Ergebnisse noch heute hinsichtlich der Verwendung des Schnelltestes auf Feuerschutzsalze.



Abb. 13 (links) Testkit für die Sulfatbestimmung



Abb. 14 (rechts) Versuchsergebnis: Teststreifen links auf mit Feuerschutzsalzen behandelte Fläche, Teststreifen rechts auf unbehandelte Fläche

1.3.5 Ergebnisse der Nachuntersuchung von behandelten Konstruktionen

Die im Projekt evaluierten Mazerationssanierungen lassen sich zwei Gruppen zuordnen. Die erste Gruppe bilden die Dachkonstruktionen, die gereinigt wurden, wo aber auf weitere Maßnahmen verzichtet wurde. In der zweiten Gruppe wurde nach der Reinigung – meist nur in Teilbereichen – eine Beschichtung aufgetragen. Auch in diesen Fällen gibt es also „nur“ gereinigte, nicht weiterbehandelte Bereiche.

Für beide Gruppen lässt sich ein vorsichtiger und fürsorglicher Umgang der Verantwortlichen, die ihre Türen und Archive für uns geöffnet haben, mit dem Denkmal feststellen.

In den 1990er Jahren wurde die Mazeration von Hölzern noch als Einzelphänomen angesehen; in der Fachliteratur wurden die Schäden fast ausschließlich im Kontext von Hallen zur Lagerung von Düngern behandelt.

Unter den Denkmalpflegern überwog die Haltung, dass eine Reinigung ausreiche und auf einen schwer kalkulierbaren Einsatz von „Chemie“ besser zu verzichten sei.

Mittlerweile liegen die ersten Sanierungen bis zu 20 Jahre zurück und es lassen sich langfristige Ergebnisse beschreiben.

Es ist festzustellen, dass in allen evaluierten Dachkonstruktionen der Mazerationsprozess allein durch eine Reinigung nicht gestoppt werden konnte. Eine Ausnahme bildet eventuell das Münster in Bad Doberan. Hier liegt die Reinigung jedoch erst sechs Jahre zurück.

Für die Reinigungsprozesse ist darauf hinzuweisen, dass z. B. in Bezug auf die Strahlverfahren in den letzten Jahren neue technische Möglichkeiten entwickelt wurden, die einen noch sensibleren Umgang mit der Originalsubstanz ermöglichen. Bei der Reinigung sind auch Praktikabilität, Kosten und Arbeitsschutz zu bewerten.

1.3.5.1 Gereinigte Dachkonstruktionen

Schon im Forschungsprojekt MATE waren zwei Dachkonstruktionen aufgefallen, die trotz vorausgegangener Reinigung wieder starke Mazeration zeigten. Im Dach des historischen Rathauses in der Stadt Brandenburg gibt es bereits seit 2010 wieder deutlich mazerierte Flächen und auch die Dachkonstruktion im Dom zu Zeitz zeigt nach einer Reinigung um das Jahr 2000 herum nach etwa 10 Jahren wieder eine sehr starke Mazeration.

1.3.5.1.1 Lutherhaus Wittenberg

Das Wittenberger Lutherhaus ist eine der in die UNESCO-Welterbeliste eingetragenen Lutherstätten. Das Gebäude wurde ab 1503 als Teil des Wittenberger Augustinereremitenklosters errichtet und diente nach dessen Aufhebung Martin Luther und seiner Familie als Wohnhaus. Obwohl das Gebäude seit der Mitte des 16. Jahrhunderts mehrfach umgebaut wurde, hat sich das originale Dachwerk, eine Kehlbalkenkonstruktion, weitgehend erhalten.

Die stark mazerierten Hölzer im Ostteil wurden 1998 mechanisch mittels Handbürsten und Staubsaugern gereinigt. Abgesehen von zwei Probeflächen, an denen versuchsweise Puffer eingesetzt wurden (s.u.) erfolgte keine weitere Behandlung gegen die Mazeration. Die Belüftung des Daches wurde mit der Wiederherstellung des weitgehend unvermörtelten Kaldaches verbessert.

Die Laboranalyse einer Mischprobe ergab einen Sulfatgehalt von 50.000 mg/kg Holz. Im Herbst 2013 zeigten sich erneut ausgeprägte Faseraufrichtungen. Es ist festzustellen, dass die Mazeration allein durch die Reinigung nicht gestoppt werden konnte.



Abb. 15 Wittenberg, Lutherhaus (Ostteil des Daches): Mazeration nach Reinigung

1.3.5.1.2 Oranienbaum, Schloss

Das Schloss wurde 1693-98 unter der Leitung des niederländischen Baumeisters Cornelis Ryckwaert errichtet. Es ist eine dreiflügelige, zweigeschossige Anlage mit quadratischen Kavalierpavillons und nach außen versetzt anschließenden, niedrigen Stallbauten. Das Kehlbalckendach mit liegendem Stuhl hat eine relativ geringe Dachneigung, Spannriegel direkt unter den Kehlbalken, ist mit Kopfbändern ausgesteift und besitzt außerdem eine Längsaussteifung durch Andreaskreuze zwischen den liegenden Stützen.

Im Juli 2012 wurden im Dachraum des Schlosses Oranienbaum erneut Holzproben genommen. Grund hierfür waren bisher fehlende Werte für den Sulfatgehalt.

Die Dachkonstruktion ist vollständig instand gesetzt und auch gereinigt worden. Dies fand vor ca. sechs Jahren statt, kurz bevor 2008 die erste Probenahme im Rahmen des Projektes MATE erfolgte.

Die Dachkonstruktion zeigt deutliche Mazerationserscheinungen, wobei 2012 zusätzlich an vielen Stellen eine schwammig-weiche Holzoberfläche festgestellt wurde. Ermittelt wurde im Oberflächensubstrat ein Sulfatgehalt von 125.000 mg/kg Holz.

1.3.5.1.3 Wechselburg, Klosterkirche

Die Stiftskirche Wechselburg im Bistum Dresden-Meißen wurde 1160-1180 als dreischiffige Pfeilerbasilika für das Augustiner-Chorherrenstift Zschillen errichtet.⁸ Das Dach wurde nach Bränden 1537 und 1557 sowie anlässlich eines barocken Umbaus der gesamten Anlage zwischen 1673 und 1693 erneuert. Der romanische Dachstuhl ist noch in acht Achsen des östlichen Langhausdaches und im südlichen Querhaus erhalten.

Seit Mitte der 1980er Jahre wurden im Dach der Wechselburger Stiftskirche erhebliche Schäden durch Mazeration festgestellt.

Bei den Sanierungsarbeiten wurde „die kontaminierte Faser schleifend und absaugend vom Holzkern entfernt.“⁹ Über „Zuluftöffnungen im Traufenbereich und eine konsequente Luftführung im oberen Dach“ wurde eine ausreichende Belüftung der Holztragwerke sichergestellt.¹⁰

Einige der betroffenen Bauhölzer wurden versuchsweise chemisch behandelt, um den fortschreitenden Zerfall zu stoppen. „Das Bauholz zeigte nach einiger Zeit wieder eine milchige vergraute Auflage.“¹¹



Abb. 16 Wechselburg, Klosterkirche: Mazeration nach Reinigung

⁸ Donath, G, Sanierungsmaßnahmen im Dach der Wechselburger Stiftskirche <https://www.baufachinformation.de/denkmalpflege/Sanierungsma%C3%9Fnahmen-im-Dach-der-Wechselburger-Stiftskirche/1998037104039>

⁹ Ebenda, S.1

¹⁰ Ebenda, S.1

¹¹ Ebenda, S.1

Bei einer Besichtigung durch die Projektgruppe im Jahr 2013 zeigte die Oberfläche der augenscheinlich mit einem Präparat auf Polyacrylat- oder Alkydharzbasis beschichteten Versuchsfläche keine Anzeichen von Mazeration und glänzte seidenmatt.

Es zeigen sich 2012 erneut Mazerationserscheinungen. Die Laboranalyse einer Mischprobe ergab einen Sulfatgehalt von 34.000 mg/kg Holz. Der Ausgangswert ist unbekannt.

1.3.5.1.4 Potsdam, Cecilienhof

Schloss Cecilienhof im Neuen Garten in Potsdam wurde 1913-17 nach Plänen von Paul Schultze-Naumburg für Kronprinz Wilhelm und dessen Familie zur ganzjährigen Bewohnung errichtet.

Die Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg/ Potsdamer Kulturlandschaft führt derzeit Sanierungsarbeiten am Schloss Cecilienhof durch. Das Schloss Cecilienhof gehört zu den Schlössern und Gärten Berlin-Brandenburg/ Potsdamer Kulturlandschaft, die in der UNESCO-Welterbeliste eingetragen sind.¹²

Im Laufe der Zeit wirkten sich zahlreiche Bauschäden, mangelnde Pflege und insbesondere die Fehlbehandlung und Überdosierung mit Holz- und Flammenschutzmitteln schädlich auf die Substanz aus. Neben einer starken Mazeration belasten freigesetzte, kontaminierte Stäube den Dachraum.

Im November 2013 fand in Naumburg ein Treffen der Projektgruppe mit dem Projektkoordinator der Stiftung und dem den Bau begleitenden Architekturbüro statt, bei dem eine Zusammenarbeit verabredet wurde. Bereits 1999 wurden Voruntersuchungen der Dachkonstruktion durch Mitglieder der Projektgruppe Mazeration vorgenommen.

Besondere Aufmerksamkeit soll die Evaluation des hier zur Reinigung eingesetzten Trokensisstrahlverfahrens (CO₂-Pellets) erhalten. Dieses Verfahren wurde auch im Augustinermuseum in Freiburg i. Br. und wird aktuell im Schloss Bothmer in Klütz zur Dekontamination eingesetzt. Cecilienhof ist der erste bekannte Fall einer Anwendung des Verfahrens auf einer mazerierten Fläche.

1.3.5.2 Gereinigte Dachkonstruktionen mit Beschichtung

Sowohl in der Albrechtsburg zu Meißen (Nordseite), als auch im nördlichen Querhaus von St. Stephan, Tangermünde und im Oranienburger Schloss wurden zuvor gereinigte Hölzer der Dachwerke mit Präparaten auf Alkydharzbasis beschichtet. Die im Sinne von Großversuchen angewandten Mittel lassen sich unter dem Produktnamen Aidol® MZ Holzsanierung einordnen. Es ist leider schlecht dokumentiert, welche Produktvarianten jeweils in welcher Art und Weise verarbeitet wurden. Die genauen Rezepturen sind das Geheimnis des Herstellers. In der Patentschrift DE 195 35 664 C2 des Patentinhabers Remmers Bauchemie wird die „Verwendung einer wässrigen Zubereitung zur Behandlung von durch Salzfraß geschädigtem Holz“ beschrieben.

Die erfindungsgemäß eingesetzten Harze, die die Oberflächen verkleben und ver härten, müssten, um die Atmung der behandelten Holzflächen zu gewährleisten, eine gewisse Gasdurchlässigkeit haben, insbesondere auch für Wasserdampf. Dies sei bei Polyesterharzen der Fall, insbesondere bei Alkydharzen.¹³

Andreas Schwar bezieht sich auf diese Patentschrift und das Technische Merkblatt von Aidol® Holzsanierung MZ¹⁴ und schreibt, dass dessen Wirkungsweise auf der Annahme beruhe, dass durch die Bildung von Fluorwasserstoff HF aus der Zersetzung von Ammoniumfluorid NH₄F Ligninbestandteile angegriffen werden und dass dadurch die „Mazeration“ ausgelöst werde. Schwar sieht diesen Zusammenhang nicht als wesentlich an.¹⁵

¹² Masterplanprojekt Sanierung Schloss Cecilienhof - Leistungen, II.1.5, Kurze Beschreibung des Auftrags oder Beschaffungsvorhabens

¹³ Patentschrift DE 195 35 664 C2

¹⁴ Stand 07/2002

¹⁵ Schwar 2004, S.194 Sanierung durch Holzschutz- und Holzflammschutzmittel geschädigter Dachstuhlhälzer

Festzustellen ist, dass die Flächen bis 18 Jahre nach der Anwendung optisch einen guten Eindruck vermitteln, obgleich es zu Farbvertiefungen gekommen ist. Neue Faser-aufstellungen wurden nicht beobachtet. Der nach der Behandlung beobachtete unschöne Glanz in Tangermünde ist verloren gegangen.

Im Münster Bad Doberan wurde die eigentlich naheliegende aber durch ihre Erstmaligkeit auch innovative Idee verfolgt, nach einer Reinigung aus der Dekontamination bekannte handelsübliche Maskierungssysteme in Probeflächen auf die Hölzer aufzutragen.

1.3.5.2.1 Meissen, Albrechtsburg

Der Schlossbau entstand zwischen 1471 und 1524 im Auftrag der Brüder Ernst und Albrecht von Wettin, die das Herzogtum Sachsen bis 1485 gemeinsam regierten.

Das Dach des Südflügels wurde im Sommer 1478 aufgerichtet. Der zweite Bauabschnitt zwischen 1478 und 1483 konzentrierte sich auf den Mittelbau. Es entstanden das zweite und dritte Obergeschoss bis zum Dachbereich, der Kapellenturm, der Kleine Wendelstein sowie Teile des Westflügels. Das Dach wurde 1483 aufgerichtet. Im letzten Bauabschnitt wurden Westflügel und Nordostbau fertiggestellt.¹⁶

Das Dachwerk der Albrechtsburg in Meissen wurde teilweise abrasiv im Strahlverfahren, teilweise mittels Waschverfahren gereinigt und teilweise mit einem Anstrich behandelt. An einigen Stellen des Dachwerks auf der Südseite, wo die Hölzer nur gereinigt wurden, sind aktuell leichte Mazerationserscheinungen zu sehen. Die beschichteten Hölzer auf der Nordseite weisen Spuren einer sehr gründlichen Reinigung auf: das weichere Frühholz wurde durch das Strahlen der Balken stark reduziert, es tritt gegenüber den Spätholzringen stark zurück („Waschbretteffekt“).

Die Laboranalyse einer oberflächennah entnommenen Mischprobe ergab auf der Südseite einen Sulfatwert von 50.000 mg/kg Holz. Die Ausgangswerte vor der Reinigung und Nachbehandlung sind nicht bekannt.



Abb. 14 Meissen, Albrechtsburg (Nordseite): Waschbretteffekt nach Reinigung im Strahlverfahren

¹⁶ http://www.sib.sachsen.de/fileadmin/user_upload/PDF_Dokumente/broschueren/2010_NL_Dresden_I_Albrechtsburg_Meissen_Inhalt.pdf

1.3.5.2.2 Oranienburg, Schloss

Schloss Oranienburg entstand zwischen 1651 und 1655 nach Plänen von Johann Gregor Memhardt als erster Schlossbau nach holländischen Vorbildern auf deutschem Boden. Reste der Vorgängerbebauung aus dem 16. Jh. wurden in den Neubau einbezogen, Erweiterungen im 18. Jh. unter Nering und Eosander von Göthe folgten.¹⁷

Im Jahr 1996 begannen umfangreiche Sanierungsarbeiten, nach deren Abschluss 1999 das zur Stiftung Preußische Schlösser und Gärten gehörende Schlossmuseum sowie das Kreismuseum Oberhavel in den größten Teil des Schlosses einzogen. Die Arbeiten wurden von der Oranienburger Stadtverwaltung betreut.

Vor allem im Westflügel lässt sich auf den vor ca. 15 Jahren gereinigten Flächen der Dachkonstruktion wieder deutliche Mazeration verbunden mit starken Salzausblühungen feststellen.

Keine Mazeration findet sich an der während der Renovierungsarbeiten angelegten mit Aidol® Holzsanierung gestrichenen größeren Versuchsfläche im nordwestlichen Kopfbau über dem Porzellankabinett.

1.3.5.2.3 Bad Doberan, Münster

Das Doberaner Münster war bis zur Mitte des 16. Jahrhunderts die Kirche des Zisterzienser-Klosters Doberan.

Die ursprüngliche mittelalterliche Grundkonstruktion aller vier Teile des Hauptdachtragwerkes ist ausnahmslos aus Eichenhölzern zusammengesetzt.

Eine dendrochronologische Datierung sämtlicher beprobter Eichenhölzer, vom Chor bis in den Bereich des Langhauses hinein, erbrachte, dass diese über mehrere Jahre bis zum Winter 1296/97 in einheimischen Wäldern gefällt und höchstwahrscheinlich 1297 verbaut wurden.¹⁸

Die beiden Stuhlkonstruktionen des Chores sind aus Kiefernholz gefertigt.

Mit Ausnahme des Chordaches erfolgte im späten 19. Jahrhundert (um 1890) im gesamten Dachbestand zur zusätzlichen Quer- und Längsaussteifung in regelmäßigen Abständen der Einbau stuhlartiger Konstruktionen unter- und oberhalb der ursprünglichen Kehlbalkenlage sowie der Einbau von hölzernen Zangenkonstruktionen.¹⁹

Im Zuge der Sanierungsarbeiten wurde der gesamte Dachstuhl 2007 und 2008 durch Bürstensaugen im geschlossenen System mit Unterdruck gereinigt. Auf eine Beschichtung wurde auf Grund nicht ausreichender positiver Rückmeldungen und fehlender langjähriger Erfahrungen von anderen Objekten in Abstimmung mit der Kirchengemeinde und dem Landesamt für Denkmalpflege vorerst verzichtet. Vor und nach der Reinigung wurde eine qualitative und quantitative Analytik der Liegestäube durchgeführt. Im Münster wurde ein Datenlogger für Innen- und Außenmessung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit installiert.

Es wurden Probeachsen mit Beschichtungen versehen, zudem wurde das Vakuumwaschverfahren getestet.

Als Beschichtungen wurden drei aus der Dekontaminierung bekannte Maskierungssysteme als Probeflächen aufgebracht:

- Basko-Absperrlack Nr. 740® der Livios Pflanzenchemie
In der Volldeklaration gibt der Hersteller²⁰ Ethanol (Gärungsalkohol), Schellack und Lärchenharz an.
- Biophil Schutzsystem® der Imparat Farbenwerke

¹⁷ Georg Dehio, Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler: Brandenburg, bearb. V. Gerhard Vinken et. al., Berlin, München 2012, S. 779.

¹⁸ Die Bad Doberaner Münsterverwaltung hat eine hervorragende Internetpräsentation. Hier werden auch die Bauforschungen zum Dach offengelegt sowie durch Fotos dokumentiert.

<http://www.muenster-doberan.de/index.php?id=254>

¹⁹ Ebenda

²⁰ LIVOS Pflanzenchemie D-29468 Wieren, Technisches Merkblatt Basko Absperrlack, Stand 29.01.09

Laut Hersteller²¹ handelt es sich um einen wasserbasierten Deckbeschichtungsstoff, dessen Bindemittelbasis eine wässrige acrylmodifizierte Naturharzdispersion ist.

- EX-Schadstoffvernichter® der Baden Chemie
Nach Angaben des Herstellers²² enthält die Zubereitung Reinacrylat-Dispersion, Aminosäuren, Ammoniumsalze, Polyalkohol, Verdicker und Wasser.

Im Forschungsprojekt MATEKUR können keinerlei Aussagen über die von den Herstellern angegebene Wirksamkeit der Produkte in Bezug auf die Biozide getroffen werden. Die Probeflächen zeigen keine Faseraufstellungen und machen optisch einen seidmatten Eindruck. Der Basko-Absperrlack® sticht hervor, indem er die vom Hersteller angegebene Eigenschaft, hochglänzend zu sein, besonders erfüllt.²³

Im Bad Doberaner Münster konnten bei einer Inaugenscheinnahme durch die Projektgruppe sechs Jahre nach der erfolgten Reinigung, weder am Eichen- noch am Nadelholz, Anzeichen einer erneuten Mazeration festgestellt werden.

1.3.5.2.4 Tangermünde, St. Stephan

Zwischen 1184 und 1188 unter Heinrich von Gardelegen als Dom für ein geplantes Bistum begonnen, wurde wahrscheinlich ab 1376 der gotische Nachfolgebau errichtet, eine dreischiffige Backsteinhalle mit Chorumgang und westlicher Doppelturmfront. Die Kirche wurde im wesentlichen Anfang des 16. Jahrhunderts fertiggestellt. Nach einem Brand im Jahre 1617 erfolgte die Wiederherstellung des Inneren.²⁴

Das Kehlbalkendach mit im Prinzip stehendem Stuhl ist enorm hoch. Über dem südlichen Querschiff ist es mit liegendem Stuhl ausgeführt. Die Konstruktion besteht teils aus Eiche, teils aus Nadelholz. Die Verbindungen im südlichen Querhaus sind gezapft, ansonsten verkämmt und geblattet.



Abb. 17 Tangermünde, St. Stephan: Farbvertiefung nach Beschichtung

²¹ IMPARAT Farbwerk Iversen & Mähl GmbH & Co., D-21504 Glinde/Hamburg, Technische Information Biophil®-Decklack, Stand: März 1999.

²² Baden-Chemie D-76534 Baden-Baden/Steinbach EG Sicherheitsdatenblatt Überarbeitet am: 11.02.2003.

²³ Es bleibt noch anzumerken, das sich auch ähnliche Produkte anderer Hersteller auf dem Markt befinden.

²⁴ <http://www.sankt-stephan-tangermuende.de/bauwerk/geschichte.html>

Im südlichen und nördlichen Querhaus läuft seit 10 Jahren ein Langzeitversuch zur Mazerationssanierung. Nach abrasiver Reinigung kamen Pufferungs-, Verkieselungs- und Beschichtungssysteme zum Einsatz. Die Entwicklung der Holzfeuchte und der klimatischen Einflüsse wurden über mehrere Jahre verfolgt und im Forschungsbericht des IDK (HAL 68/2010) beschrieben.

Erneute Mazeration ist nur an einzelnen Hölzern zu beobachten. Die Abschottung beider Querhausdächer vom Hauptdach hat offensichtlich zu einer Veränderung der klimatischen Verhältnisse geführt, wobei die Salze im Holz kaum in Lösung gehen. Zwischen den verschiedenen Behandlungsarten gab es keine signifikanten Unterschiede des Mazerationsumfanges.

1.3.5.3 Pufferung der Holzfeuchte

In Tangermünde und im Wittenberger Lutherhaus (westlicher Dachteil) wurden Versuche mit Puffern auf Kaliumlaktatbasis unternommen. Nach 10 bis 15 Jahren zeigten sich ein weißlicher Belag (Lutherhaus) und erneute Mazerationserscheinungen.

Nachdem zunächst über mehrere Jahre (Lutherhaus bis 2002) nur geringe neue Mazerationserscheinungen zu beobachten waren, sieht es nun danach aus, als hätten die Puffer sich erschöpft, ihre Wirksamkeit eingebüßt.



Abb. 18, Abb. 19 Wittenberg, Lutherhaus (westliches Dach):
Belag und Mazeration nach Reinigung und Pufferung

1.3.6 Ergebnisse der Laborversuche

1.3.6.1 Entsalzung per Kompressen

Die Erforschung der Schadensursachen durch die Mazerationsprozesse verband sich von Beginn an mit der Fragestellung einer möglichen kurativen Behandlungsmethode. Vor diesem Hintergrund erfolgten unter Laborbedingungen erste Tastversuche zur Extraktion des Feuerschutzsalzes aus einem Holzprobekörper.

Langjährige Erfahrungen des IDK aus dem Bereich der Natursteinrestaurierung legten den Versuch nahe, durch Kompressenanwendungen die leicht löslichen Feuerschutzsalze aus dem Holzuntergrund herauszulösen oder zumindest deren Konzentration zu verdünnen. Auch A. Schwar benennt diese Technologie in seiner Dissertation²⁵ als mögliche Behandlungstechnologie und bezieht sich dabei auf Wallasch, der ebenfalls aus der Stein- und Gebäudesanierung entstammt.

Durch die Projektbeirätin Frau Dr. Schoknecht von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung wurde ein 50 x 14 x 14 cm großer kammergetrockneter Kiefernholzprobekörper mit Splintholzanteil zur Verfügung gestellt. Vor dem Beginn der Versuche wurde der Gehalt des Holzes auf leicht lösliche Bestandteile bis in eine Materialtiefe von 8 mm analysiert (s. Abb. 20). Von allen entnommenen Proben wurden Rückstell-

²⁵ Schwar 2004, wie Anm. 1

proben für überprüfende Analysen durch ein Zweitlabor aufgehoben. Dies galt auch für die weiteren Probenahmen. Die Entnahme der Holzproben erfolgte mit einem 20 mm Forstnerbohrer an drei nebeneinander liegenden Stellen.

Der Kiefernholzprobekörper wurde 24 h in einer 30%igen Feuerschutzsalzlösung gelagert (s. Abb. 21 und 22). Die Tränkung erfolgte in einem Folienbad. Der Probekörper wurde mit der Mehrzahl der fast senkrecht angeschnittenen Jahresringe des Splintholzes in Richtung des Folienbodens eingelegt. Dadurch sollte die bestmögliche Aufnahme der Feuerschutzsalzlösung begünstigt werden. Durch eingelegte mehrlagige Zellulosestreifen wurde ein Abstand der Holzfläche zum Folienboden von 2-3 mm und damit der ungehinderte Zutritt der Salzlösung gewährleistet. Das Feuerschutzsalz stellte der Projektpartner Hans-Norbert Marx aus Bühl-Vimbuch zur Verfügung.

Im Ergebnis der Tränkung vom 15. zum 16.10.2012 nahm der Probekörper 1150 ml 30% Salzlösung auf.



Abb. 20



Abb. 21



Abb. 22



Abb. 23

- Abb. 20 Kiefernholzprobe mit jeweils drei Bohrmehlentnahmestellen für die Voruntersuchung auf leicht lösliche Bestandteile sowie für die Rückstellprobe
- Abb. 21 Lagerung der Holzprobe im Folienbad
- Abb. 22 Folienbad zur Tränkung der Holzprobe mit 30% iger Feuerschutzsalzlösung
- Abb. 23 Holzprobe nach der Tränkung mit der Feuerschutzsalzlösung. Erneute tiefenabhängige Probeentnahme für die Bestimmung der leicht löslichen Bestandteile und für die Rückstellprobe

Nach der Abtrocknung des Probekörpers erfolgte am 29.10.2012 die Beprobung des Holzes hinsichtlich der Eindringtiefe und –menge des Feuerschutzsalzes (s. Abb. 23).

In diesem Zusammenhang wurden tiefenabhängig Holzproben aus 0-0,5 cm, 0,5-1 cm und 1-1,5 cm Materialtiefe entnommen und hinsichtlich der Summe der leichtlöslichen Salze untersucht. Die Probenahme erfolgte auf der Seite des Kantholzes, die während der Tränkung nach unten gelagert war. Trotz des Abspülens, Trocknens und Fettens des Forstnerbohrers zeigte dieser nach einer ca. sechswöchigen Lagerung bis zur nächsten Probenentnahme erhebliche Korrosionserscheinungen, wie sie häufig auch an Eisen-teilen in Dachräumen beobachtet werden, in denen Flammschutzsalze angewandt wurden.

Am 12.12.2012 erfolgte der erste Entsalzungsversuch mit einem Kompressenmaterial, das durch die Diplomsteinrestauratorin Corinna Grimm zur Verfügung gestellt wurde. Die Sackware trug folgender Aufschrift:

Kompresse J. Rettenmaier Söhne GmbH + Co
Fasern aus der Natur, D73494 Rosenberg Germany Holzmühle
Tel.: +49-(0)-7967/152-0
e-mail: info@jrs.de, www.jrs.de
ARBOCEL Typ BC200 20 kg Powdered Cellulose
Zertifiziert nach ISO 9001

Der Auftrag des Kompressenmaterials erfolgte durch Aufwerfen auf die waagrecht nach oben gedrehte Seite der Holzprobe, die während der Tränkung im Folienbad nach unten gelagert war (s. Abb. 25). Die mit Kompressenmaterial beaufschlagte Fläche betrug 50 x 14 cm. Die Auftragstärke betrug ca. 1,5 cm (s. Abb. 25).



Abb. 24

Abb. 25

Abb. 24 Lagerung und Vorbereitung der Holzprobe für den Kompressenauftrag
Abb. 25 1,5 cm hoher Kompressenauftrag auf die Holzprobe. Durch das Aufwerfen des Kompressenmaterials, sollte ein möglichst guter Kontakt zur Holzprobe erzeugt werden.

Bezogen auf die Fläche eines Quadratmeters betrug das Mischungsverhältnis der Kompressen 22,8 Liter destilliertes Wasser auf 3342 g trockenes Kompressenmaterial. Während der Einwirkzeit der Kompressen zeichnete sich auf der Stirnseite der Holzprobe nach einer ersten Abtrocknungsphase ein relativ beständiger Feuchtehorizont in ca. 1,5 cm Materialtiefe ab (s. Abb. 26 und 27).



Abb. 26 (li.), Abb. 27 (re.)

Abbildung 27 dokumentiert den Zustand der Durchfeuchtung am 13.12.2012, einen Tag nach dem Kompressenauftrag, und Abbildung 28 am 14.12.2012, zwei Tage nach dem Kompressenauftrag. Es zeichnete sich eine Materialdurchfeuchtung bis in ca. 1,5 cm Materialtiefe des Kiefernholzes ab.

Unter Raumklimabedingungen von ca. 18-20 °C und 32-42% rel. Feuchte lagerte die mit der Komresse beauflagte Holzprobe bis zum 20.12.2012. Zu diesem Zeitpunkt war die Komresse trocken und zeigte deutliche Schrumpf- und Ablösungszeichen (s. Abb. 28 und 29). Mit der Ausbildung von Rissen und Ablösungen zwischen Kompressenmaterial und Holzoberfläche wird der Transport von Salzlösung in die Komresse unterbrochen. Aus diesem Grund wurde der Entsalzungsversuch zu diesem Zeitpunkt beendet. Schimmelbildung an der Komresse oder am Holz war nicht erkennbar.



Abb. 28



Abb. 29

Die Abbildungen 29 und 30 dokumentieren Schrumpf- und Ablösungsprozesse innerhalb des Kompressenmaterials und besonders vom Rand der Holzprobe ausgehend

Am 20.12.2012 erfolgte im Zusammenhang mit der Abnahme der Komresse die Probenahme aus dem Kompressenmaterial. Aus der gesamten Kompressenfläche von 50 x 14 cm wurden drei Kompressenflächen mit einer Abmessung von jeweils 10 x 10 cm entnommen (s. Abb. 31). Anschließend erfolgte die tiefenabhängige Probenentnahme aus dem Kiefernholz. Erneut wurde mit einem 20 mm Forstnerbohrer aus 0-0,5 cm, 0,5-1,0 cm und 1-1,5 cm Materialtiefe Holzmaterial ausgebohrt (s. Abb. 30). Trotz des Abpinsels der Holzoberfläche weist diese nach der Kompressenentsalzung noch eine Vielzahl von Anhaftungen der weißen Zellulosefasern aus der Komresse auf.



Abb. 30

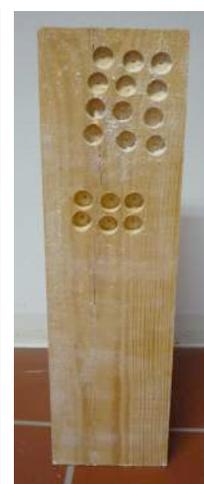


Abb. 31

Die Abbildungen 30 und 31 dokumentieren die Bereiche der Probenahme, von denen Kompressenmaterial sowie die Kiefernholzproben entnommen wurden. Die Beprobung des Kiefernholzes erfolgte tiefenabhängig in dem Bereich, über dem die Kompressenprobe Nr. 1 entnommen wurde.

Im Ergebnis der Bestimmung der Summe der leicht löslichen Salze im Labor wird deutlich, dass die Holzprobe vor dem Versuch nur geringe Anteile (< 1 Ma%) eluierbarer Verbindungen aufwies. Durch die Tränkung mit 30%iger Feuerschutzsalzlösung konnte diese im Zeitraum von 24 Stunden bis in 1 cm Holztiefe eingetragen werden. Die Hauptkonzentration lagert sich hierbei zwischen der Oberfläche und einer Materialtiefe von 0,5 cm ein (siehe Tabelle 3).

Durch die Übertragung der in der Steinrestaurierung etablierten Kompressenentsalzung auf die unter Laborbedingungen untersuchte Holzprobe konnte die prinzipielle Wirksamkeit einer Kompressenentsalzung für Feuerschutzsalze bestätigt werden. Bei einmaliger Anwendung ist es gelungen, die zuvor eingetragene Versalzung wieder zu extrahieren.

Tabelle 3

Probenbezeichnung		Wasserlösliche Bestandteile in Ma%
Ausgangsprobe	- unbehandeltes Holz	0,95
Ausgangsprobe	- Kompressenmaterial	0,69
Holzprobe nach Salzeintrag cm	- Materialtiefe 0,0 – 0,5	5,25
Holzprobe nach Salzeintrag cm	- Materialtiefe 0,5 – 1,0	1,56
Holzprobe nach Salzeintrag cm	- Materialtiefe 1,0 – 1,5	0,82
Holzprobe nach Kompressenentsalzung cm	- Materialtiefe 0,0 – 0,5	0,77
Holzprobe nach Kompressenentsalzung cm	- Materialtiefe 0,5 – 1,0	0,65
Holzprobe nach Kompressenentsalzung cm	- Materialtiefe 1,0 – 1,5	0,48
Kompresse nach Kompressenentsalzung	Kompressenprobe Nr. 1	3,45
Kompresse nach Kompressenentsalzung	Kompressenprobe Nr. 2	3,16
Kompresse nach Kompressenentsalzung	Kompressenprobe Nr. 3	2,96

Für die Erprobungen der Kompressenentsalzung an Bauteilen in Dachstühlen leiten sich aus den Laborversuchen folgende Ansätze ab:

1. Es ist zu erwarten, dass bei sehr alten Hölzern die Lösung der Feuerschutzsalze auch bei kürzerer Applikationszeit tiefer als 1 cm eingedrungen sein könnte. Entsprechende tiefenabhängige Voruntersuchungen zur Versalzungstiefe der Holzbauteile müssen vor den Vorortversuchen durchgeführt werden.
2. Die Kompressenentsalzung kann nur wirksam ablaufen, wenn ein inniger Kontakt zwischen Holzoberfläche und Kompressenmaterial hergestellt wird. Dazu kann es notwendig sein, die Holzoberfläche vorzureinigen, um loser Verschmutzung oder lose anhaftende Holzfasern zu entfernen. Das Kompressenmaterial kann per Hand angetragen

bzw. angeworfen oder wie in der Steinrestaurierung bewährt, per Spritzverfahren sehr effektiv aufgetragen werden. Entsprechend der Erfahrungen von Frau Grimm kann der Kontakt des Kompressenmaterials auf Steinoberflächen mit dieser Technologie am besten und beständigsten hergestellt werden.

3. Die Kompressenanwendung sollte entsprechend den Erfahrungen aus der Steinrestaurierung und den Hinweisen von Frau Grimm während einer Jahreszeit erfolgen, in der das Kompressenmaterial gut aber nicht zu schnell abtrocknen kann. Während der Kompressenanwendung muss genügend Zeit für die Lösungsprozesse der Feuerschutzsalze im Holz sowie die Transportvorgänge der Salzlösung aus dem Holz in die Kompressen zur Verfügung stehen. Bei zu langer Auflage der feuchten Kompressen besteht die Gefahr der Schimmelbildung.

4. Durch eine Nachuntersuchung muss die Wirkung der Kompressenentsalzung überprüft werden.

5. Nach der Abnahme der Kompressen ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl von Faserrückständen auf der Holzoberfläche zurückbleiben. Eine entsprechende Nachreinigung ist zu erproben und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die im Holz verbliebenen Reste der Feuerschutzsalze zu überprüfen.

1.3.6.2 Überführung in inerte Verbindungen

Ein weiterer Versuch zielte auf den Nachweis der Wirksamkeit der Umwandlung von Sulfat in Bariumsulfat bzw. Calciumsulfat ab. Dazu wurden Fichten- und Kiefernholzprobekörper definiert mit Na_2SO_4 beaufschlagt, anschließend mit Calciumacetat bzw. Bariumacetat behandelt und schließlich die freien Salze herausgewaschen. Es zeigte sich, dass die Calciumacetatbehandlung der vorbehandelten Kiefernholzer zu einer Reduktion der leichtlöslichen Salze um gut ein Drittel und die Bariumacetatbehandlung zu einer Reduktion auf gut ein Drittel des Ausgangswertes führte (s. Tabellen 4 und 5). Bei den Fichtenholzprobekörpern konnte mittels Calciumacetat eine Reduktion auf ein Drittel und mittels Bariumacetat auf weniger als 15 % des Ausgangswertes erreicht werden.

Tabelle 4
Holzproben aus Fichte (Proben vom 14.01.2014)

int.-Nr.	Bezeichnung		[mg/5 H*]	in %
34 830	F 11 – F 15	Eingebrachte Menge Na_2SO_4	2850	
		entspricht SO_4	1927	
		eluiert Nullprobe als SO_4	240	12,5
34 832	F 6 – F 10	Eingebrachte Menge Na_2SO_4	2360	
		entspricht SO_4	1596	
		eluiert als SO_4 nach Calciumacetatbehandlung	80	5
34 831	F 1 – F 5	Eingebrachte Menge Na_2SO_4	2760	
		entspricht SO_4	1866	
		eluiert als SO_4 nach Bariumacetatbehandlung	35	1,9

Tabelle 5
Holzproben aus Kiefer (Proben vom 14.01.2014)

int.-Nr.	Bezeichnung		[mg/5 H*]	in %
34 833	K 11 – K 15	Eingebrachte Menge Na ₂ SO ₄	3460	
		entspricht SO ₄	2339	
		eluiert Nullprobe als SO ₄	590	25,2
34 835	K 6 – K 10	Eingebrachte Menge Na ₂ SO ₄	2810	
		entspricht SO ₄	1900	
		eluiert als SO ₄ nach Calciumacetatbehandlung	360	19,0
34 834	K 1 – K 5	Eingebrachte Menge Na ₂ SO ₄	3370	
		entspricht SO ₄	2278	
		eluiert als SO ₄ nach Bariumacetatbehandlung	260	11,4

* bezogen auf die jeweils bezeichneten 5 Normhölzer gemäß DIN EN 113
(15 x 25 x 50 mm³)

Tabelle 6
Vergleich der Mobilität von Natrium- und Sulfationen bei Auswaschversuchen

int.-Nr.	Bezeichnung		[mg/5 H*]	in %
34 830	F 11 – F 15	Eingebrachte Menge Na ₂ SO ₄	2850	
		entspricht SO ₄	1927	
		entspricht Na	923	
		eluiert als SO ₄	240	12,5
		eluiert als Na	66	7,2
34 833	K 11 – K 15	Eingebrachte Menge Na ₂ SO ₄	3460	
		entspricht SO ₄	2339	
		entspricht Na	1120	
		eluiert als SO ₄	590	25,2
		eluiert als Na	155	13,8

* bezogen auf die jeweils bezeichneten 5 Normhölzer gemäß DIN EN 113
(15 x 25 x 50 mm³)

Die unterschiedliche Retention von den Natrium- und den Sulfationen ist im Augenblick nicht erklärbar und muss ggf. einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

1.3.7 Ergebnisse und Bewertung der Versuche in Naumburg

Zur Bewertung der Sanierungserfolge an den vor längerer Zeit behandelten Objekten wie auch den in Naumburg angelegten Probeflächen wurden folgende Kriterien entwickelt:

- (1) Handelt es sich um ein aktives oder passives Verfahren?
- (2) Ist die Wirkung kurativ oder verzögernd?
- (3) Wirkt das Verfahren quellen- oder wirkungsorientiert?
- (4) Ist der Wirkmechanismus bekannt oder unbekannt (Deklaration)?
- (5) Wie dauerhaft ist die Wirkung?
- (6) Wie wirksam ist das Verfahren in Tiefen > 5 mm unter der Holzoberfläche?
- (7) Gibt es statisch relevante Nebenwirkungen (z.B. Querschnittsminderung)?
- (8) Gibt es chemische Nebenwirkungen (Ausblühungen)?
- (9) Kommt es zu optischen Nebenwirkungen (z.B. Verlust von Arbeitsspuren, Ausprägung eines sichtbaren Belages, Verfärbung)?
- (10) Wird die Oberfläche der Hölzer verhärtet oder gegenüber der Umgebung abgeschlossen)?
- (11) Wie sind die Verarbeitungsbedingungen?
- (12) Welche Kosten sind anzunehmen? Hier wurde versucht, den Aufwand pro qm und am Modell Meisenheim zu berechnen.

Die am 03.04.2013 angelegten Probeflächen wurden am 13.06.2013, am 16.11.2013 und am 11.03.2014 in Augenschein genommen und beschrieben, am 18.09.2014 noch einmal angesehen.

Am 13.06.2013 wurden Holzproben von den Probeflächen genommen und anschließend im Labor Marx auf Sulfate und Phosphate untersucht. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung des Kompressenmaterials der Probeflächen F1 und F2. Die Holzproben stammen aus der Oberfläche bis zu 5 mm Tiefe. Die Vergleichsprobe der nicht behandelten Fläche (F3) wurde am 3.4.2013 genommen.

Tabelle 7
Probeflächen im Naumburger Dom: Sulfat- und Phosphatgehalt nach Behandlung

int.-Nr./ Probe	Bezeichnung der Fläche	Behandlung	SO ₄ mg/kg Holz	PO ₄ mg/kg Holz
34 450/P 1	F2	Kompressenbehandlung dest. Wasser ohne Tensid	23.000	17.000
34 451/P 2	F1	Kompressenbehandlung, dest. Wasser mit Tensid	17.000	6.100
34 222/P2	F3	Nur gereinigt/Referenzwert	39.000	14.000
34 452/P 3	F4	Waschsauger mit Tensid	52.000	23.000
34 453/P 4	F7	Behandlung mit Calciumacetat	45.000	15.000
34 454/P 5	F6	Behandlung mit Alkydharzlösung	41.000	20.000
34 455/P 6	F8	Behandlung mit Natriumsilikat	34.000	11.000

34 456/P 7	F9	Behandlung mit Bariumacetat	70.000	27.000
34 457/P 8	F5	Behandlung mit Polyacrylat	43.000	21.000
34 458/P 9		Kompressenrest	33.000	18.000
34 459/P 10		Kompressenreste	29.000	14.000

Am 13.8.2013 wurden mit dem Feuchtemessgerät die relativen **Holzfeuchtwerte** erfasst. Die Begehung fand nach einer längeren trockenen Sommerphase statt, wie sich aus den Messungen an neu verbauten Hölzern ablesen lässt. Die dort gemessene relative Feuchte lag zwischen 14 und 15%.

Die durchschnittliche Feuchte der mazerierten Hölzer neben den Probeflächen lag bei 20,6 bis 21%, war also auch sehr gleichartig. Bei den Musterflächen ergaben sich Werte von 18,1 bis 22%.

Tabelle 8
Probeflächen im Naumburger Dom: Holzfeuchte nach Behandlung

Musterfläche	Behandlung	% rel. Holzfeuchte Widerstandsmessung Probefläche	% rel. Holzfeuchte daneben Altholz	% rel. Holzfeuchte daneben Neuholz
F2	Kompresse, dest. Wasser ohne Tensid	18,2 unter Kompresse 18,2 neben Kompresse	21,1	14
F1	Kompresse, dest. Wasser mit Tensid	18,1 unter Kompresse 19,0 neben Kompresse 22,0 Zellulose	21	14,3
F3	Nur gereinigt	20,3	20,8	14,5
F4	Waschsauger mit Tensid	20,9	21,6	--
F7	Behandlung mit Calciumacetat	18,5 18,1	20,9	--
F6	Behandlung mit Alkydharzlösung	20,2	20,6	14
F8	Behandlung mit Natriumsilikat	20,1	20,6	14,2
F9	Behandlung mit Bariumacetat	19,1	20,4	15
F5	Behandlung mit Polyacrylat	20	22	14,5

Besondere Beobachtungen:

Bei den Kompressen lag der Feuchtwert unter den noch vorhandenen Kompressen niedriger als in den Bereichen, wo die Kompressen im Juni entfernt worden sind. Die Kompressenoberfläche war spürbar noch feucht. Daraus ist abzuleiten, dass die Kompressen möglichst lang auf dem Holz verbleiben sollten.

Der Feuchtwert der Probestfläche F4, die mit dem Waschsauger behandelt wurde, ist deshalb hoch, weil hier eine Zweitbehandlung im Juni erfolgte, und der Normalwert noch nicht erreicht wurde.

Als „Normalwert“ für die Musterflächen ist die Fläche F3 zu verwenden. Diese Fläche wurde wie die anderen Musterflächen gereinigt, sodann aber in diesem Zustand belassen.

Die niedrigen gemessenen Werte zeigen an, dass zu diesem Zeitpunkt die Salze auskristallisiert waren.

1.3.7.1 Trockene Reinigung mittels Staubsauger

Die Reinigung der Holzoberflächen mittels Staubsauger, in Naumburg nicht angewandt, jedoch in Meisenheim, bewirkt eine „sanfte“ Entstaubung der Oberfläche. Diese reicht nicht aus, um die Mazeration zu bekämpfen, kann jedoch angezeigt sein, wenn trotz nachgewiesener Salzbelastung noch keine akuten Mazerationerscheinungen beobachtet werden und akzeptable Bedingungen z.B. für Zimmermannsarbeiten geschaffen werden sollen.



Abb. 32, 33 Meisenheim, Schlosskirche, Zapfenschlösser vor und nach Reinigung mittels rotierender Kunststoffbürste

Bewertung:

Passives Verfahren, u.U. geringfügig verzögernd, wirkungsorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Reduktion von Stäuben/losen Fasern, wenig dauerhaft bei akuter/beginnender Mazeration, in Tiefen > 5mm nicht wirksam, keine statischen und chemischen Nebenwirkungen, keine optischen Nebenwirkungen, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Transport Staubsauger zum Arbeitsort notwendig, Arbeitsschutzmaßnahmen gegen Staub erforderlich.

1.3.7.2 Trockene Reinigung mit rotierenden Bürsten

Der Reinigungserfolg wird mitbestimmt durch das Material der Bürste. Im Vergleich zur schonenden Kunststoffbürste ist die Messingbürste gründlicher, weshalb es u. U. zu einem zu starken Abtrag von Fasern kommt. Nach wenigen Monaten zeigen sich an den Probestflächen neue Faseraufstellungen, die Mazeration kann allein durch eine mechanische Reinigung, die auf die Reduktion der Salze abzielt, nicht gestoppt werden. Offenbar dringen nach der Reinigung der Oberfläche Salze aus der Tiefe nach außen.

Zustand Juni 2013: Oberflächen recht stark beansprucht, einzelne Fasern stellen sich auf,

Zustand November 2013: Fasern deutlich aufgestellt, wiederum beginnende Mazeration,

Zustand März 2014: deutliche Faseraufstellung,

Zustand September 2014: deutliche Faseraufstellung.



Abb. 34 Naumburg, Dom, Feld 3 nach Trockenreinigung mit unterschiedlichen Bürsten
Zustand am 11.03.2014

Bewertung:

Passives Verfahren, u.U. geringfügig verzögernd, wirkungsorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Reduktion von losen Fasern, nicht dauerhaft bei akuter Mazeration, in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, evtl. statische Nebenwirkungen bei zu großem Abtrag an Holzverbindungen, keine chemischen Nebenwirkungen, u. U. optische Nebenwirkungen: Verlust von historischen Arbeitsspuren, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Arbeitsschutzmaßnahmen gegen Staub erforderlich, Entsorgung des Reinigungsproduktes als besonders überwachungsbedürftiger Abfall.

1.3.7.3 Nassreinigung ohne/ mit dem Waschwasser beigefügten Tensiden

Die Nassreinigung führt zunächst zu einem besseren Ergebnis als die trockene. Jedoch kommt es auch hier nach einiger Zeit zu erneuten Faseraufstellungen, so dass festgestellt werden muss, dass auch die Nassreinigung allein nicht zur Bekämpfung akuter Mazerationserscheinungen ausreicht. Möglicherweise regt die kurzzeitig aufgebrachte Feuchtigkeit sogar den Schadensprozess an, weshalb Nassreinigungsverfahren nur eingesetzt werden sollten, wenn weitere Behandlungsschritte folgen, nicht an latent gefährdeten Konstruktionen, wo Salze nachgewiesen aber noch keine Mazerationserscheinungen beobachtet wurden.



Abb. 35 Naumburg, Dom, Feld 4, Zustand nach Nassreinigung mit Tensid-Zusatz nach einem Jahr (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: leichte Ausblühungen, einzelne Fasern stellen sich wieder auf,
Zustand November 2013: Fasern leicht aufgestellt, geringe Ausblühungen,
Zustand März 2014: Ausblühungen, leichte Faseraufstellungen
Zustand September 2014: Ausblühungen, Faseraufstellungen.

Bewertung:

Passives Verfahren, u.U. geringfügig verzögernd oder aber den Schadensprozess befördernd, wirkungs-/quellenorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Reduktion von losen Fasern und oberflächennah vorhandenen Salzen und HSM-Bestandteilen, wenig dauerhaft bei akuter Mazeration, in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen und chemischen Nebenwirkungen außer evtl. Mobilisierung der Salze, keine optischen Nebenwirkungen, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften, Verarbeitungsbedingungen: Arbeitsschutzmaßnahmen gegen Staub erforderlich, Entsorgung des Reinigungsproduktes als besonders überwachungsbedürftiger Abfall.

1.3.7.4 Trockenreinigung und anschließende Beschichtung mit Natriumsilikat

Aufgebracht wurde eine Natriumsilikatzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger Lösung. Zur Aufbringung wurde ein breiter Pinsel verwendet, dabei auf die Vermeidung von Tropfverlusten geachtet. Bereits nach wenigen Wochen zeigen sich starke Ausblühungen.



Abb. 36 Naumburg, Dom, Feld 8, Zustand nach Natriumsilikatbehandlung (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: deutliche Ausblühungen,

Zustand November 2013: starke Ausblühungen, Salzkristalle an der Oberfläche, geringe Faseraufstellung,

Zustand März 2014: deutliche Salzablagerungen

Zustand September 2014: Salzausblühungen.

Bewertung:

Aktives und passives Verfahren, kurativ, quellen- und wirkorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Neutralisation von Säuren, außerdem Verfestigung und Stabilisierung der Struktur, eventuell dauerhaft wirksam, in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen Nebenwirkungen, Feuerschutz als chemische „Nebenwirkung“, optische Nebenwirkungen: deutliche Salzablagerung an der Oberfläche, deshalb nicht empfehlenswert, nicht filmbildend, deshalb keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Lösung kann verstrichen oder gesprüht werden, Sprüh- und Tropfverluste können zu Schäden am Bauwerk führen, Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

1.3.7.5 Trockenreinigung und anschließende Beschichtung mit einem nicht filmbildenden Polyacrylat

Mittels Pinseln wurde eine nicht filmbildende Polyacrylatzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger Lösung aufgestrichen, dabei wurden Tropfverluste vermieden. Auch nach einem Jahr ist der optische Eindruck sehr gut: die Oberflächen wirken „sauber“ und intakt.



Abb. 37 Naumburg, Dom, Feld 5, Zustand nach Polyacrylatbeschichtung (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: Oberflächen wirken kaum verändert, leichte Farbvertiefung,
 Zustand November 2013: keine Ausblühungen, glatte Oberfläche, kaum aufgestellte Fasern, leicht angefeuerte Farbe,
 Zustand März 2014: geringe Farbvertiefung, sehr geringe Ausblühungen
 Zustand September 2014: unverändert gegenüber März.

Bewertung:

Passives Verfahren, verzögernd, wirkungsorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Verfestigung und Stabilisierung der Struktur, dauerhaft wirksam (Vergleichsfälle 18 Jahre), in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen und chemischen Nebenwirkungen, optische Nebenwirkungen: u.U. Farbvertiefung, nicht filmbildend, deshalb keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften von innen nach außen, aber Herabsetzung der Möglichkeit der Aufnahme von Wasser aus der Umgebungsluft durch die Salze im Holz; Verarbeitungsbedingungen: Lösung kann verstrichen oder gesprüht werden, Sprüh- und Tropfverluste können zu Schäden am Bauwerk führen, Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

1.3.7.6 Trockenreinigung und anschließende Beschichtung mit einem Alkydharz

Mittels Pinseln wurde eine Alkydharzzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger Lösung aufgestrichen, dabei wurden Tropfverluste vermieden.



Abb. 38 Naumburg, Dom, Feld 6, Zustand nach Alkydharzbeschichtung (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: leichte Ausblühungen, Farbvertiefung,
Zustand November 2013: starke Farbvertiefung, Ausblühungen,
Zustand März 2014: Oberfläche hart, Farbvertiefung, Ausblühungen
Zustand September 2014: unverändert gegenüber März.

Bewertung:

Passives Verfahren, verzögernd, wirkungsorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Verfestigung und Stabilisierung der Struktur, dauerhaft wirksam (Vergleichsfälle > 18 Jahre), in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen und chemischen Nebenwirkungen bekannt, wenn nicht filmbildend aufgebracht optische Nebenwirkungen: Farbvertiefung, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften von innen nach außen, aber Herabsetzung der Möglichkeit der Aufnahme von Wasser aus der Umgebungsluft durch die Salze im Holz; Verarbeitungsbedingungen: Lösung kann verstrichen oder gesprüht werden, Sprüh- und Tropfverluste können zu Schäden am Bauwerk führen, Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

1.3.7.7 Trockenreinigung und anschließende Beschichtung mit Bariumacetat

Mittels Pinseln wurde auf zwei Flächen eine Bariumacetatzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger bzw. etwas höher dosierter Lösung aufgestrichen, dabei wurden Tropfverluste vermieden. Nach einem Jahr zeigt sich eine leichte Vergrauung.



Abb. 39 Naumburg, Dom, Feld 9, Zustand nach Bariumacetatapplikation (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: Oberflächen kaum verändert, leicht aufgehellt, schwacher weißlicher Belag,
Zustand November 2013: sehr geringe Aufhellung, geringe Ausblühungen, sehr leichte Faseraufstellung,
Zustand März 2014: geringe Ausblühungen, leichte Farbaufhellung/Vergrauung, keine Faseraufstellung
Zustand September 2014: wie März.

Bewertung:

Aktives Verfahren, kurativ, quellenorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Umwandlung der Salze in stabile Verbindungen, dauerhaft wirksam, in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen und (erwartbar auch keine chemischen Nebenwirkungen, optische Nebenwirkungen: leichte Vergrauung, nicht filmbildend, deshalb keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Lösung kann verstrichen oder gesprüht werden, Flächendosierung ist schwierig, Sprüh- und Tropfverluste können zu Schäden am Bauwerk führen, Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

1.3.7.8 Trockenreinigung und anschließende Beschichtung mit Calciumacetat

Mittels Pinseln wurde eine Calciumacetatzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger Lösung aufgestrichen, dabei wurden Tropfverluste vermieden.

Nach wenigen Wochen zeigt sich eine starke Aufhellung, nach einem Jahr leichte Faseraufstellungen, Anzeichen einer neuerlichen Mazeration.



Abb. 40 Naumburg, Dom, Feld 7 Zustand nach Calciumacetatbehandlung (11.3.2014)

Zustand Juni 2013: Aufhellung, Vergrauung, Ausblühungen

Zustand November 2013: Aufhellung, Vergrauung, Ausblühungen, Fasern aufgestellt

Zustand März 2014: weißlicher Belag, leichte Faseraufstellung, Belag unschön,

Zustand September 2014: weißlicher Belag, leichte Faseraufstellung.

Bewertung:

Aktives Verfahren, kurativ, quellenorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Umwandlung der Salze in stabile Verbindungen, dauerhaft wirksam, in Tiefen > 5 mm nicht wirksam, keine statischen, erwartbar auch keine chemischen Nebenwirkungen, optische Nebenwirkungen: starke Vergrauung, deshalb nicht empfehlenswert, nicht filmbildend, deshalb keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Lösung kann verstrichen oder gesprüht werden, Flächendosierung schwierig, Sprüh- und Tropfverluste können zu Schäden am Bauwerk führen, Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

1.3.7.9 Trockenreinigung und anschließende Entsalzung mit einer Zellulosekompressen, befeuchtet mit destilliertem Wasser

Per Hand wurde eine Zellulosekompressen, befeuchtet mit destilliertem Wasser, in einer Schichtdicke von ca. 12 mm aufgebracht, dabei wurden Tropfverluste vermieden.



Abb. 41 Naumburg, Dom; Feld 2 Zustand nach Kompressenentsalzung (11.3.2014)

Nach Abnahme der Kompresse sehen die Oberflächen „sauber“ aus. Das Kompressenmaterial hat, wie die Laboruntersuchung zeigt, erhebliche Mengen an Salz aufgenommen: es enthielt 33.000 mg SO₄ und 18.000 mg PO₄ jeweils bezogen auf 1kg Kompressenmaterial. Eine Probe vom benachbarten Feld 2 ergab nach der Behandlung 17.000 mg/kg Holz SO₄ und 6.100 mg/kg Holz PO₄, während die abgenommene Kompresse dort 29.000 mg SO₄ und 14.000 mg PO₄/kg Kompressenmaterial enthielt. Diese Untersuchungsergebnisse zeigen auch, dass die Feuerschutzsalze in den Materialoberflächen sehr inhomogen verteilt sind, was sich aus der Technologie der Aufbringung der FSM (im Sprühverfahren) und dem unterschiedlichen Saugverhalten der alten Hölzer erklären lässt. (Aus diesem Grund wird zum Nachweis von FSM-Bestandteilen die Analyse einer Mischprobe empfohlen!).

Offenbar werden also große Teile der vor Jahrzehnten eingetragenen Salze von der Kompresse aufgenommen. Da der Entsalzungserfolg von vielen Randbedingungen abhängt (mehr oder weniger gute Anhaftung der Kompresse auf der Holzoberfläche, eingetragene Salzmenge an unterschiedlichen Stellen der Konstruktion, Holzstruktur), erscheint es nicht sinnvoll, absolute Zielwerte festzulegen. Jedoch sollte die Wirksamkeit der Entsalzung unbedingt im Vergleich des Ausgangswertes mit dem erreichten Wert bewertet werden.

Zustand Juni 2013: keine Verfärbungen, „sauberer“ Gesamteindruck

Zustand November 2013: leicht aufgestellte Holzfasern im Bereich, wo Kompresse im Mai entfernt wurde, Holz-Oberfläche direkt nach Abnahme der Kompresse leicht feucht, Kompresse löst sich einfach

Zustand März 2014: Oberflächen wirken „sauber“

Zustand September 2014: wie März 2014.

Bewertung:

Aktives Verfahren, kurativ, quellenorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Salze werden aus dem Holz entfernt, dauerhaft wirksam, in Tiefen > 5 mm eingeschränkt wirksam, keine statischen und erwartbar auch keine chemischen Nebenwirkungen, optische Nebenwirkungen: z.T. bleiben Reste der Kompresse in Rissen u.ä. zurück, nicht filmbildend, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Kompresse kann per Hand oder mittels Putzmaschine aufgebracht werden, Fußboden sollte abgeplankt werden, um Tropfverluste/ Verunreinigungen zu vermeiden, die wegen des Wassers Schäden am Bauwerk verursachen können.

1.3.7.10 Trockenreinigung anschließende Entsalzung mittels Zellulosekompreße mit Tensid-Zusatz

Per Hand wurde eine Zellulosekompreße, befeuchtet mit destilliertem Wasser mit einem Tensid-Zusatz, in einer Schichtdicke von ca. 12 mm aufgebracht, dabei wurden Tropfverluste vermieden. Nach Abnahme der Kompreße sehen die Oberflächen „sauber“ aus. Das Kompressenmaterial hat erhebliche Mengen an Sulfat und Phosphat aufgenommen.

Zustand Juni 2013: keine Verfärbungen, „sauberer“ Gesamteindruck

Zustand November 2013: Holz unter der Kompreße trocken, Kompreße löst sich leicht, sehr geringe Faseraufstellung,

Zustand März 2014: Oberflächen wirken „sauber“,

Zustand September 2014: wie März 2014.



Abb. 42 Naumburg, Dom, Feld 1 Zustand nach Kompressenentsalzung (13.6.2013)

Bewertung:

Aktives Verfahren, kurativ, quellenorientiert, Wirkmechanismus bekannt: Salze werden aus dem Holz entfernt, dauerhaft wirksam, in Tiefen > 5 mm eingeschränkt wirksam, keine statischen und erwartbar auch keine chemischen Nebenwirkungen, optische Nebenwirkungen: z.T. bleiben Reste der Kompressen in Rissen u.ä. zurück, nicht filmbildend, keine Beeinflussung der Diffusionseigenschaften; Verarbeitungsbedingungen: Kompressen kann per Hand oder mittels Putzmaschine aufgebracht werden, Fußboden sollte abgeplant werden, um Tropfverluste/ Verunreinigungen zu vermeiden, die wegen des Wassers Schäden am Bauwerk verursachen können.

1.3.8 Kosten und Nutzen der unterschiedlichen Verfahren

Im Ergebnis der Labor- wie der Praxistests sind sowohl die einschlägigen Trocken- (Entstaubung mittels Staubsauger, Handreinigung per Bürsten, Reinigung mit Bürstenschleifern, Strahlverfahren) als auch die Nassreinigungsverfahren insgesamt als geeignete Verfahren zu bezeichnen. Welches Verfahren für die jeweilige Anwendung gewählt wird, hängt auch von den weiteren Bearbeitungsschritten ab (s. u.).

Trockenreinigungsverfahren kommen besonders dann in Frage, wenn keine weitere Behandlung geplant ist, Nassreinigungsverfahren, wenn im Anschluss Kompressen zur Entsalzung oder Substanzen zur Verfestigung bzw. zur Überführung der Feuerschutzsalze in inerte Verbindungen aufgebracht werden sollen.

Für die genannten Verfahren wurden die Kosten, soweit als möglich, für das Beispiel Meisenheim mit Stand Juni 2014 ermittelt (s. u.).

Wenn Mazerationserscheinungen bereits sichtbar oder wegen hoher Sulfatwerte und stärker schwankendem Klima erwartbar sind, sind früher oder später weitere Behandlungsschritte erforderlich; eine bloße Reinigung der Oberflächen reicht nicht aus.

Der Arbeitsaufwand für den Auftrag von Lösungen per Pinsel oder im Spritzverfahren ist weitgehend unabhängig von der verwendeten Substanz, da immer Vorkehrungen zum Schutz der Bausubstanz vor herabtropfenden Flüssigkeiten zu treffen sind und fast immer auch persönliche Schutzmaßnahmen.

Kosten für geeignete Substanzen zur Verfestigung (Polyakrylate, Alkydharze) wie auch zur Überführung in inerte Verbindungen (mittels Bariumacetat) können derzeit nicht verglichen werden, da am Markt nicht alle Wirkstoffe in Produkten zur Mazerationsbekämpfung angeboten werden. Ein Großversuch mit Bariumacetatlösung könnte hier Klarheit schaffen.

Auch hinsichtlich der Kompressenentsalzung wird von den Projektbeteiligten in einem Folgeprojekt ein Großversuch angestrebt, um Erkenntnisse zum tatsächlichen Material- und Zeitaufwand zu gewinnen.

In die Kostenermittlung und -bewertung sind jedenfalls auch der Aufwand für das Arbeitsgerüst im Dachraum und die Schutzmaßnahmen für das gegen herabtropfende Substanzen oder umherfliegende Stäube zu schützende Bauwerk einzukalkulieren. Allein wegen dieser Kosten erscheint es sinnvoll, gegen die Mazeration im Kontext anderer Dacharbeiten vorzugehen, wenn ohnehin eine Baustelleneinrichtung inkl. Gerüst benötigt wird.

Die nachfolgende Kostenermittlung bezieht sich auf das Beispiel Meisenheim.

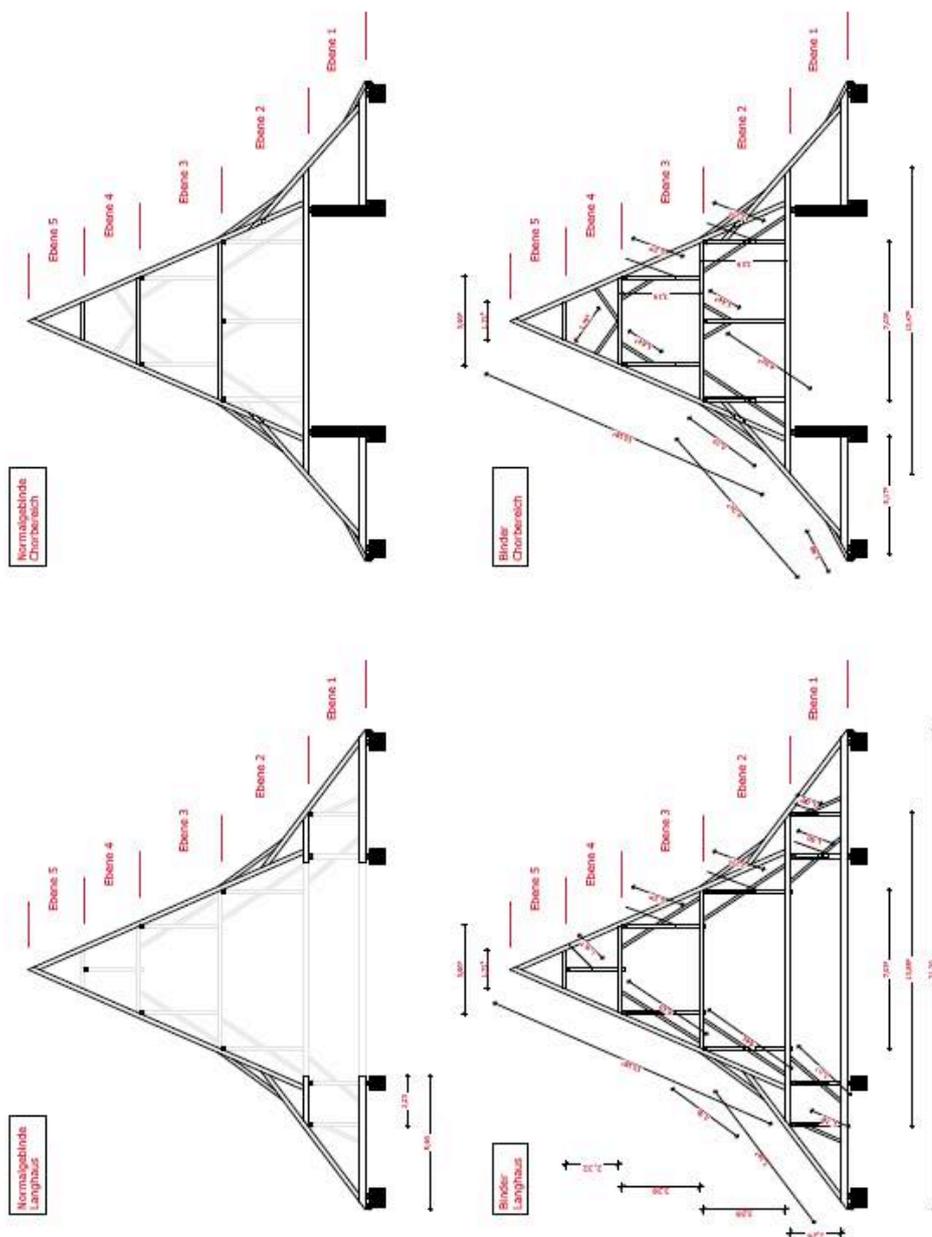


Abb. 43 Querschnitte Dachwerk Meisenheim (Zeichnung TU Karlsruhe)

Grundlage der Kostenermittlung ist die Massenermittlung. Diese besteht zunächst aus der Flächenberechnung. Hierbei sind die Holzoberflächen der Dachkonstruktion zu erheben. In Meisenheim war als Grundlage ein Aufmaß von Studenten der TU Karlsruhe zugänglich (s. Abb. 43). Es wurde dann die Abfolge der Gebinde der Dachkonstruktion erstellt und für jeden Bindertyp die Holzoberfläche abgewickelt. Hierzu mussten die Dimensionen der einzelnen Bauteile nach Länge, Breite und Höhe errechnet werden. Auf diesem Wege ergab sich für die insgesamt 45 Binder der Dachkonstruktion über Langhaus und Chor sowie die Längshölzer eine Gesamtholzoberfläche von 1.897,92 m².

Die Schätzung der Behandlungskosten stellt eine grobe Annäherung dar, weil nicht alle geeigneten Produkte am Markt verfügbar sind und Großversuche zur Erprobung der neuen Verfahren noch ausstehen (s.o.).

Tabelle 9
Kosten: Modellrechnung für Schlosskirche Meisenheim

Baustelleneinrichtung	Die überschlägige Kostenschätzung ging von mindestens 4 begehbaren Gerüstebenen aus, Abdeckung des Fußbodens mit Folie		18.000 €
Reinigung	Reinigung mit Bürstenschleifern und Handbürste	Ca.17 €/m ²	32.200 €
Behandlung	Behandlung mit einem chemischen Präparat: Arbeitsleistung 6 €/m ² , Beschichtungsprodukt ca. 5 €/m ² , ca. 25 €/l.	11 €/m ²	20.800 €
Reine Baukosten			71.000 €
Baunebenkosten		10%	7.100 €
Zusammen			78.100 €
MwSt.		19%	14.839 €
Gesamtkosten			92.900 €

Diskussion und Empfehlungen

Bei den Treffen mit dem Beirat wie auch in zahlreichen Gesprächen mit Berufskollegen wurden wiederholt die Ursachenzusammenhänge wie auch die Eingriffsmöglichkeiten und die Versuchsergebnisse diskutiert. Die meisten Ergebnisse dieser Diskussionen wurden oben in die Darstellung der Verfahren wie auch der Ergebnisse eingefügt, so die kaum anzunehmende Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften des Holzes durch Bariumacetat oder die Unschädlichkeit der bei der Umwandlung in inerte Verbindungen freigesetzten Essigsäure.

Zu vermuten ist, dass es nicht nur durch vor allem in den 1940er Jahren aufgebraachte Feuerschutzsalze sondern auch durch natriumchloridhaltige Verflüssiger, die bei der Herstellung von Tonziegeln eingesetzt werden, zu Mazerationserscheinungen kommen kann, wenn diese aus den Ziegeln ausgewaschen werden und in das Holz gelangen. Dieser Aspekt sollte in Erwägung gezogen werden, wenn die betroffene Konstruktion erst nach 1945 errichtet wurde.

Welche Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen in welchen Fällen zu empfehlen sind, hängt von der Schädigung der Hölzer, den Salzgehalten (insbesondere Sulfat, Natrium), den örtlichen Klimabedingungen und den darüber hinaus geplanten Maßnahmen ab.

Der Zeitpunkt des Eingreifens, die Entscheidung, überhaupt einzugreifen und nicht zuzuwarten, hängt vom Schadensbild, den Salzkonzentrationen und den Klimabedingungen ab.

Wie bei der Betrachtung der Kosten ausgeführt, sollte die Mazerationsbekämpfung wegen der aufwendigen Baustelleneinrichtung dann in Angriff genommen werden, wenn auch andere Maßnahmen anstehen: die Reparatur der Dachhaut, die zimmermannsmäßige Instandsetzung des Tragwerks, die Dekontamination von DDT-, Lindan- oder PCP-belasteten Hölzern usw. Meistens führen die durch die Mazeration hervorgerufenen Materialverluste – abgesehen von empfindlichen Knoten – zu geringfügigen Querschnittsminderungen, die keine statische Relevanz besitzen. Diese Feststellung kann (mit Einschränkungen!) v. a. für „überdimensionierte“ mittelalterliche Konstruktionen getroffen werden, so dass in diesen Fällen keine Veranlassung zu Aktionismus besteht. Barocke „Sparkonstruktionen“ u. ä. können früher statisch gefährdet sein. Eine sorgfältige Grundlagenermittlung (Analyse von Holzfasern aus dem oberflächennahen Bereich auf FSM- und HSM-Bestandteile, Klimabeobachtung im Dachraum über wenigstens ein Jahr, evtl. die Anlage von Musterflächen) und eine detaillierte Planung (Aufmaß, Arbeitssicherheitsplan) sollten jedem Eingriff vorausgehen!

Die Frage, ob die Mazeration die Holzfestigkeit beeinflusst (c 14 bis c 13?), konnte nicht abschließend beantwortet werden; hierzu wären weitere Laborversuche an behandelten und nicht behandelten Hölzern nötig. Es erwies sich als schwierig, die Holzfestigkeit im oberflächennahen Bereich, also dort, wo die Mazeration auftritt, zu messen bzw. den Festigkeitsverlust näher zu bestimmen. Versuche mit einem Bohrwiderstandsmessgerät erbrachten keine zufriedenstellenden Ergebnisse, weil die wollige Oberfläche nicht darstellbar war.

Auch wenn die Konstruktion keine akuten Mazerationsschäden aufweist, sollte vor jedem Eingriff dennoch eine Mischprobe aus dem oberflächennahen Bereich der Hölzer auf FSM- und HSM-Bestandteile analysiert werden (s. Anhang, Arbeitsanleitung Holzprobe).

Ergibt diese Analyse keinen nennenswerten Befund, so sind keine weiteren Maßnahmen im Sinne der Mazerationsvermeidung oder –bekämpfung nötig (Für einige HSM-Bestandteile existieren Grenzwerte/ Eingriffswerte!). Um das jeweilige Ergebnis einzuschätzen, kann ein Vergleich mit den in diesem Bericht aufgeführten Werten (s. S. 23-26) weiterhelfen.

Sind Feuerschutzsalze, insbesondere Sulfat und Natrium, in nennenswerter Menge nachweisbar und deshalb eine FSM-Behandlung in den 1940er Jahren (oder danach) anzunehmen, aber keine Auffaserungserscheinungen zu beobachten, so sollte die Klimaprotokollierung eingeleitet und über wenigstens ein Jahr geführt werden.

Sind Mazerationserscheinungen sichtbar, so werden über die Laboranalyse auch Salze nachweisbar sein. Auch in diesem Fall sollte eine Klimabeobachtung und –protokollierung begonnen werden. Gleichzeitig sollten die Bauakten auf ältere Holz- und Flammenschutzbehandlungen ausgewertet werden.

Falls keine weiteren Maßnahmen zur Mazerationsbekämpfung ausgeführt werden können, aber z. B. Arbeiten am Gebälk oder an der Deckung unumgänglich sind, ist eine Trockenreinigung (Entstaubung) vorzuschalten, insbesondere wenn auch HSM-Bestandteile wie DDT, Lindan oder PCP nachgewiesen wurden, die über die in Folge der Mazeration entstehenden losen Fasern sonst weiträumig verteilt werden.

Nassreinigungsverfahren, gegenüber den Trockenreinigungsverfahren gründlicher, sollten nur angewandt werden, wenn weitere Behandlungsschritte folgen.

Aus jetziger Sicht, also ohne Erfahrungen aus entsprechenden Großversuchen, wird die Entsalzung mittels Kompressen v. a. für besonders wertvolle Bereiche (mit Abbundzeichen, Floß-, Beilspuren usw., Knoten, Verbindungen) empfohlen. Die Entsalzung ist das einzige Verfahren, das die Ursache der Mazeration beseitigt! Dabei ist festzustellen, dass der Feuer-

schutzeffekt durch die Salzbehandlung(en) nur in einer verzögernden Wirkung besteht, keinen dauerhaft wirksamen Schutz darstellt. Wünschenswert ist, in absehbarer Zeit im Rahmen eines Großversuchs auszuprobieren, ob die Kompressen mit einer Putzmaschine aufgespritzt werden können, eventuell auch ohne einen vorgeschalteten Reinigungsschritt. Geschwächte Holzverbindungen könnten evtl. nach der Entsalzung mit Präparaten auf der Basis von Polyakrylaten oder/ und Alkydharzen verfestigt werden.

Weniger empfindliche Bereiche können (weiterhin) mit Polyakrylat- oder Alkydharzpräparaten verfestigt, oder die Salze mittels Bariumacetat in Schwerspat überführt werden. Letzteres sollte ebenfalls bald in einem Großversuch erprobt werden, weshalb diese Empfehlung hier mit dieser Einschränkung gegeben wird.

Ebenso sollte der Versuch unternommen werden, zwischen Holzoberfläche und Kompressen eine Trennschicht, z.B. ein Japanpapier, aufzubringen, um die Kompressen später rückstandsfrei abnehmen zu können (vgl. das Vorgehen bei der Salzreduktion in Putzen und an Wandmalereien). Diesem Ansatz steht jedoch entgegen, dass auch Vertiefungen, Risse, Spalten usw., vom Kompressenmaterial erreicht werden müssen, um die schädlichen Salze in möglichst großem Umfang zu entfernen.

Eine Polyacrylatbeschichtung (nach Nassreinigung) stellt eine verzögernde, konservierende Möglichkeit ohne größere Nebenwirkungen dar, die nach längerer Zeit (> 20 Jahre) evtl. Folgebehandlungen sinnvoll oder notwendig macht, da die schadensauslösenden Salze im Holz verbleiben. Hinsichtlich der Rezeptur und beim Auftrag der Substanzen ist eine Filmbildung und Abdichtung der Holzoberflächen zu vermeiden.

Da es sich um eine kurative Möglichkeit handelt, wäre eine Bariumacetatbehandlung (nach Nassreinigung) verzögernden Verfahren vorzuziehen, sofern sie sich im Großversuch bewährt.

Weitere Verfahrenskombinationen sind denkbar!

1.4 Öffentlichkeitsarbeit

Zum Projektstart konnte das Vorhaben in der Zeitschrift *Bausubstanz* vorgestellt werden (*Bausubstanz*, Jg. 3, H. 3 Sept. 2012).

Auch bei der Dombaumeister-Tagung in Meißen (März 2013) stieß das Projekt auf großes Interesse.

Im Mai 2014 erschien der Artikel „Mazeration historischer Dachkonstruktionen“ in der Broschüre *Zukunft bauen* des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (S. 98-101).

Beim EIPOS-Sachverständigentag „Holzschutz“ am 2.12.2014 konnte das Projekt ausführlich präsentiert werden. Zu dieser Veranstaltung ist ein Tagungsband im Fraunhofer IRB Verlag erschienen (I.C. Hennen, U. Kalisch, H.-N. Marx, Holger Niewisch, Udo Tostmann, „Mazeration an historischen Holzkonstruktionen: Möglichkeiten zur Schadensminderung“, in: Tagungsbd. EIPOS-Sachverständigentag „Holzschutz“ 2014, S. 35-58).

Im November 2013 fand in Naumburg ein Treffen der Projektgruppe mit dem Projektkoordinator der Stiftung Preussische Schlösser und Gärten und dem die Arbeiten an Schloss Cecilienhof begleitenden Architekturbüro statt, bei dem eine Zusammenarbeit verabredet wurde. Bereits 1999 wurden Voruntersuchungen der Dachkonstruktion des Schlosses durch Mitglieder der Projektgruppe Mazeration vorgenommen.

Zahlreiche Beratungen erfolgten auf telefonische und schriftliche Anfragen hin, auch ein Besuch in Neumarkt St. Veit, Bayern (Staatshochbauamt Rosenheim).

Im Januar 2015 nahm der Dombaumeister aus Riga Kontakt zur Projektgruppe auf; ihm wurde angeboten, Holzproben kostenlos zu analysieren. Das Gebäck des Rigaer Domes soll

Mazerationserscheinungen aufweisen. Möglicherweise wurden die Hölzer zwischen 1941 und 1944 von den deutschen Besatzern mit Feuerschutzmitteln behandelt.

1.5 Fazit

Im Projekt MATEKUR wurden die Ursachenzusammenhänge der Mazeration weiter erkundet, in den letzten Jahrzehnten gegen Mazerationsschäden behandelte Objekte nachuntersucht, die in der Praxis verwandten Sanierungsverfahren bewertet und neue Sanierungsansätze entwickelt. Aus der vergleichenden Beobachtung von mit verschiedenen Verfahren behandelten Probeflächen im Naumburger Dom wurden Empfehlungen für die Praxis abgeleitet.

Das Zusammenwirken der im Einzelfall ins Holz eingetragenen Flammschutzsalze mit dem Umgebungsklima und die langen Reaktionszeiträume bis zum Ausbruch der Mazeration wurden näher untersucht, so dass zumindest Anhaltspunkte für eine Abschätzung des weiteren Schadensverlaufs gewonnen werden konnten: Es kommt früher zu Mazerationserscheinungen, wenn Sulfat und evtl. Natrium eingetragen wurden, später (oder gar nicht), wenn Phosphat-Verbindungen verwendet wurden.

Bei gleich hoher Salzbelastung treten Schäden früher auf, wenn häufig hohe Luftfeuchtwerte erreicht werden oder/und über längere Zeit eine hohe Luftfeuchtigkeit im Dachraum herrscht. Wenn das Klima im Dachraum eher trocken ist, kommt es später oder nicht zur Mazeration, je nachdem, welche Salze im Spiel sind.

In den letzten 20 Jahren (seit ca. 1995) wurden mazerierte Dachkonstruktionen häufig im Sinne von Großversuchen mit Präparaten auf Basis von Polyakrylaten behandelt, um die Holzfasern an der Oberfläche zu verkleben und den Feuchteausaustausch der Salze im Holz mit der Umgebungsluft zu dämpfen. Diesem Konservierungsverfahren wie auch den im Folgenden beschriebenen kurativen Verfahren ging stets eine Reinigung der Hölzer voran.

Strahlverfahren haben z.T. zu einem zu großen Abtrag der Oberflächen geführt, historische Arbeitsspuren sind verloren gegangen. Nassreinigungsverfahren sollten nur angewandt werden, wenn weitere Maßnahmen zur Bekämpfung der Mazeration geplant sind, andernfalls steht zu befürchten, dass durch diese Behandlung die im Holz verbleibenden Salze mobilisiert werden.

Akute Fälle, die nur gereinigt wurden, zeigen nach ca. zehn Jahren neue Mazerationserscheinungen: eine Reinigung reicht in diesen Fällen nicht aus, um das Problem zu beheben; die Luftfeuchte der Umgebung aktiviert mittelfristig die im Holz verbliebenen Salze.

Dennoch ist eine trockene Reinigung im Sinne einer Entstaubung bei leichten Mazerationserscheinungen notwendig, wenn die Hölzer außerdem mit Holzschutzmitteln behandelt wurden, sich also toxische Stäube bilden können, und wenn weitere Arbeiten am Dach anstehen.

Neue Verfahrensansätze ergaben sich mit der Überführung der Salze in inerte Verbindungen, wobei v. a. die Applikation einer wässrigen Bariumacetatösung zu guten Testergebnissen führte. Ein Großversuch im Rahmen eines Folgeprojektes wird angestrebt.

Die Entsalzung der Hölzer mittels Kompressen erbrachte ebenfalls überraschend gute Erfolge und sollte ebenso in einem Großversuch weiter erprobt werden.

Der Sanierungsleitfaden im Anhang gibt eine einfache Einführung in die Problematik und zeigt den ein-zuhaltenden Weg von der Grundlagenermittlung zur Maßnahme auf.

Dank

Die Mitglieder der Projektgruppe MATEKUR danken an dieser Stelle den Eigentümern und Bauverwaltungen, die die Untersuchung ihrer Objekte gestattet und durch vielfältige Auskünfte und Hilfestellungen praktisch unterstützt haben.

Unser Dank für viele Anregungen und sehr konstruktive Diskussionen gebührt dem wissenschaftlichen Beirat, dem Dr. Ute Schoknecht (BAM), Dr. Thomas Nitz (LDA Thüringen) und Erich Jelen (Fraunhofer UMSICHT) angehörten.

Das Forschungsprojekt konnte nur realisiert werden, weil es durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), die Evangelische Kirche in Mitteldeutschland (EKM) und die Vereinigten Domstifter zu Naumburg, Merseburg und des Kollegiatstifts Zeitz finanziert wurde. Dafür dankt die Projektgruppe sehr herzlich! Die fachliche Begleitung durch Herrn Dr. Paul Bellendorf (DBU) und Herrn Asmus Schriewer (BBR) haben wir als große Unterstützung empfunden.

2. Literatur

Dirk Strohmann stellte 2014 in der *Denkmalpflege in Westfalen-Lippe* den Fall der Wiesenkirche in Soest ausführlicher vor, deren Eichengebälk leichte Auffaserungen zeigt.²⁶ Mit Herrn Strohmann stehen die Projektpartner seit 2008/09 in gutem Kontakt. Ergebnisse des Vorgängerprojektes MATE führten in Soest zur Entscheidung, die Mazerationserscheinungen zunächst zu beobachten und die Auswertung der Klimamessungen abzuwarten. Akuter Handlungsbedarf besteht wegen des bisher geringen Ausmaßes der Mazeration und des weitgehenden Ausschlusses von toxischen Holzschutzmittelbestandteilen im Zuge der Beprobung derzeit nicht. Die Schadensentwicklung wird beobachtet.

Außerhalb des Forschungsprojekts MATEKUR wurden während seiner Laufzeit vier Aufsätze mit den Stichworten „Mazeration“ und „Holzkorrosion“ veröffentlicht.

Während ein 2013 erschienener Aufsatz²⁷ sich mit Untersuchungen an historischem Brettschichtholz einer fast 100 Jahre alten Salzlagerhalle in Hetzer-Bauweise befasst, hat sich Wolfgang Rug, einer der Verfasser, schon 2011 umfassend zu Holzfestigkeit und aggressiven Medien geäußert.²⁸ Dankenswerterweise listen die Autoren wesentliche zur Holzkorrosion erschienene Publikationen noch einmal in einer Tabelle auf und weisen auf die umfangreichen Forschungsarbeiten hin.²⁹

Dies bietet den Anlass, die Bedeutung der Forschungen von Klaus Erler, Willy Mönk sowie Helga Ritter, Günther Kerner und H. Kirk vom Institut für Forstwissenschaften Eberswalde zur Holzkorrosion auch an dieser Stelle hervorzuheben.³⁰

Im Themenfeld Mazeration/ Holzkorrosion unterscheidet sich die Zielstellung ihrer Arbeiten jedoch wesentlich von den Aufgaben, die im Forschungsprojekt MATEKUR gestellt wurden, d.h. Anwendungen in der Praxis zu evaluieren und kurative Maßnahmen zu entwickeln.

Die Ergebnisse der älteren Forschung sind im Wesentlichen Erkenntnisse aus Untersuchungen von genutzten Holzbauten (Lagerhallen für chemische Stoffe und Produktionsstätten), die während ihrer Nutzung über mehrere Jahrzehnte bestimmten Medien ausgesetzt waren.³¹

Klaus Erler definiert als Aufgaben dieser Untersuchungen, die Agenzien in „Aggressivitätszustände gegenüber Holz“ einzustufen und die Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen nach langen Standzeiten in chemisch aggressiver Umgebung zu beurteilen.³²

Der Fokus liegt nicht auf der Fragestellung, wie Mazeration gestoppt oder eingedämmt werden kann. Der Erhalt der Konstruktion im Sinne einer Denkmalpflege ist nicht Gegen-

²⁶ Dirk Strohmann, Soest: Eine Flammschutzmittelbehandlung und ihre Folgen – Holzkorrosion im Dachstuhl der Wiesenkirche, in: *Denkmalpflege in Westfalen-Lippe*, Ausgabe 1, 2014, S. 15-18. – Herrn Strohmann an dieser Stelle noch einmal herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit!

²⁷ Wolfgang Rug, Gunther Linke, Untersuchungen zur Holzkorrosion an historischem Brettschichtholz, *Bautechnik* 90, 2013, Heft 10, S.642-650

²⁸ Wolfgang Rug, Angelika Lißner, Untersuchungen zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holz unter dem Einfluss chemischer aggressiver Medien, *Bautechnik* 88, 2011, Heft 3, S.177-188

²⁹ Eine umfassendere Literaturzusammenstellung gibt die 2004 erscheinende Dissertation von Andreas Schwar.

³⁰ Willi Mönk, Holzerstörungen bei freitragenden Konstruktionen von Mineraldünger-Lagerhallen, in *Holztechnologie* 16, 1975, S.22-24; Günther Kerner, Helga Ritter, Grundlagenuntersuchungen zur Beständigkeit von Nadelschnittholz gegen Mineraldünger, *Holztechnologie* 1984/5, S.233 -237

³¹ Vgl. Rug, Lißner (2011), S.180

³² Klaus Erler, Wirkungen aggressiver Lösungen auf Kiefernholz, *Holztechnologie* 1984/7, S. 252

stand des Interesses. Wenn Teile der Konstruktion nicht zu erhalten sind, sind diese zu erneuern, oder die ganze Lagerhalle wird neu gebaut. Es geht vorrangig um Wirtschaftlichkeit, und so muss beispielsweise die Idee, Holzkonstruktionen mit Kunstharzen zu stabilisieren in der ehemaligen DDR aus Kostengründen verworfen werden.

Erst Andreas Schwar, der in seiner Dissertation von 2004 auf diese Forschungen aufbauen kann, bezieht Flammschutzmittel und die korrosive Schädigung, die sie in historischen Dachkonstruktionen verursachen, in die Diskussion ein.

Eine Ausnahme bildet hier nur eine Untersuchung von H. Kirk und G. Kerner aus dem Jahre 1978 zu aktuellen Holzschutzmittelproblemen.³³

Holzschutzmittelprobleme wurden schon vor 35 Jahren (Mitte der 1970er Jahre) scheinbar nur in Objekten festgestellt, die „bisher zwei- bis dreimal mit kombinierten Holzschutzmitteln Dohnalit Pyro I oder Kulbasal 55 FP behandelt wurden.“³⁴ Es wird die Empfehlung ausgesprochen, dass „wegen der in letzter Zeit gehäuften Schadensmeldungen weitere Wiederholungen des Nachschutzes mit den kombinierten Holzschutzmitteln“ unterbleiben sollten.³⁵

Die in der ehemaligen DDR geleistete Forschungsarbeit zur Holzkorrosion baut auf grundlegenden Forschungsergebnissen auf, die 1933 von Edgar Mörath³⁶ aufgestellt und 1951 von Franz Kollmann³⁷ aufgenommen und publiziert wurden.

Ihre Forschungen zeigen eine hohe Beständigkeit des Holzes gegen schwache Säuren und gegen schwach alkalische Lösungen.

Nur durch stark saure und stark alkalische Lösungen stelle sich eine Korrosionswirkung ein. Schon im *Handbuch der Holzkonservierung* von Friedrich Mahlke³⁸ (1928) wird vor den schädlichen Einflüssen der Mineralsäuren auf die Holzsubstanz gewarnt, die sich bereits bei stark verdünnten Lösungen zeigen.

Mahlke bezieht sich auf Untersuchungen des Königlichen Materialprüfungsamtes von 1911, die Veranlassung gaben, „dass auch in wässriger Lösung sauer reagierende Salze bzw. Verbindungen, welche während der Imprägnierung oder im Laufe der Gebrauchsdauer des imprägnierten Holzes freie Säuren abspalten können, von der Holzkonservierung tunlichst ausgeschlossen werden.“³⁹

Im Forschungsprojekt MATEKUR wurden auch die sehr umfangreichen Untersuchungen zur „Prüfung von Flammschutzmitteln für den Brandschutz von Holzkonstruktionen gegenüber Fliegerbrandbomben“ in die Literaturrecherche einbezogen.⁴⁰

Das Interesse an der Erforschung der Flammschutzmittel war in Deutschland schon während der Vorbereitungen für den Luftschutz sehr groß. Bereits 1936 wurden 65 im Handel erhältliche Mittel in einer umfassenden Studie untersucht,⁴¹ aus der hervorgeht, dass es sich bei rund 31% der Mittel um wasserlösliche Salze bzw. wässrige Salzlösungen handelt(e).

Ein Hinweis auf die jahrzehntelange Kontinuität der Behandlungsmittel besteht darin, dass sich die während des Krieges benutzte Typenbezeichnung „FMI“ später in einer von E. Künzelmann aufgeführten Tabelle der in der DDR anerkannten Holzschutzmittel (Stand Oktober 1961)⁴² wiederfindet.

Als Hauptbestandteile werden hier genannt:

³³ H. Kirk und G. Kerner, Informationen der ASMW-Prüfstelle „Holzschutzmittel“ zu aktuellen Holzschutzmittelproblemen, *Holztechnologie* 1978/5, S.137-140

³⁴ Ebenda, S.138

³⁵ Ebenda

³⁶ E. Mörath, Die Widerstandsfähigkeit der wichtigsten einheimischen Holzarten gegen chemische Angriffe, *Mitteilungen Fachausschuss Holzfragen*, Heft 5, Berlin 1933, S.37-58

³⁷ Franz Kollmann, *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Berlin 1951

³⁸ Friedrich Malke, *Handbuch der Holzkonservierung*, Berlin 1928

³⁹ Ebenda, S.310

⁴⁰ Dr. J. Hausen, *Der Bautenschutz*, Berlin 1934, Heft 5

⁴¹ Metz, I., Herabsetzung der Brennbarkeit des Holzes, *Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein*, 1936, Heft 15, S.41

⁴² Erich Künzelmann, Zu Fragen der Verträglichkeit verschiedenartiger Holzschutzmittel, *Holztechnologie* 4, 1961, S.257

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	Diammonium(hydrogen)phosphat
$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	Ammoniumphosphat
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Ammoniumsulfat
NaF	Natriumfluorid

(Natriumsulfat (Na_2SO_4) erscheint in dieser Liste nicht).

Auch die Forschungsarbeiten der Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin-Dahlem und des Instituts für Holzforschung München wurden in die Recherche einbezogen.

Karl Seifert behandelt 1967 den chemischen Einfluss schwach sauren Milieus auf die Holzbaustanz.⁴³

Dietrich Fengel und Heinz-Jörg Bartels erforschen in den 1980er Jahren die Einwirkung von Säuren auf Fichtenholz⁴⁴

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Untersuchungen in ihrer jeweiligen Zielstellung und der Untersuchungsmethodik stark unterscheiden und letztlich nicht für die vertiefende Klärung der Mazerationsproblematik in historischen Dachkonstruktionen nutzbar machen lassen.

2012 werden in den *Berichten zur Denkmalpflege in Niedersachsen*⁴⁵ große Probleme mit der Mazeration an historischen Salinengebäuden in Niedersachsen z. B. am Solebehälter in Einbeck-Sülbeck dargestellt. Der Zustand des Solebehälters verschlechtert sich in den letzten Jahren durch die Trocknung, da er nicht mehr befüllt ist.

An der Lösung dieser Probleme arbeitet die Restaurierungswerkstatt des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege in Zusammenarbeit mit den Holzrestauratoren der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Hildesheim. Besonders hervorzuheben ist die Masterthesis von Anna Balzer. Bei der Mazeration an Solebehältern geht es um die schädigende Wirkung von Natriumchlorid, da die Sole hauptsächlich aus einer Lösung dieses neutralen Salzes besteht.

Besonders deutlich ist das Schadbild an bewitterten Bereichen vorzufinden. Die Restauratoren gehen davon aus, dass zur Zerstörung und Auslaugung des Holzes Faktoren wie Schlagregen, starke Sonneneinstrahlung und Luftschadstoffe beitragen

Über akute Schadensfälle an technischen Anlagen wurde in der Zeitschrift *Der Bausachverständige*⁴⁶ berichtet, die einen anderen Aspekt des Prozesses, nämlich den Angriff von Schwefelsäure auf Holzkonstruktionen behandeln. Schwefelsäure entsteht bei der Biogasproduktion in großem Umfang. An geschädigten Sparren von Fermentern wurden ausführliche Untersuchungen über die Säureverteilung im Holz und die Reduktion der Holzfestigkeit durchgeführt. Sowohl die Versuchsanordnung als auch die gewonnenen Ergebnisse sind teilweise auf den Mazerationsprozess durch Flammschutzmittel übertragbar. Hervorzuheben ist dabei, dass der Kristallisationsdruck von Salzen in der wasserdampfgesättigten Umgebung von Biogasbehältern keine Rolle spielt. Untersuchungen zur Holzfestigkeit mazerierter Dachkonstruktionen könnten vom Versuchsaufbau her für weitergehende Forschungen übernommen werden (Reduktion der Druck-, Zug- und Biegefestigkeit, E-Modul).

⁴³ Karl Seifert, Der chemische Einfluß schwach sauren Milieus auf die Holzsubstanz, Holz als Roh und Werkstoff, 1967, Heft 7

⁴⁴ Dietrich Fengel und Heinz-Jörg Bartels, Über die Einwirkung von Säuren auf Fichtenholz, in: Holzforschung 34, 1980, S.201-206

⁴⁵ Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 2012, Heft 2, S. 59-62

⁴⁶ Claudia v. Laar, Schadensfall Holzbalkendecke - Materialzerstörung in einem Biogasfermenter, in: Der Bausachverständige 6/2013, S. 12 – 18, Köln 2013 und Detlev Krause, Schäden an Holzdachtragwerken an Biogasbehältern – Ausnahme oder Regel?, in: Der Bausachverständige, 1/2014, S. 19 - 22, Köln 2014 mit ausführlichen Literaturangaben.

Anhang

Leitfaden

Der Leitfaden ist an Eigentümer und Bauverantwortliche von betroffenen Gebäuden gerichtet. Er fasst die für den praktischen Umgang mit betroffenen Konstruktionen wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens MATEKUR knapp zusammen. Weitere Informationen sind dem Abschlussbericht zu entnehmen!



Was ist Mazeration?

Als *Mazeration* oder *Holzkorrosion* wird die wollige Auffaserung der Holzoberflächen bezeichnet. Diese ist in der Regel eine Folge von Flammschutzmittelbehandlungen, die in/ ab den 1940er Jahren vorgenommen wurden. Dabei wurden lösliche Salze im Spritzverfahren oder durch Streichen auf die Hölzer aufgetragen, wodurch die Entflammbarkeit des Holzes erschwert und damit die Brandentstehung verzögert werden sollte.

Diese Salze nehmen Wasser aus der Umgebungsluft auf, was häufig zur Zersetzung der Holzoberfläche führt, entweder als Folge aus der Volumenvergrößerung der Salzkristalle oder weil sich Säure bildet (z.B. Schwefelsäure), die das Holz angreift.

Die zugrunde liegenden Reaktionen laufen sehr langsam ab bzw. viele Reaktionszyklen sind nötig, bevor der Schaden eintritt und sichtbar wird. Das Ausmaß des Schadens und der zeitliche Schadensverlauf sind also abhängig vom Klima, den eingebrachten Salzen und deren Konzentration.

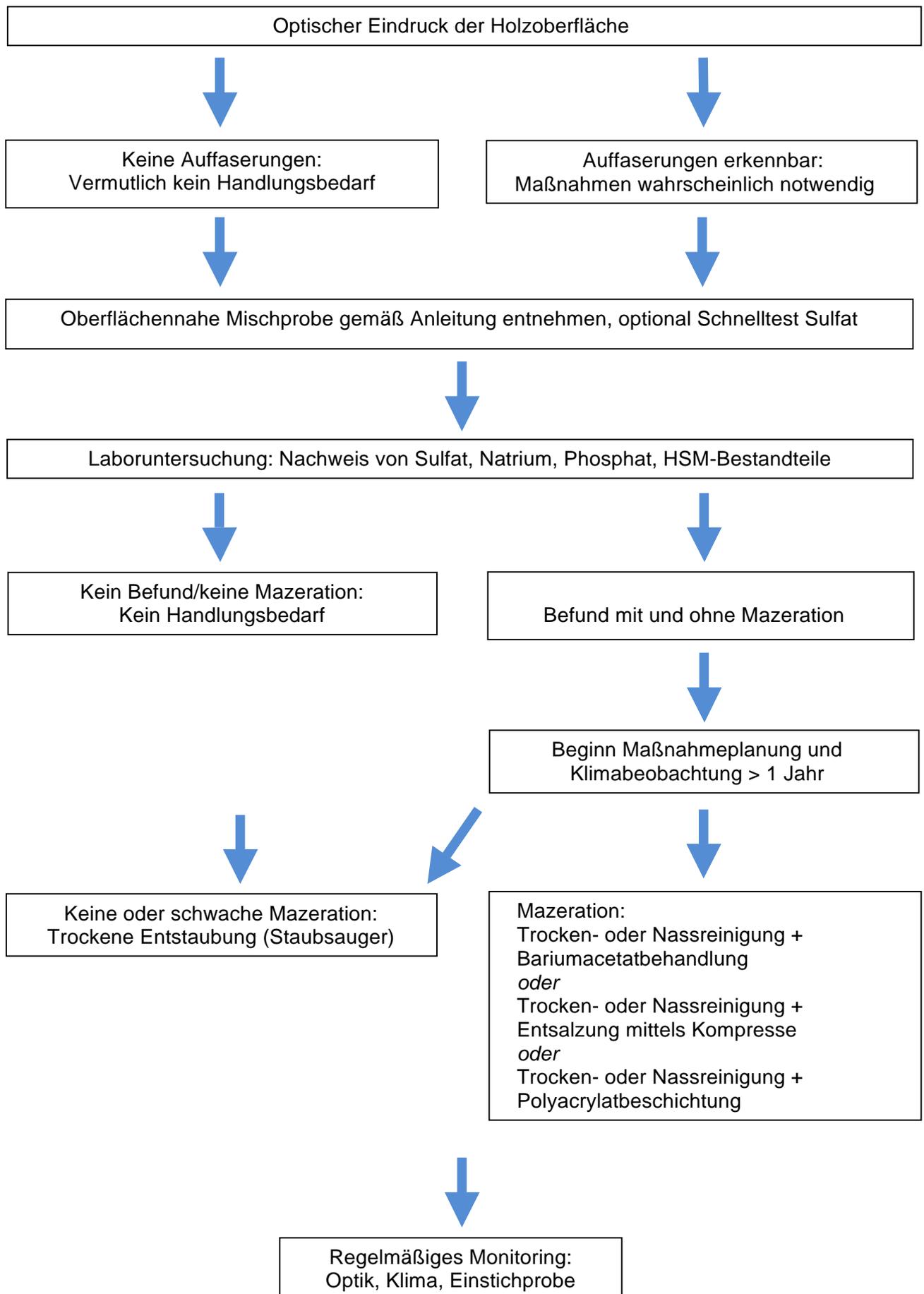
Bestimmung der Einflussfaktoren

Um den (weiteren) Schadensverlauf abschätzen zu können, müssen die Einflussfaktoren im Einzelfall bestimmt werden; allen Planungen und Eingriffen muss deshalb die qualitative und quantitative Analyse einer repräsentativen Holzmischprobe auf Flammschutzmittelbestandteile und die Klimaprotokollierung über wenigstens ein Jahr vorausgehen.

Es ist unbedingt angeraten, die Holzmischprobe auch auf Bestandteile von Holzschutzmitteln, insbesondere DDT und Isomere, Lindan und PCP, analysieren zu lassen. Durch die Mazeration bilden sich lose Fasern. Wenn das Gebälk mit Holzschutzmitteln behandelt wurde, so enthalten diese Fasern oft hohe Konzentrationen der Holzschutzmittelbestandteile, so dass sich kontaminierte Stäube bilden, die nicht im Gebäude verschleppt werden dürfen. Die sorgfältige Grundlagenermittlung hilft, unnötige oder verfrühte Eingriffe zu vermeiden.

Das Diagramm stellt den Planungsablauf von der Grundlagenermittlung bis zur Ausführung von Maßnahmen gegen die Mazeration schematisch dar. Alle Schritte sind sorgfältig zu dokumentieren!

Leitfaden: Entscheidungshilfe



Im Folgenden wird der schematische Leitfaden etwas ausführlicher erläutert, um Eigentümern oder Nutzern mazerationsbetroffener Bauwerke zu vermitteln, wie vorgegangen werden sollte und welche Personen interagieren müssen.

Diagnose

In einem ersten Schritt ist es hinreichend, einige Fotos aufzunehmen und mit Fachleuten auf dieser Grundlage zu sprechen. Hierfür können Sie sich an die Mitglieder der Projektgruppe MATEKUR (s. Adressen) oder andere erfahrene Holzgutachter wenden. Werden an Ort und Stelle/ auf den Bildern typische Anzeichen für eine Holzmazeration erkannt, sollte man den Ursachen weiter auf den Grund gehen.

Probennahme

Zu diesem Zweck müssen Holzproben nach bestimmten Regeln entnommen und in einem Fachlabor analysiert werden (s. Anleitung Holzprobennahme). Die benötigte Menge, die von der Oberfläche abgekratzt wird, ist sehr klein und gut per Post zu verschicken. Das Labor benötigt allerdings Anweisungen, auf welche Inhaltsstoffe die Holzprobe zu untersuchen ist. Vorrangig ist der Gehalt an Sulfat, Phosphat und Fluorid, denn diese Bestandteile weisen in höherer Konzentration auf Flammschutzmittel hin, die als Hauptverursacher der Mazeration gelten. Im Zuge der Untersuchung sollte man das Holz auch auf ältere Holzschutzmittel, d.h. DDT, PCP und Lindan analysieren lassen, weil dies für die nächsten Arbeitsschritte von großer Bedeutung ist.

Werden die ermittelten Werte im Laborbericht und/oder von einem anderen Fachmann als relevant eingestuft, sind die nächsten Arbeitsschritte sorgfältig zu planen.

Ab diesem Punkt muss sich der Eigentümer oder Nutzer bei jedem größeren Projekt dazu entscheiden, einen erfahrenen Fachplaner zu beauftragen, die nächsten Schritte einzuleiten. Nahezu alle mazerationsbetroffenen Großdächer sind auch reichlich mit Holzschutzmitteln behandelt worden, sei es in der ehemaligen DDR mit DDT (Hylotox) oder in der Bundesrepublik mit Lindan geschehen. Sollte sich herausstellen, dass die Analysewerte von den Ländern festgesetzte Grenzen überschreiten, tritt ein komplexes Regelwerk in Kraft; die Dachräume werden zum „kontaminierten Bereich“ und alle Baumaßnahmen, auch simple Reinigungsvorgänge, müssen Regeln des Arbeitsschutzes genügen. Auch aus diesem Grund ist ein Fachmann erforderlich.

Klimamessungen

Die Ursachen der Mazeration liegen nicht nur in bestimmten Konzentrationen von Feuerschutzsalzen im Holz, ebenso bedeutsam sind die klimatischen Verhältnisse im Dachraum. Wie verändern sich Temperaturen und Luftfeuchte im Jahresablauf? Wie ist der Luftaustausch? Wie schwanken die Holzfeuchtigkeiten? Um dies festzustellen, sind Langzeitmessungen mit Klimaloggern erforderlich, um zumindest einen Jahreszyklus (12 Monate) auslesen und auswerten zu können.

Sanierungsstrategie

Ist diese Datenbasis nunmehr vorhanden, kann eine Sanierungsstrategie entwickelt werden, die genau auf das spezielle Bauwerk zugeschnitten ist. Sie wird neben den Inhaltsstoffen und den klimatischen Verhältnissen die Holzart der Dachkonstruktion, den Grad der Schädigung und auch die Art der Nutzung in die Überlegungen einbeziehen.

Zur Verfügung stehen folgende Verfahren:

- Reinigung
- Konservierung oder

- Teilentsalzung oder/und
- Salzumwandlung
- Klimatische Verbesserungen

Machbarkeitsstudie und Bauplanung

Das weitere Vorgehen ist grundlegend von der Finanzierbarkeit abhängig. Hierfür wird man mit einer Kostenermittlung beginnen, an deren Anfang eine Massenermittlung steht. Hierbei sind die abgewickelten Holzoberflächen maßgeblich. Das bedeutet, dass die Hölzer der Dachkonstruktion nach Länge, Breite und Höhe erfasst werden müssen. Besonders hilfreich sind zur Berechnung vorhandene Bauaufnahmen aus früheren Instandsetzungen, soweit diese die Maße der einzelnen Hölzer enthalten. Ansonsten ist ein Aufmaß zumindest in grober Form erforderlich. Hieraus kann neben den zu behandelnden Flächen auch der wichtige Kostenfaktor „Baustelleneinrichtung“ kalkuliert werden, der neben Transport und Zugänglichkeit auch die erforderlichen Schutzmaßnahmen berücksichtigt.

In einem Arbeitssicherheitsplan (A+S Plan) sind die Erfordernisse, die sich aus den Arbeitsbedingungen in einem kontaminierten Bereich ergeben, zusammengefasst und müssen nun mit Kosten belegt werden. Schließlich sind Leistungsverzeichnisse zu erstellen, um in einer Ausschreibung Kostenangebote zu erhalten.

Zusätzlich sollte an die Genehmigungsplanung gedacht werden. Mazerierte Dachkonstruktionen sind in der Regel in Gebäuden vorhanden, die als Einzeldenkmale eingetragen sind. Daher ist von den Denkmalschutzbehörden und –ämtern eine Genehmigung zur Durchführung der Bauarbeiten erforderlich.

Baudurchführung

Auch die Baudurchführung muss von einem erfahrenen Bauleiter betreut werden.

Zunächst gilt es, die Baustelle so einzurichten, dass eine gefahrlose Zugänglichkeit der Dachstuhlhälzer möglich ist, gleichzeitig aber der Schutz gegen Wind und Wetter erhalten bleibt.

Im Inneren müssen Schutzmaßnahmen verhindern, dass entstehende Stäube oder abtropfende Flüssigkeiten die Bausubstanz schädigen. Hinzu kommen die speziellen Schutzmaßnahmen für Arbeiten in kontaminierten Bereichen.

Dies ist vor allem bei der Reinigung der Holzoberflächen wichtig, da bei trockenen Reinigungsverfahren in hohem Umfang Stäube entstehen, die vor Ort gesammelt und in geschlossenen Behältern abtransportiert werden müssen. Dabei ist auch zu kontrollieren, ob die beauftragten Unternehmen diese Arbeiten entsprechend überwachen.

Auch der Entsorgungsweg der entfernten Fasern ist reglementiert und muss überwacht und protokolliert werden. Dasselbe gilt für mittels Waschverfahren ausgelöste Substanzen.

Bei Beschichtungsmaßnahmen stehen der Schutz des Bauwerks und der Schutz der Beschäftigten im Vordergrund. Einige Mittel erfordern hier mehr Beachtung als andere. Grundsätzlich ist eine Benetzung des Mauerwerks, z.B. der Gewölbeoberseiten, zu vermeiden (Abplanen).

Schließlich ist eine Abnahme der Bauleistungen durch den Baubetreuer erforderlich, die mit einer Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen verbunden wird.

Einbindung von Fachleuten

Die Darstellung des Ablaufs zeigt, dass der Eigentümer oder Nutzer durch die Planung und Überwachung einer Mazerationsbekämpfung stark gefordert ist. Die Begleitung eines Fachmanns (oder einer Fachfrau) wird daher erforderlich sein. Die frühzeitige Einbindung hilft Irrwege zu vermeiden und letztlich Kosten zu sparen.

Hinweise zum Arbeitsschutz

Sind bauliche Anlagen über eine gesundheitliche Grundbelastung hinaus mit Gefahrstoffen verunreinigt, werden sie auch im rechtlichen Sinne zu „kontaminierten Bereichen“.
Für den Fall, dass in einem kontaminierten Bereich gearbeitet wird, haben der Gesetzgeber und die gesetzliche Unfallversicherung (Berufsgenossenschaften) detaillierte Auflagen für Arbeitgeber und Arbeitnehmer verfügt.

Vorerkundung

Für den Eigentümer eines Gebäudes ist festgelegt, dass er seiner Vorerkundungspflicht nachkommen muss.⁴⁷ Erste Hinweise lassen sich aus der Nutzungs- oder aus der Baugeschichte eines Gebäudes ableiten (Sichtung von Unterlagen, Befragungen von Zeitzeugen). Vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus dem Projekt MATE sei unbedingt empfohlen, eine Holzmischprobe auf Flammschutz- und Holzschutzmittelrückstände untersuchen zu lassen, um bzgl. der im Holz befindlichen Substanzen Klarheit zu bekommen (s. u. Anleitung).

Informationspflicht

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen müssen dokumentiert und selbstverständlich an diejenigen weitergegeben werden, die in diesen Bereichen arbeiten.
Dafür muss der Eigentümer oder potentielle Bauherr einen Arbeits- und Sicherheitsplan (A+S -Plan) erstellen oder von einem Sachkundigen erstellen lassen.

Auch wenn keine Sanierungsarbeiten ausgeführt werden, muss der Eigentümer als Arbeitgeber bedenken, ob eigene Mitarbeiter den kontaminierten Bereich betreten und geschützt werden müssen.⁴⁸

Auch eine mögliche Gefährdung von Besuchern ist in die Überlegungen einzubeziehen.

Empfehlenswerte Verfahren zur Mazerationsbekämpfung

Im Ergebnis der Projekts MATEKUR können folgende Verfahren als u. U. geeignet empfohlen werden:

Trockenreinigung

Wenn zunächst keine weiteren Schritte geplant sind, sollte eine trockene Entstaubung (Staubsauger) des Gebäudes und auch des Fußbodens (Laufbohlen, Gewölbekappen etc.) des Dachraums erfolgen. Auf diesem Weg werden auch andere schädliche Stoffe wie z. B. Taubenkot entfernt.

Lose Holzfasern könne von mazerierten Holzoberflächen mittels Bürstenschleifern abgenommen werden. Diese Geräte werden üblicherweise zum Schleifen, Strukturieren und Säubern. Die Bürsten sind in unterschiedlichen Materialien (Nylon, Messing) und in verschiedenen Körnungen lieferbar. Die Schleiftiefe ist einstellbar und eine Fremdabsaugung möglich.

Nachteile des Verfahrens bestehen darin, dass nicht alle Flächen an den Holzteilen mit der Maschine erreicht werden können und z.B. kleinteilige Holzverbindungen, Vertiefungen, Spalten oder Risse mit Handbürsten nachgearbeitet werden müssen.

Zudem besteht die Gefahr, dass bei festen Oberflächen anhaftende Substanzen in das Holz eingearbeitet werden, was auch bei kristallinen Ausblühungen der Fall sein könnte.

Das Verfahren verursacht trotz Fremdabsaugung eine intensive Staub- und Lärmbelastung. Persönliche und organisatorische Schutzmaßnahmen (Arbeitssicherheitsplanung) müssen veranlasst werden.

Nassreinigung

Wenn weitere Schritte folgen, können die losen Fasern mit einem Waschsauger entfernt werden. Dem Waschwasser kann ein Tensid zugesetzt werden. Diese Geräte wurden entwickelt, um Rückstände von Bioziden zu entfernen. In Naumburg wurde ein Waschsauger

⁴⁷ Vgl. TRGS 524, 3.2.1 Vorerkundung. Die TRGS 524 bietet einen guten Überblick der einzuhaltenden Regeln und Verantwortlichkeiten.

⁴⁸ Vgl. TRGS 524, 2.3. Arbeiten in kontaminierten Bereichen

der Firma Kärcher erprobt, wobei dem destillierten Waschwasser ein Tensid zugesetzt wurde. Die losen Fasern verursachen immer wieder Verstopfungen der Absaugschläuche. Die Waschlösung muss fachgerecht entsorgt werden. Eine Nassreinigung sollte nur in Betracht gezogen werden, wenn weitere Behandlungsschritte folgen, da das Wasser die Salze im Holz mobilisiert, diese Form der Reinigung also u. U. die Mazeration befördert!

Beschichtung mit Präparat auf Basis von Polyakrylat oder Alkydharzen

Nach der Reinigung können mittels Pinseln nicht filmbildende Polyacrylat- oder Alkydharzzubereitungen in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger Lösung aufgestrichen werden, wobei Tropfverluste zu vermeiden sind. Diese konservierende Beschichtung, die im besten Falle weder mit einer Farbvertiefung noch mit einem Glanzeffekt einhergeht, verklebt die Oberflächen leicht und dämpft den Feuchteausaustausch der im Holz befindlichen Salze mit der Umgebung.

Umwandlung der Salze in inerte Verbindungen

Im Sinne eines Großversuches, der bislang noch aussteht, kann nach der Reinigung mittels Pinseln eine Bariumacetatzubereitung in wässriger, lösemittelfreier Form in 10%-iger bzw. etwas höher dosierter Lösung aufgestrichen werden, wobei Tropfverluste zu vermeiden sind. Besondere Arbeitsschutzmaßnahmen sind zu ergreifen!

(Teil-)Entsalzung mittels Kompressen

Nach der mechanischen Reinigung werden die Oberflächen mit einer Zelloseekompresse belegt, die mit destilliertem Wasser befeuchtet ist. Es ist möglich, dem Wasser ein Tensid zuzusetzen. Der Zellulosebrei wird per Hand an liegenden und auch hängenden Flächen etwa 10-12 mm dick aufgebracht und leicht angedrückt. Auch dieses Verfahren konnte noch nicht in einem Großversuch erprobt werden. Es handelt sich bislang um die einzige Möglichkeit, die für die Mazeration ursächlichen Salze aus dem Holz zumindest teilweise zu entfernen!

Alle Maßnahmen sind sorgfältig zu dokumentieren!

Es empfiehlt sich eine regelmäßige Sichtkontrolle und eine dauerhafte Klimaprotokollierung.

Adressen der Mitglieder der Projektgruppe MATEKUR

Betroffene können sich unverbindlich an die Projektgruppe MATEKUR wenden.

Dr. Insa Christiane Hennen
Bauforschung – Denkmalpflege
Bugenhagenstraße 5
06886 Wittenberg

T: 03491-432 991
hennen.hennen@t-online.de

Uwe Kalisch
IDK Halle
Domplatz 3
06108 Halle

T: 0345/47 22 57 -21
kalisch@idk-denkmal.de

Sachverständigenbüro
Hans-Norbert Marx
Türkenlouisstr. 5
77815 Bühl-Vimbuch

Tel.: 07223-208 46
SVB-Marx@t-online.de

Ingenieurbüro Niewisch
Holger Niewisch
Clausewitzstr.5
10629 Berlin

T:030/88 26 492
holger-niewisch@versanet.de

Udo Tostmann M.A.
Arbeits- und Sicherheitsplanung
Fregestr. 27 A
12161 Berlin

030-850 75 616
udo.tostmann@t-online.de

Standardarbeitsanleitung

Holzprobennahme

Die Holzkonstruktionen zahlreicher historischer und bedeutender Gebäude wurden zum Zweck der Werterhaltung mit Schutzmitteln gegen Schädlings- und Brandgefahr vorbeugend mit Holz- und/oder Feuerschutzmittel behandelt, teilweise erfolgten diese Maßnahmen mehrfach. Die seinerzeit verwendeten Schutzmittel sind allerdings nicht nebenwirkungsfrei und können sich unter Umständen auf die Nutzer der Gebäude und das behandelte Holz selbst (z.B. Mazeration) negativ auswirken, so daß Untersuchungsbedarf bestehen kann.

Anwendungsbereich: Entnahme von Holzproben zur Ermittlung des Gehaltes an Wirkstoffen aus Holz- und/oder Feuerschutzmitteln mit dem Ziel, mögliche gesundheits- und umweltbezogenen Risiken bewerten und ggf. erforderlichenfalls Abwehrmaßnahmen einleiten zu können.

Diese Anleitung ist für die Bewertung des Schutzzumfanges (vorbeugender und bekämpfender Holzschutz, vorbeugender Feuerschutz) **nicht** geeignet.

Erläuterung: Für die Bewertung einer Belastung durch Holzschutz-Biozide und/oder Feuerschutzkomponenten ist insbesondere der oberflächennahe Bereich der gegenständlichen Hölzer von Interesse, da die Abgabe von kritischen Stoffen an die Umgebungsluft oder über kontaminierte Stäube nur von der Oberfläche aus erfolgen kann.

Durchführung: Pro Objekt sollten 10 – 20 Einzelproben entnommen werden, die zu einer Mischprobe zu vereinigen sind. Zweckmäßigerweise sind die Proben mit einem Stechbeitel in Form von 1 bis (max!) 3 mm starken Spänen von der Holzoberfläche zu entnehmen.

Bei umfangreichen Objekten sind die Proben abschnittsweise zu entnehmen. Liegen Bauteile aus verschiedenen Bau- oder Umbauepochen vor, empfiehlt sich eine getrennte Probenahme.

Verpackung: Jede Mischprobe ist in Alufolie einzuwickeln und dauerhaft zu kennzeichnen. 2,5 bis 5,0 g Spanmaterial sind in der Regel ausreichend. Sind auch Bestandteile von Flammschutzmitteln quantitativ zu bestimmen, ist es sinnvoll, 10 – 15 g Späne bereitzustellen.

Dokumentation:	Zu jeder Mischprobe ist ein Probenahmeprotokoll anzufertigen (Formblatt) ggf. ergänzt durch Fotografien der Probenahmepunkte, soweit möglich sind die Entnahmestellen am Objekt zu markieren, Planskizzen und Aufrißzeichnungen erleichtern die Wiederauffindbarkeit der Entnahmestellen.
Anmerkungen:	<p>Die Entnahme der Holzproben erfordert Erfahrungen und Kenntnisse auf dem Gebiet des Holz- und Feuerschutzes ebenso wie aus dem Bereich des Bauwesens und der Bauhistorie.</p> <p>Die aus den Untersuchungsergebnissen herleitbaren Erkenntnisse sind von maßgeblicher Bedeutung für die</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gebäudenutzung/Gebäudesanierung • Arbeitshygiene bei Arbeiten am Objekt • Entsorgung ausgebauter/ausgewechselter Bauteile • Auswirkung auf das Inventar (z.B. Bibliotheken etc.) • Wertbestimmung des Objektes • Maßnahmen bei Störfällen (z.B. Brandereignisse) • Planung und Organisation von Dekontaminationsmaßnahmen
Parameter:	<p>Umfang A: PCP, DDT, γ-HCH, deren Isomere und relevante Verunreinigungen quantitativ</p> <p>Umfang B: Sulfat, Phosphat und Fluorid qualitativ</p> <p>Umfang C: PCP, DDT, γ-HCH analog A, zusätzlich Sulfat, Phosphat und Fluorid quantitativ</p> <p>Umfang D: Gewünschte Parameter einzeln aufführen</p>
Impressum/Copyright:	SVB Marx/ Proketgruppe MATEKUR

Probenahmeprotokoll

Auftraggeber/Objekt

Kurzbeschreibung

Probenehmer

Datum

Parameter

Umfang



Einzelparameter

Kennzeichnung

Bemerkungen/begleitende Dokumente

