Abschlussbericht zum DBU - Projekt:

Modellhafte Präventive Konservierung von umweltgeschädigten Sandsteinsäulen und -kapitellen aus der Frührenaissance in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 29998-45

Berichterstattung:
Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther
Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Ev.-Luth. St. Annenkirchgemeinde
Fraureuth / OT Ruppertsgrün
Thomas Heimpold

06/02

1 Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	29998	Referat	45	Fördersumme	60.660 €

Antragstitel	**Modellhafte Präventive Konservierung von umweltgeschädigten Sandsteinsäulen und -kapitellen aus der Frührenaissance in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün**
Stichworte	Temperierung, Naturstein, Raumklima, Schäden, Restaurierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
28 Monate	**25/02/2012**	**31/05/2014**	

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Ev.-Luth. St. Annenkirchgemeinde St.-Annen-Str. 5 08427 Fraureuth / OT Ruppertsgrün	Tel 0177 2157039 Fax Projektleitung Kirchgemeinde / IDK e.V. Bearbeiter Thomas Heimpold
Kooperationspartner	Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Schlossplatz 1, 01067 Dresden, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther Ingenieurbüro NIEHSEN-BAUMANN, Wiesenufer 7, 09123 Chemnitz Dipl.-Ing. L. Baumann VDI	

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Zur hochrangigen Innenausstattung der St. Annenkirche in Ruppertsgrün gehören acht originale Sandsteinsäulen aus Zwickauer Kohlesandstein. Diese Natursteinarbeiten stehen einerseits für eine erste Verwendung von Renaissance-Elementen im Bereich der ländlichen Architektur in Sachsen, andererseits zeigen sie gravierende Schäden und einen rasanten Schadensfortschritt aufgrund einer anthropogenen Schadbelastung und problematischen raumklimatischen Umweltbedingungen. Durch erste Voruntersuchungen konnte belegt werden, dass die zu DDR-Zeiten installierten Außenwandgasheizkörper stark negative Auswirkungen auf die mittlerweile durch die Verbrennungsrückstände schadsalzbelasteten und empfindlichen Natursteinoberflächen der Sandsteinsäulen und deren Kapitelle haben. Durch eine konservierungswissenschaftlich begleitete, restauratorische Überarbeitung der Kohlesandsteinoberflächen können diese stabilisiert werden. Das modellhafte Vorgehen soll auch übertragbare Konservierungslösungen für andere Objekte aus dem schwierigen Denkmalgestein hervorbringen. Zusammen mit der Neuinstallation und Neuanordnung der Wärmeabgabeflächen im Kirchenraum kann ein ausgeglichener raumklimatischer Zustand im Jahresverlauf gehalten werden, der ein weiteres zyklisches Zerstören der originalen Oberflächen unterbindet.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zielstellung des Projektes präventiver Konservierung ist die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Verhinderung einer weiteren anthropogenen Schädigung der Sandsteinoberflächen der Säulen und Kapitelle durch eine nachhaltige Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes im Kirchenraum. Auch die Senkung der Betriebskosten der St. Annenkirche in Ruppertsgrün stellt auch wichtiges Kriterium dar. Ausgehend von dieser grundlegenden Zielstellung ergeben sich folgende Teilziele:

1. Entwicklung einer modellhaften Restaurierung und eines präventiven Konservierungskonzeptes für den Kircheninnenraum mit den belasteten hochwertigen Säulen aus Zwickauer Kohlesandstein,
2. Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes,
3. Vermeidung eines Anstieges der Kosten für die Beheizung der Kirche,
4. Entwicklung eines kleinteiligen Lüftungssystems zur kontrollierten Abführung überschüssiger Raumluftfeuchte
5. Vermeidung von Diskomforterscheinungen in der Kirche.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen der beispielhaften Konservierung einer Kohlesandstein-Mustersäule wurden Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden durchgeführt und Empfehlungen zum restauratorischen Vorgehen erarbeitet sowie restauratorische Maßnahmen analytisch begleitet. Im Vorfeld von Konsolidierungsversuchen mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis an Musterflächen an salzreduzierten und salzbelasteten Kohlesandsteinoberflächen wurden Salzminderungsmaßnahmen durchgeführt und bewertet. Es kann festgestellt werden, dass die Kristallisation der Salze im Porenraum des Kohlesandsteins einen deutlichen Einfluss auf das Eindringverhalten des Festigers und damit auf die Festigerwahl haben.
Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel hergestellt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an den Kohlesandstein der Mustersäule angepasst und die Materialkennwerte untersucht.
Die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen konnten in beiden Stufen ihres Einsatzes, als Vor- und als Nachuntersuchung, wichtige Anhaltspunkte für die notwendigen Restaurierungs- und Sanierungsarbeiten an der Mustersäule und im Kirchenschiff liefern. Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer unzureichenden Erwärmung der Raumluft durch die einzeln im Raum verteilten-Gasheizkörper und den Schadensprozessen an den kunsthistorisch wertvollen Säulen und Kapitellen aus Zwickauer Kohlesandstein abgeleitet werden.
Die aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen erarbeiteten Empfehlungen zur Neuanordnung der Raumheizung im Kirchenschiff, der Planung einer auf den Raum abgestimmten sensorgesteuerten Raumlüftung und die allgemeinen Angaben zur raumklimatischen Stabilisierung konnten mit Hilfe des von der DBU geförderten Projektes erfolgreich baulich umgesetzt werden. Durch die raumklimatischen Nachuntersuchungen konnten diese umgesetzten gebäudetechnischen Installationen in der St. Annenkirche als erfolgreich bewertet werden. Mit Hilfe dieser Maßnahmen zur Raumklimastabilisierung ist ein ganz wesentlicher Aspekt für eine langfristige präventive Konservierung der Säulen und Kapitelle geleistet worden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Öffentlichkeit wurde mittels regelmäßiger Pressemitteilungen, die diverse Medien aufgriffen, vom Vorhaben, seiner Finanzierung (Zuwendungsgeber), von den Arbeiten an sich und ihrer Fertigstellung informiert. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden zum Abschluss der Projektlaufzeit in einer Fachpublikation zum Thema „Konservierung von Zwickauer Kohlesandstein – raumklimatisches, konservatorisches und restauratorischen Vorgehen“ veröffentlicht. Diese Fachpublikation konnte auf einer Fachtagung zum obigen Thema der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt werden. Auf dieser Tagung konnten neben dem Projekt in Ruppertsgrün bereits erste Ergebnisse vorgestellt werden, die aufgrund der Untersuchungen in der St. Annenkirche auch an anderen Objekten mit dem Baumaterial Zwickauer Kohlesandstein zur Anwendung kamen.

Fazit

Die Rettung der wertvollen Natursteinsäulen und Kapitelle in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün ist festzustellen. Die fachgerechte und denkmalpflegerische Restaurierung der Mustersäule hat stattgefunden und die Ergebnisse werden bereits bei der Sanierung der restlichen Säulen und weiterer Denkmalobjekte in der Region angewendet. Die Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes konnte durch erste raumklimatische Untersuchungen bisher bestätigt werden. Ein langfristiges Monitoring des Raumklimas und der restauratorischen Maßnahmen an den Säulen werden weitere Erkenntnisse erbringen. Es ist davon auszugehen, dass eine Sicherung der empfindlichen Natursteinoberflächen und eine verbesserte Nutzung des Kirchenraumes für viele Jahrzehnte gesichert sind, wenn es gelingt, bestimmte Raumklimaparameter einzuhalten.

Inhaltverzeichnis

1 Projektkennblatt 2
1. Kurzfassung des Gesamtvorhabens 5
2. Antragsteller 5
3. Kooperationspartner 6
4. Einordnung des Gebäudes in den kunsthistorischen Zusammenhang 7
5. Zielsetzung des Vorhabens und Maßnahmen 7
5.1 raumklimatische Untersuchung 9
5.2 Untersuchungen zur Konservierung von Kohlesandstein und Entwicklung von Steinergänzungsmaterialien an der Kohlesandstein-Mustersäule 9
5.3 Fachplanung zur Optimierung des Raumklimas 10
5.4 Restauratorische Bearbeitung der Mustersäule 10
6. Umweltrelevanz des Vorhabens 10
7. Innovativer Charakter der Maßnahmen 11
8. Berichte und Dokumentationen der Projektbeteiligten 12

1. Kurzfassung des Gesamtvorhabens

Der Innenraum der St. Annenkirche in Ruppertsgrün musste restauratorisch und baukonstruktiv instand gesetzt werden. Zur hochrangigen Ausstattung gehören auch sieben originale romanische Sandsteinsäulen und deren Kapitelle gefertigt aus sogenanntem “Zwickauer Kohlesandstein“. Diese Natursteinarbeiten stehen für eine erste Verwendung von Renaissance – Elementen im Bereich der ländlichen Architektur in Sachsen.

Durch eine erfolgte raumklimatische Voruntersuchung konnte belegt werden, dass die zu DDR Zeiten installierten Außenwandgasheizkörper, negative Auswirkungen auf die empfindlichen Natursteinoberflächen der Sandsteinsäulen und deren Kapitelle haben. Durch eine Neuinstallation und Neuanordnung der Wärmeabgabeflächen im Kirchenraum, sollte ein ausgeglichener raumklimatischer Zustand im Jahresverlauf erreicht werden. Die Einmaligkeit dieses Gebäudes zwischen den Bauepochen der Gotik und der Renaissance, erforderte dabei eine besonders anspruchsvolle Herangehensweise. Die Übertragung einer energetischen Standardlösung für eine Kirchentemperierung, die es ohnehin nicht gibt, war aus vielerlei Gründen ausgeschlossen. Stattdessen wurde das sehr rege genutzte Denkmalgebäude im Hinblick auf Funktion und Ansprüche untersucht und es wurden angepasste verantwortbare Lösungen für alle Teilbereiche erarbeitet. Die modellhafte Herangehensweise ist gut auf andere vergleichbare historische Gebäude übertragbar, in denen der „Zwickauer Kohlesandstein“ verbaut worden ist. Es erfolgte eine ausgewogene wissenschaftlich begleitete Nachkontrolle der erreichten Ergebnisse.

2. Antragsteller

Ev.-Luth. St. Annenkirchgemeinde
St.-Annen-Str. 5
08427 Fraureuth / OT Ruppertsgrün
info@kirche-ruppertsgruen.de

Landkreis Zwickau
Bundesland Sachsen

3. Kooperationspartner

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen
und Sachsen-Anhalt e.V.
Schlossplatz 1
01067 Dresden
www.idk-info.de
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther
Tel.: 0351 / 48430427

Ingenieurbüro NIEHSEN-BAUMANN
Wiesenufer 7
09123 Chemnitz
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. L. Baumann VDI
Tel.: 037209 / 80401

Atelier für Steinkonservierung
Andreas Muth, Restaurator VDR
Trillerstraße 04
08066 Zwickau
Tel: 0375 / 46 00 788

4. Einordnung des Gebäudes in den kunsthistorischen Zusammenhang

Die evangelisch- lutherische St. Annen- Kirche von Ruppertsgrün befindet sich südlich der Stadt Werdau. An Stelle des jetzigen Kirchenbaus erhob sich früher eine „capella in curia Ruppertsgrün“ des Sigismund von Schönfels, für welche Bischof Johannes III. (von Schönberg) von Naumburg im Jahre 1505 einen heute im Pfarrarchiv zu Beiersdorf befindlichen Freiheitsbrief ausstellte. Die zu Lob und Ehr der heiligen Frauen St. Anna erbaute Kirche stammt aus dem Jahr 1513 und geht auf die Initiative des Heinrich von Schönfels zurück.

Bei dem in Rede stehenden Objekt handelt es sich um eine einschiffige Saalkirche mit 3/8 Schluss. Ihre besondere Bedeutung begründet sich dadurch, dass sie 1513 begonnen wurde und den Typus der erzgebirgischen Hallenkirche mit eingezogenen Strebepfeilern und umlaufenden Emporen in den Raum einer kleinen Dorfkirche überträgt. Die Architektur mit Sterngewölben und Maßwerken ist völlig einheitlich aus der Erbauungszeit erhalten. Sie stellt deshalb für die gesamte regionale und überregionale Architektur –und Kunstgeschichte ein wichtiges Beispiel dar. Anlage und Ausführung des Baues sowie die Kanzel lassen die Kirche zugleich als eines der frühesten ländlichen Werke der Frührenaissance erkennen und verkörpert damit einen Wesenszug, der bei den großen Hallenkirchen sonst nicht vorkommt.

Diese Kirche steht als wertvolles Beispiel am Beginn der Ausprägung protestantischer Predigerkirchen, wie sie in den großen erzgebirgischen Kirchen wie St. Annen in Annaberg, St. Wolfgang in Schneeberg und St. Johannis in Plauen zum Ausdruck kommt.

5. Zielsetzung des Vorhabens und Maßnahmen

Hauptziel dieses Projektes war es, durch eine optimale Anordnung der Wärmeabgabeflächen und einer intelligenten Steuerung, eine weitere Schädigung der empfindlichen Natursteinoberflächen im Innenraum zu unterbinden. Durch die Neuanordnung der Wärmeabgabeflächen und durch effiziente Heiztechniken soll der Energieverbrauch der Kirchgemeinde reduziert werden, ohne die Nutzungsdauer stark zu beeinträchtigen. Gleichzeitig soll in diesem Projekt auch eine bautechnisch notwendige und denkmalpflegerisch korrekte restauratorische Sicherung der geschädigten Natursteinoberflächen modellhaft entwickelt und erprobt werden.

Vorstellbar war es, das Gebäude mit Temperieranlagen auszustatten, welche die Wärme überwiegend als Strahlungswärme abgeben. Geeignet hierfür waren der Fußboden des Kirchenschiffs und der Emporen und die Wandsockelbereiche Wände und Sockel der Säulen. Bei einer gleichmäßigen Wärmeabgabe kann die Raumtemperatur abgesenkt werden, sodass sich dies gut auf die Regulierung der relativen Luftfeuchte auswirkt. Bei der Umsetzung der Lösung wa-

ren höchste Ansprüche an den Denkmalschutz zu stellen. Das bedeutete, dass eine Temperieranlage nur dann umsetzbar war, wenn das Denkmal hierdurch nicht beeinträchtigt wurde.

Hinsichtlich der Wärmeerzeugung wurde eine Lösung gesucht, die hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Effizienz beispielgebend ist. Die in Frage kommenden Lösungsansätze mussten sich dabei einem Vollkostenvergleich nach VDI 2067 stellen.

Neben der Wirtschaftlichkeit waren die umweltrelevanten Aspekte zu berücksichtigen. Hierzu sollte im Zuge der Wirtschaftlichkeitsberechnung auch die Berechnung der CO2-Emissionen erfolgen.

Teilziele: Ausgehend von dieser grundlegenden Zielstellung ergaben sich für das vorliegende Vorhaben insgesamt folgende Teilziele:

1. Entwicklung modellhaftes Restaurierungskonzeptes für den belasteten Zwickauer Kohlesandstein,
2. Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes,
3. Vermeidung eines Anstieges der Kosten für die Beheizung der Kirche,
1. Entwicklung eines kleinteiligen Lüftungssystems zur kontrollierten Abführung überschüssiger Raumluftfeuchte,
4. Vermeidung von Diskomforterscheinungen in der Kirche.

Folgende Bereiche der Kirche waren heizungstechnisch zu berücksichtigen:

- Mittelschiff
- unter Emporen
- auf Emporen

Es wurde eingeschätzt, dass die mittlere Raumtemperatur auf maximal 15 °C bei extrem kalter Witterung begrenzt werden sollte. Dieser Wert wird auch den konzeptionellen Überlegungen zugrunde gelegt. Die Grundtemperatur richtet sich nach der Raumtemperatur, die hier nach bautechnischen Gesichtspunkten festzulegen war. Sie wird deshalb zunächst mit 8...12 °C angesetzt.

Zur Erreichung dieser Ziele sind folgende Maßnahmen durchgeführt wurden:

5.1 raumklimatische Untersuchung

Durch eine gezielte raumklimatische Voruntersuchung, die neben dem allgemeinen Raumklima in der Kirche, aber vor allem das Nahfeldklima an den Natursteinoberflächen erfasste, konnte zwischen dem vorherrschenden Raumklima, dem installierten Heizsystem und den sichtbaren Schäden an den Natursteinoberflächen ein eindeutiger Zusammenhang nachgewiesen werden. Auf der Basis dieser Voruntersuchung konnten Empfehlungen für ein zukünftiges kontrolliertes Heizungs- und Lüftungssystem erarbeitet werden, dass eine größtmögliche Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes gewährleisten. Nach der erfolgreichen Installation dieser Systeme konnte die Nachuntersuchung den Erfolg dieser Maßnahmen belegen. Eine deutliche Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes, vor allem an den konservatorisch problematischen Natursteinoberflächen, konnte somit erreicht werden.

raumklimatische Untersuchung: IDK e.V., Dresden

Bericht siehe Anhang Seiten 13 bis 27

5.2 Untersuchungen zur Konservierung von Kohlesandstein und Entwicklung von Steinergänzungsmaterialien an der Kohlesandstein-Mustersäule

Zur hochrangigen Innenausstattung der St. Annenkirche in Ruppertsgrün zählen 7 Säulen aus Zwickauer Kohlesandstein. Die Säulen zeigten vor der Restaurierung erhebliche Schäden durch Abschalen und Absanden oberflächennaher Bereiche. Im Rahmen der beispielhaften Konservierung einer Kohlesandstein-Mustersäule wurden die Schäden kartiert, Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden durchgeführt und Empfehlungen zum restauratorischen Vorgehen erarbeitet sowie restauratorische Maßnahmen analytisch begleitet. Im Rahmen des Projektes wurden Konsolidierungs-versuche mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis an Musterflächen salzreduzierter und salzbelasteter Kohlesandsteinoberflächen durchgeführt und bewertet. Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel entwickelt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an die Kohlesandsteinvarietät der Mustersäule angepasst und Materialkennwerte untersucht.

naturwissenschaftliche Untersuchungen: IDK e.V., Dresden

Bericht siehe Anhang Seiten 28 bis 52

5.3 Fachplanung zur Optimierung des Raumklimas

Dem Raumklima wurde besondere Bedeutung beigemessen. So wurden bereits vor einigen Jahren raumklimatische Messungen begonnen, die vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt durchgeführt wurden. Hauptziel war es, Erkenntnisse über das zukünftige Raumklima zu erlangen, damit es der Ausstattung und der Bauhülle gerecht wird. Hierzu wurde ein ausgeklügeltes Temperier- und Lüftungskonzept entwickelt. Während die Temperieranlage der Erwärmung des Kirchenraumes dient, wirkt eine umlaufende Sockeltemperierung der Feuchtegefahr in der Sockelzone entgegen. Die Temperieranlage ist mit einem Lüftungskonzept gekoppelt. Dieses ermöglicht die Nutzung eines guten Außenklima zur Verbesserung des Innenklimas.

Fachplanung Raumheizung, Raumlüftung: Ing.-Büro NIEHSEN – BAUMANN, Chemnitz

Bericht siehe Anhang Seiten 53 bis 67

5.4 Restauratorische Bearbeitung der Mustersäule

Im Rahmen des Pilotprojektes wurde eine Mustersäule nach den Ergebnissen einer umfangreichen Voruntersuchung am zu restaurierenden Objekt, sowie an Vergleichsmaterial und an Mörtelproben restauriert. Die ausgeführten Maßnahmen umfassten zunächst die Freilegung von einer späteren Farbfassung, die Abnahme einer abdichtenden Zementmörtelschlämme und eine Entsalzung über Zellulosekompressen. Nach der Konservierung wurden Fehlstellen mit zwei im Vorfeld beprobten Mörtelsystemen geschlossen. Sehr große Fehlstellen wurden durch den Einbau von Vierungen beseitigt. Nach dem Schließen der Fugen erfolgte eine Retusche, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht entschieden ist, ob die Säulen in der Zukunft wieder gefasst oder steinsichtig präsentiert werden. Nach dem Abschluss der Restaurierungsmaßnahmen an der Mustersäule erscheint diese in einem geschlossenen Gesamterscheinungsbild, das dennoch die Spuren der gealterten Oberflächen aufzeigt.

Ausführung: Andreas Muth, Restaurator VdR

Bericht siehe Anhang Seiten 68 bis 75

6. Umweltrelevanz des Vorhabens

Grundlegende Zielstellung des vorliegenden Projektes ist die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes Verhinderung einer weiteren Schädigung der Sandsteinoberflächen der Säulen und Kapitelle durch nachhaltige Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes im

Kirchenraum. Daneben stellt auch die Senkung der Betriebskosten der St. Annenkirche in Ruppertsgrün, durch eine abgestimmte Raumtemperierung, ein wichtiges Kriterium dar.

7. Innovativer Charakter der Maßnahmen

Im Zwickauer Land in Sachsen gibt es eine Vielzahl von Gebäude, in denen im Innenbereich der Zwickauer Kohlesandstein für sichtbare Architekturelemente verbaut worden ist. Durch unangepasste Raumtemperierungen bzw. Raumheizungen wird dieser empfindliche Natur stein starke beansprucht und unwiederbringlich geschädigt. Die differenzierte Herangehensweise in Ruppertsgrün soll ermöglichen, dass die raumklimatische und heizungstechnische Situation in der Kirche verbessert wird. Die Ergebnisse werden herausgearbeitet, dokumentiert und sollen eine Vorbildfunktion für die Region übernehmen.

8. Berichte und Dokumentationen der Projektbeteiligten

Seite 13	Bericht Raumklima	IDK e.V., Dresden
Seite 28	Bericht naturwissenschaftliche Begleitung	IDK e.V., Dresden
Seite 53	Heizung und Lüftung	Ing.-Büro NIEHSEN – BAUMANN, Chemnitz
Seite 68	Restaurierung Mustersäule	Andreas Muth, Restaurator VdR

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

Bericht DD 58/2014

Ruppertsgrün, St. Annenkirche

Raumklimauntersuchung – Abschlussbericht

Beauftragt durch: Ev.-Luth. St. Annenkirchgemeinde
St.-Annen-Str. 5
08427 Fraureuth / OT Ruppertsgrün

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

Anzahl der Seiten: 15

Thomas Löther

Dresden, 17.07.2014

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:
Schloßplatz 1
01067 Dresden
Tel.: 0351 48430 408/09/10/27
Fax.: 0351 48430 468

Sachsen-Anhalt:
Domplatz 3
06108 Halle
Tel.: 0345 472257 21/22/23
Fax.: 0345 472257 29

Internet: www.idk-info.de
e-mail: info@idk-info.de

Vorstand:
Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:
Ostsächsische Sparkasse Dresden
IBAN.: DE52850503003120115524
BIC: OSDDDE81XXX
Kto-Nr.: 3120 115 524 BLZ: 850 503 00
St-Nr.: 203/140/15097
Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1 Einleitung 2
2 Voruntersuchungen 2010 - 2011 3
3 Empfehlungen 6
4 Nachuntersuchungen 2012 - 2014 8
5 Fazit 13
6 Literaturverzeichnis 15

1 Einleitung

In und an vielen denkmalgeschützten Gebäuden finden immer wieder kleinere oder größere Restaurierungsarbeiten statt, die vor allem eine konservatorisch langfristige Sicherstellung der Raumschale und deren Ausstattung beabsichtigen. Oft besteht jedoch leider nicht die Möglichkeit einer tiefgehenden Analyse von sichtbaren aber nicht eindeutig einer Ursache zu zuordnenden Schäden statt, die sich an der Raumschale, an Natursteinoberflächen oder an Oberflächen der Ausstattung finden lassen. Bevorzugt wird auf Erfahrungen aus anderen Restaurierungsfällen zurückgegriffen. Dies scheint auch in den meisten Fällen zumindest zeitweise zu funktionieren. Parallel zu den restauratorischen und baulichen Maßnahmen besteht oft auch der Wunsch des Bauherren, für die Nutzer und Besucher während Veranstaltungen bestimmte Behaglichkeitskriterien zu erfüllen, unter Berücksichtigung steigender Energiekosten und geringer werdenden Nutzungszeiträume.

Für die St. Annenkirche in Ruppertsgrün ergab sich die seltene Möglichkeit, ein historisches Gebäude zunächst durch naturwissenschaftliche Untersuchungen besser zu charakterisieren und dies nicht nur parallel zu einer schon geplanten Sanierung, sondern bereits ein wenige Jahre vorausgehend. Dank der interessierten Kirchgemeinde, des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen und der kirchlichen Baupfleger der evangelischen Landeskirche Sachsen war es möglich, ein überschaubares Untersuchungskonzept zu raumklimatischen und materialspezifischen Fragestellungen zu erstellen.

Ziel dieser Voruntersuchung war es, durch eine angepasste raumklimatische Untersuchung einen möglichen Zusammenhang zwischen den sichtbaren Schädigungen an den Natursteinoberflächen und der bestehenden Raumklimabeeinflussung durch die bestehende Raumheizung, Besucher, baukonstruktiven Bedingungen und dem Außenklima herzustellen. Aus den Ergebnissen dieser Voruntersuchungen und durch die konstruktive Zusammenarbeit aller beteiligten Fachplaner, Behörden, Bauklimatiker, Naturwissenschaftler und der Kirchgemeinde konnte ein auf das Kirchenbauwerk, den Anforderungen an die präventive Konservierung und eine gewisse thermische Behaglichkeit abgestimmtes Konzept zur Klimastabilisierung erarbeitet werden, aus dem heraus ein Projektkonzept zusammen mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) entwickelt und erfolgreich umgesetzt werden konnte.

Die durchgeführten Nachuntersuchungen, die wieder in einem kleinteiligen Messkonzept erstellt wurden, zeigen positive Ergebnisse. Es konnte eine eindeutige Stabilisierung der raumklimatischen Zustände im Kirchenschiff, aber vor allem an den Oberflächen der Säulen und Kapitelle messtechnisch erfasst werden. Die Wirkung einer sensorgesteuerten Raumlüftung wurde durch Rauchversuche visualisiert. Trotz der noch vorhandenen Verbesserungsmöglichkeiten stellt die derzeitige Form der kontrollierten Raumdurchlüftung einen großen Fortschritt zur präventiven Konservierung des Kirchenraumes, der Ausstattungen und der empfindlichen Natursteinsäulen und -kapitelle aus Zwickauer Kohlesandstein dar.

2 Voruntersuchungen 2010 - 2011

Im Rahmen der raumklimatischen Voruntersuchungen im Zeitraum Februar 2010 bis August 2011 erfolgten an drei unterschiedlichen Messpunkten im Kirchenschiff und einem Außenklimamesspunkt Klimamessungen. Zum einen wurde das allgemeine Raumklima der Kirche auf der Empore und im Kirchenschiff erfasst und zum anderen erfolgte eine Nahfeldklimamessung an zwei Oberflächenbereichen einer westlich nahe des Eingangs stehenden „Mustersäule“. Der Messaufbau ging auf eine erste Analyse zurück, die bereits im Januar 2010 mit Hilfe einer Thermografiekamera erfolgte. Erste Besichtigungen des Innenraumes der St. Annenkirche ergaben, dass die Oberflächen der Säulen und Kapitelle unterhalb der Emporen starke Schädigungen aufwiesen. Die stärksten Materialverluste konnten an den Oberflächen der Säulen in der Nähe der an den Außenwänden befindlichen Gasheizkörper beobachtet werden. Die Thermografieaufnahmen belegten, dass bei Heizbetrieb durch diese Gasheizkörper eine signifikante Wärmestrahlung auf die dem Heizkörper zugewandte Natursteinoberfläche einwirkte. In Abb. 1 wird dieser Einfluss der im Kirchenraum verteilten Gasheizkörper sichtbar. Erkennbar werden in dieser Aufnahme die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen, die am Gasheizkörper bei immerhin ca. 100°C lagen. An der dem Heizkörper zugewandten Säulenoberfläche konnten Oberflächentemperaturen von ca. 23°C und an der abgewandten Seite hingegen nur von 12°C bis 13°C gemessen werden, entsprechend der Raumlufttemperatur am Untersuchungstag.

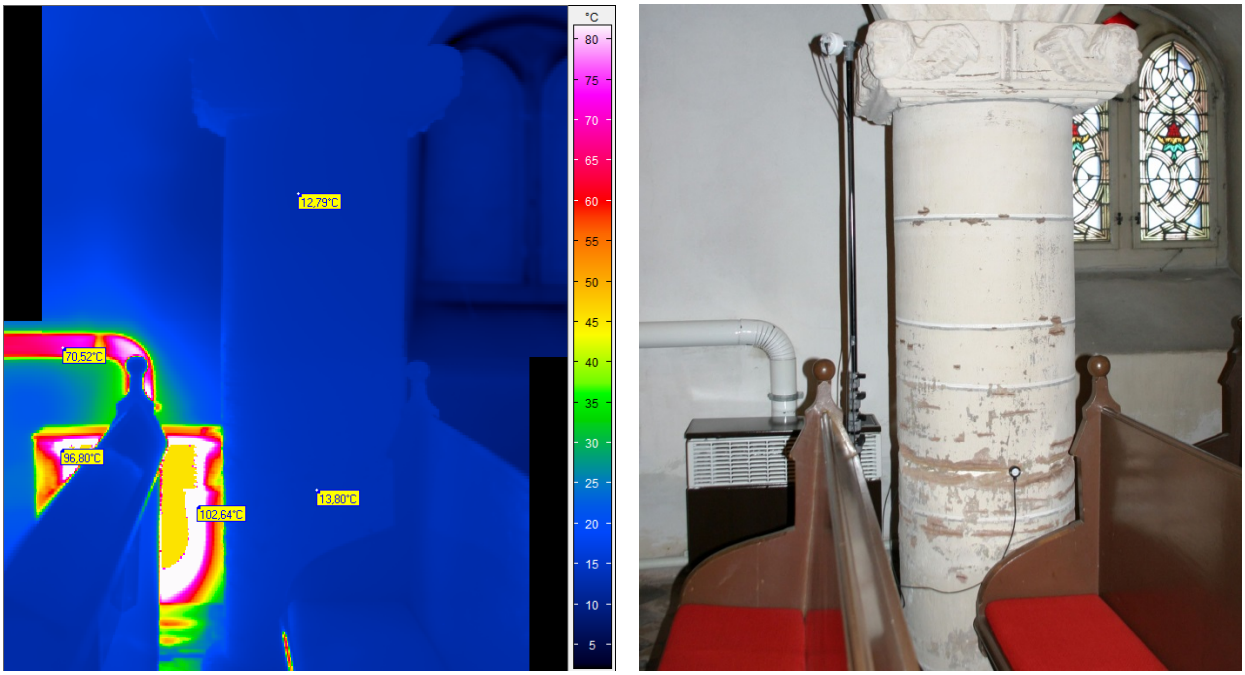


Abb. 1 Thermografieaufnahme der Mustersäule mit dahinter befindlichem Gasheizkörper. Die Oberflächentemperaturen des Gasheizkörpers liegen im Bereich von bis zu 100°C

Mit Hilfe dieser Thermografieaufnahmen wurde der Messaufbau der Klimamessung festgelegt. Ein Messpunkt zur Erfassung des Nahfeldklimas wurde an der dem Heizkörper zugewandten Seite angebracht, ein weiterer Messpunkt an der gegenüberliegenden Oberfläche, dem Kirchenschiff zugewandt. Durch die ausgewählte Verteilung der Messpunkte im Kirchenschiff war es möglich, den raumklimatischen Zustand mit seinen Beeinflussungen durch das Außenklima und die sehr rege Nutzung durch die Kirchgemeinde zu erfassen und zu bewerten. Der Messtakt aller verwendeten Datenlogger betrug 15 Minuten. Verwendet wurden Datenlogger und Sensoren der Firma Driesen + Kern GmbH.

Die Ergebnisse dieser raumklimatischen Voruntersuchungen wurden wie folgt zusammengefasst: Abb. 2 zeigt dazu ein Diagramm mit den erfassten Klimaparametern des Kirchenschiffs. Erkennbar wird die sehr rege Nutzung der Kirche auch in der Heizperiode. Dies wird an den sehr starken Aufheizereignissen im Zeitraum September bis Mai ersichtlich. So kommt es bei der relativen Luftfeuchte der Raumluft zu den ebenfalls ersichtlichen Schwankungen. Im Nahfeldbereich der Natursteinoberfläche waren diese Heizereignisse noch deutlicher ablesbar. Die Auswirkungen der Heizereignisse auf die Natursteinoberfläche sind in Abb. 3 dargestellt. Man sieht die Schwankungen der Oberflächentemperaturen, die im Tagesverlauf bis zu 15 K betragen können. Die relative Luftfeuchte an der Natursteinoberfläche schwankte im selben Zeitraum um ca. 20 % - Punkte.

Neben diesen Schwankungen der Raumklimaparameter relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur konnten auch erhöhte Werte der absoluten Luftfeuchte erfasst werden. Eine Erhöhung der absoluten Luftfeuchtekonnte eindeutig auf die oft stattfindenden Veranstaltungen zurückgeführt werden. Da es zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war, die St. Annenkirche nach einer Veranstaltung mit trockenerer Außenluft kontrolliert durchzulüften, so kam es im Jahresverlauf unweigerlich zu einer langsamen Auffeuchtung des Bauwerks. Erst ein trockener Winter sorgte für eine notwendige Abtrocknung der Raumluftfeuchte.

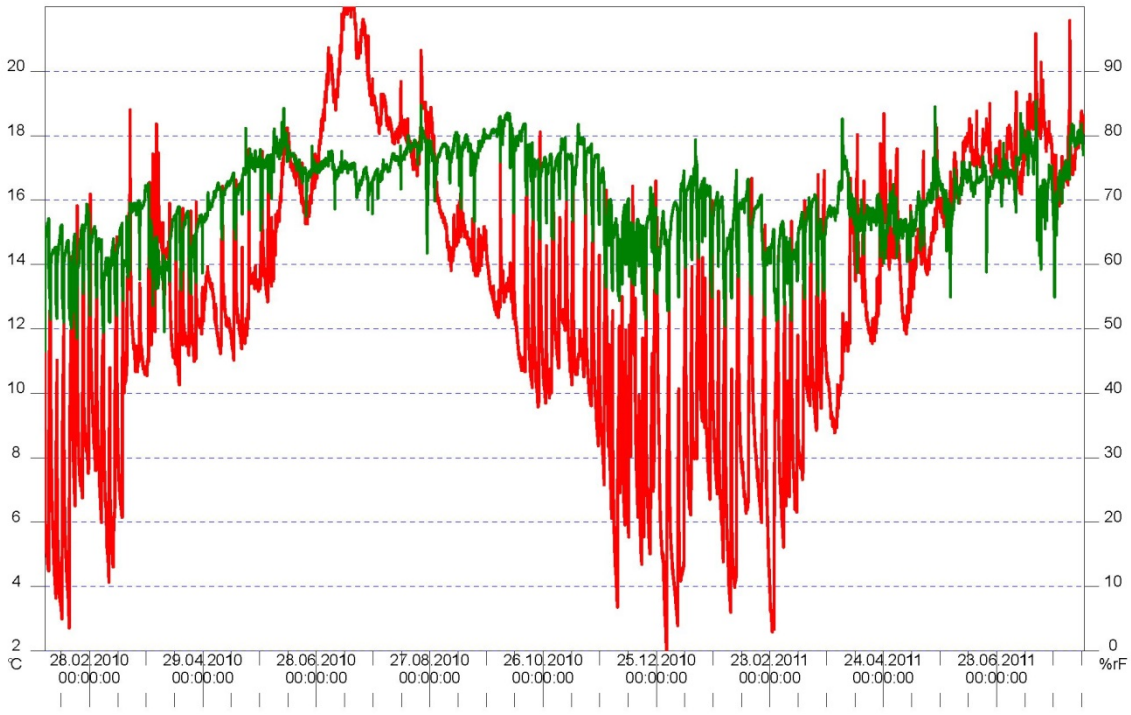


Abb. 2 Raumklima St. Annenkirche, Zeitraum: Februar 2010 – August 2011 (Voruntersuchung)
rote Kurve: Raumlufttemperatur grüne Kurve: relative Luftfeuchte Raumluft

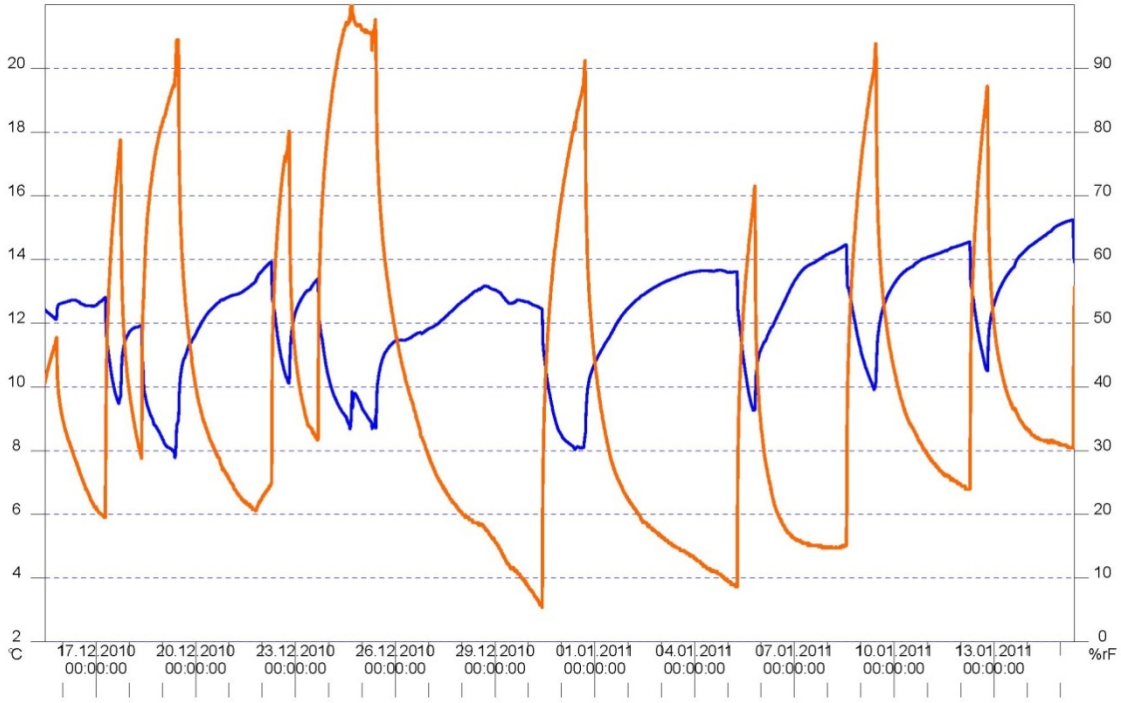


Abb. 3 Nahfeldklima Mustersäule, Ausrichtung zum Heizkörper, Zeitraum: Dezember 2010 – Januar 2011
orange Kurve: Oberflächentemperatur Naturstein blaue Kurve: relative Luftfeuchte Nahfeld Oberfläche

Die durchgeführten raumklimatischen Voruntersuchungen zeigten deutlich, dass die raumklimatische Situation im Kirchenraum als nicht optimal eingestuft werden konnte. So kam es durch die festgestellte hohe Luftfeuchte zu einer Wassereinlagerung in poröse Materialien wie Holz, Naturstein und Putz mit negativen Folgen, wie Feuchteflecken und Salzausblühungen. Bedingt durch Sorption und Kapillarkondensation kam es durch die hohen Werte der relativen Luftfeuchte zu einer Auffeuchtung von porösen Materialien und somit auch der Säulen und Kapitelle. Da schon Werte über 70 % ausreichen, um biologische Aktivitäten zu begünstigen, stellte das erfasste Raumklima ideale Lebensbedingungen für mikrobiologische Besiedlungen dar.

Des Weiteren bedingte die schnelle Anhebung der Raumlufttemperatur nach Beginn einer Aufheizung eine negativ zu bewertende schnelle Reduzierung der relativen Luftfeuchte im Kirchenschiff und an den empfindlichen Oberflächen der Natursteinsäulen. Diese immer wiederkehrenden klimatischen Belastungen führten an den sieben Natursteinsäulen und deren Kapitellen zu den in Abb. 4 erkennbaren Schäden.

Abb. 4 Schadbild an der Mustersäule durch Absanden und Schollenbildung

Durch begleitende naturwissenschaftliche Untersuchungen zum Schadprozess am verbauten Zwickauer Kohlesandstein konnte das vorherrschende Raumklima als ein wichtiger Auslöser für das sichtbare Schadbild diagnostiziert werden. Vor allem das stark schwankende Raumklima mit seinen oft sehr hohen Feuchtebelastungen auf die Natursteinoberfläche war als Hauptschadursache erkannt worden (siehe Bericht DD 61/2014 von Zötzl).

3 Empfehlungen

Um die weitere Schädigung der Säulen- und Kapitelloberflächen möglichst dauerhaft aufzuhalten bzw. stark einzudämmen, erfolgte die Erarbeitung zweier Konservierungsschritte. Zum einen musste das Raumklima in der Kirche stabilisiert und zum anderen die gefährdeten Natursteinoberflächen restauratorisch gesichert werden. Neben der langfristigen Sicherung der bedrohten Natursteinoberflächen sollten aber auch für die Kirchgemeinde verbesserte raumklimatische Bedingungen für ihre oft stattfindenden Veranstaltungen geschaffen werden. Diese beiden Anforderungen, Stabilisierung des Nahfeldklimazustandes und Verbesserung der allgemeinen Behaglichkeit bei geringzuhaltenden Energiekosten, war eine Herausforderung bei der Planung zur präventiven Konservierung der Raumschale.

Folgende Zielvorgaben wurden aus den Ergebnissen der Voruntersuchung entwickelt und dienten als Planungsgrundlage für die angehende Sanierung des Innenbereichs der St. Annenkirche:

- möglichst langsame Aufheizgeschwindigkeit zu Veranstaltungen (< 1 K/h),
- möglichst großflächige Wärmeabgabe (Fußbodenheizung?),
- keine direkte Wärmeabgabe / Wärmestrahlung auf die Natursteinoberflächen,
- feuchtegesteuerte Raumlufterwärmung / Zielgröße ist die relative Luftfeuchte,
- möglichst gleitende Raumlufttemperaturen durch gezielte Heizungssteuerung,
- sommerliche Raumtemperierung ermöglichen (Reduzierung der rel.LF im Sommerfall)
- sensorgesteuerte Raumlüftung zur optimalen Raumdurchlüftung und kontrollierten Abführung erhöhter Raumluftfeuchten.

Diese Zielvorgaben sollten durch ein erfahrenes Planungsbüro für Kirchenheizungen geprüft und in ein Heizungskonzept eingearbeitet werden. Ein Vorgehen, das gezielt angepasste Vorgaben aus unterschiedlichen Fachbereichen berücksichtigt erfordert zunächst einen erhöhten Planungs- und Investitionsaufwand. Für die Umsetzung einer technologisch innovativen und beispielgebenden Lösung in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün konnten dankeswerter Weise die DBU mit ins Boot geholt werden.

Vor allem die Möglichkeit den Kirchenraum durch eine sensorgesteuerte Raumlüftung vor einer übermäßigen Durchfeuchtung zu bewahren, sollte ein Hauptziel der anstehenden Neukonzeptionierung der Heizungsanlage sein.

Um temporär genutzte Gebäude, wie sich Kirchen im Allgemeinen darstellen, besser zu durchlüften, gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Unkontrolliertes bzw. natürliches Lüften ohne Technik: Hier besteht die Gefahr des „falschen Lüftens“, da der Mensch sensorisch nicht in der Lage ist, Klimaverhältnisse zwischen Außen- und Raumklima richtig einzuschätzen und zusätzlich der Zeitraum der Belüftung oft auf die Anwesenheit reduziert werden muss.

2. Kontrolliertes Lüften mit Technik: Technischen Lüftungsvarianten haben den großen Vorteil, berechnete Klimaverhältnisse zwischen Raum- und Außenklima zu vergleichen und eine Lüftung selbstständig zu beginnen oder zu beenden. Diese Form der Beeinflussung erfolgt 24 Stunden am Tag. Technische Installationen sind jedoch mit Investitions-, Energie-, und Unterhaltungskosten, wenn auch in überschaubaren Maße, verbunden.

Um die Luftfeuchte im Kirchenschiff dauerhaft und kontrolliert abzusenken, wurde der Einsatz einer sensorgesteuerten Lüftungsanlage für die St. Annenkirche empfohlen. Die Funktionsweise einer sensorgesteuerten Lüftungsanlage kann wie folgt kurz beschrieben werden:

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Außen- und Innenluft werden von Messfühlern gemessen und an ein sich im Gebäude befindliches Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät errechnet automatisch die absolute Luftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Ist die absolute Feuchte innen höher als außen, werden Ventilatoren oder Fensteröffner in einem individuell einstellbaren Algorithmus an- und ausgeschaltet. Während des Lüftungsvorganges kann sich die trockenere Außenluft mit der vorhandenen feuchteren Innenluft vermischen, wodurch Fußboden- und Putzflächen sowie freiliegendes Mauerwerk Feuchte an die Raumluft abgeben können. Durch einen individuell einstellbaren Messzeitraum werden die beiden Luftbereiche permanent miteinander verglichen und die Lüftung gestartet oder gestoppt. Der mit einem elektrischen Verschluss in der Wand oder einem Fenster eingebaute Ventilator zieht die feuchte Luft aus dem Raum und bläst sie ins Freie. Der Ventilator wird so dimensioniert, dass in einem definierten Zeitraum die Raumluft einmal ausgetauscht wird. Über eine Zuluftöffnung oder ein mit einem elektrischen Fensteröffner gekipptes Fenster strömt wegen des vom Ventilator erzeugten Unterdrucks trockenere Außenluft in den Raum. Die Orte der Zuluft- und der Abluftöffnung sollten weiträumig auseinander liegen, um eine möglichst große Durchmischung der Raumluft zu ermöglichen. Dadurch soll auch verhindert werden, dass sich Raumluftbereiche bilden, die nicht belüftet werden. Mittlerweile können bei den Steuergeräten zusätzliche Grenzwerte eingestellt werden. Somit ist eine Temperaturbegrenzung für Frostschutz oder ein Mindestwert für die relative Luftfeuchte im Raum möglich, damit z. B. eingelagerte Gegenstände nicht austrocknen. Ferner besteht die Möglichkeit der Datenaufzeichnung, welche zu empfehlen ist, um die Wirksamkeit der Durchlüftung über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und um Änderungen bzw. Anpassungen der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

Durch diesen gesteuerten und kontrollierten Luftaustausch kann sich die raumklimatische Situation im Kirchenschiff stabilisieren und die Luftbewegungen werden zu einem positiven Luftwechsel führen. Zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeit in die St. Annenkirche, wie z.B. durch Baumaßnahmen oder durch größere Besuchermengen, kann durch solch eine Belüftung zügig nach außen abgeführt werden, bevor sich die Feuchtigkeit an kühleren Oberflächen der Raumhülle und der Ausstattung niederschlägt. Ein weiterer Vorteil solch einer Anlage liegt in ihrer kleinteiligen und reversiblen Bauform.

Die Neukonzeption der Heizung erfolgte nach den erarbeiteten Empfehlungen durch das Ingenieurbüro Niehsen-Baumann aus Chemnitz (s. a. Baumann 2014 dieser Band). Vor allem konnte eine flächige Wärmeabgabe im Kirchenraum installiert werden. Die sensorgesteuerte Raumlüftung wurde mit der Heizungssteuerung gekoppelt, um bei Veranstaltungen die erwärmte Raumluft nicht unnötig nach außen abzuführen. Eine zeitgemäße Steuerung der gesamten Anlage sorgt für die Einhaltung der Zielklimaparameter und der gewünschten langsamen Aufheizgeschwindigkeit vor einer Veranstaltung. Durch die gewählte Anlagenform wurde auch ein wichtiger Schritt für die möglichen Energieeinsparungen erbracht.

4 Nachuntersuchungen 2012 - 2014

Mit Beginn des Jahres 2012 wurde mit der erneuten Erfassung der raumklimatischen Zustände begonnen. Wieder erfolgte eine kleinteilige Installation von Messtechnik, die sich bereits bei der Voruntersuchung bewährt hatte. Um die neu erfassten Klimadaten mit denen der Voruntersuchung vergleichen zu können, wurden dieselben Messpunkte wieder ausgewählt und auch die verwendete Messtechnik (Abb. 5) entsprach der ersten Messkampagne 2010 / 2011. Die seit Anfang 2012 laufenden raumklimatischen Untersuchungen ergaben zunächst eine erhöhte Feuchtebelastung in der Kirche. Diese war durch die Baumaßnahmen mit neuem Fußbodenestrich, teilweise neuer Wandputze und Farbanstriche verursacht worden. Diese zunächst erhöhte Raumluftfeuchte konnte jedoch in den darauf folgenden Monaten deutlich reduziert wurden. Daran leistete die bereits installierte sensorgesteuerte Raumlüftung einen erheblichen Anteil.

Abb. 5 Messaufbau zur Nahfeldklimamessung der Nachuntersuchung an der fertigen Mustersäule

Die Raumklimadaten der Heizperiode 2013 / 2014 werden in Abb. 6 dargestellt. Wenn auch dieser Winterzeitraum keine langanhaltende Frostperiode aufweisen konnte, so ist es dennoch im Januar 2014 zu einem deutlichen Kälteeinbruch mit Temperaturwerten der Außenluft von ca. -10°C gekommen, mit einer nur sehr gering ausfallenden Reaktion im Innenraum der Kirche.

Deutlich erkennbar ist die sehr stabile Raumlufttemperatur mit den nur noch geringen Temperaturschwankungen bei Veranstaltungen. Durch die gewählte Kombination der Fußbodenheizung

mit einer Wandsockeltemperierung ist es möglich, eine etwas höhere Grundtemperatur der Raumluft von ca. 10°C – 12°C zu ermöglichen, um bei den in der St. Annenkirche oft stattfindenden Veranstaltungen die Raumlufttemperatur nur noch um ca. 4 – 6 K anzuheben. Diese so erreichten ca. 14°C bis 16°C reichen vollkommen aus, um für den Zeitraum der Veranstaltung ein gewisses Gefühl von Behaglichkeit zu vermitteln. Durch die Wandsockeltemperierung werden die Wandoberflächentemperaturen angehoben. Somit wurden die als unangenehm empfundenen kalten Wandoberflächen entschärft. Die Besucher sitzen jetzt direkt auf der „Warmluftquelle“ und werden nicht mehr durch „Kältestrahlung“ der Außenwände beeinträchtigt. Vor der Neuinstallation der Raumheizung musste eine erhebliche Warmluftkonvektion der im Raum verteilten Gasheizkörper dieses Gefühl der Behaglichkeit schaffen. Die Folgen waren neben den Klimaschwankungen auch eine Verschmutzung der Raumschale und Ausstattung.

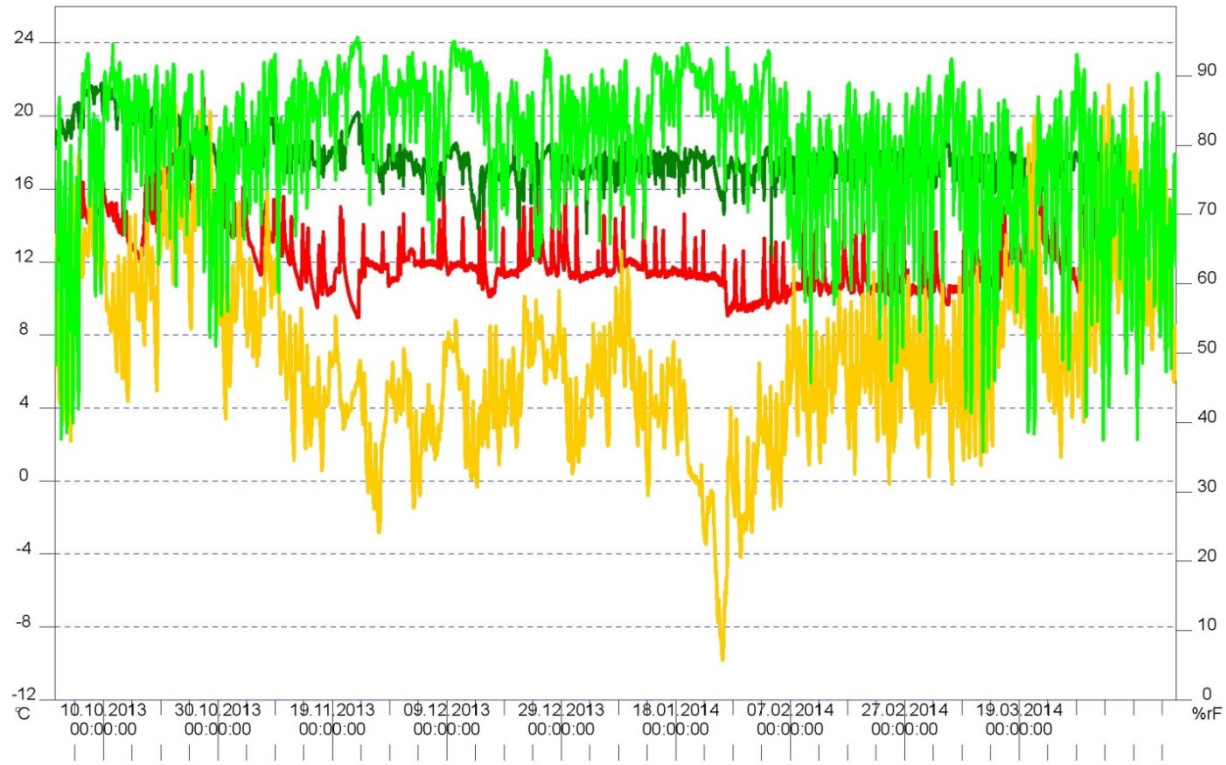


Abb. 6 Raumklima in der St. Annenkirche, erste Heizperiode nach der Innenraumrestaurierung , Messpunkt auf der Empore / Ausschnitt der Nachuntersuchung 2012 – 2014
rote Kurve: Raumlufttemperatur dunkelgrüne Kurve: relative Luftfeuchte Raumluft
orange Kurve: Außenlufttemperatur hellgrüne Kurve: relative Luftfeuchte Außenluft

Die bisher aufgenommenen Energieverbrauchsdaten zeigen auch keine negativen Auswirkungen dieser Form der Grundtemperierung des Kirchenraumes. Vielmehr konnte sogar eine Reduzierung des Energieeinsatzes verzeichnet werden. Hierzu werden jedoch erst belastbare Aussagen nach zwei bis drei Winterperioden abgeleitet werden können.

Die Nachuntersuchung zum allgemeinen raumklimatischen Zustand der St. Annenkirche stellte positive Veränderungen fest. Das neue Heizsystem hat die geforderten Grundparameter eingehalten und es konnten somit für die im Kirchenschiff befindlichen Ausstattungen, wie Orgel oder Altar, verbesserte Bedingungen für die präventive Konservierung erreicht werden.

Die Ergebnisse der Nahfeldklimamessung an der Mustersäule weisen ebenso eine deutliche Verbesserung auf. Die bei der Voruntersuchung noch festgestellten starken Schwankungen der Klimaparameter Oberflächentemperatur und relative Luftfeuchte an der Natursteinoberfläche,

bedingt durch die zum Teil enorme Wärmestrahlung der Gasheizkörper auf diese Oberflächen, konnten erheblich reduziert und somit das Nahfeldklima stabilisiert werden. Auch wenn für diese Form der Nachuntersuchung an der Mustersäule noch kein vollständiger Jahreszeitraum erfasst werden konnte, zeigen die bisher erfassten Messdaten eine eindeutig positive Entwicklung. In Abb. 7 werden die Nahfeldklimadaten der Oberflächentemperatur und relative Luftfeuchte als Punktdiaramm abgebildet. In dieser Darstellungsform ist die Verbesserung sehr deutlich ablesbar. Auch wenn man berücksichtigt, dass zwei unterschiedliche Winterbedingungen in den beiden Messkampagnen vorlagen, sind die Auswirkungen der Raumklimastabilisierung durch die Neuinstallation bzw. Neuanordnung der Raumheizung in der St. Annenkirche ablesbar. Vor allem muss die starke Reduzierung der Schwankungsbreite der Raumlufttemperatur als positiv bewertet werden. In der Abb. 8 und Abb. 9 werden die Messdaten der Nahfeldklimamessung in Form von Liniendiagrammen gegenübergestellt. Deutlich ist die Stabilisierung der klimatischen Zustände im oberflächennahen Bereich der Mustersäule erkennbar.

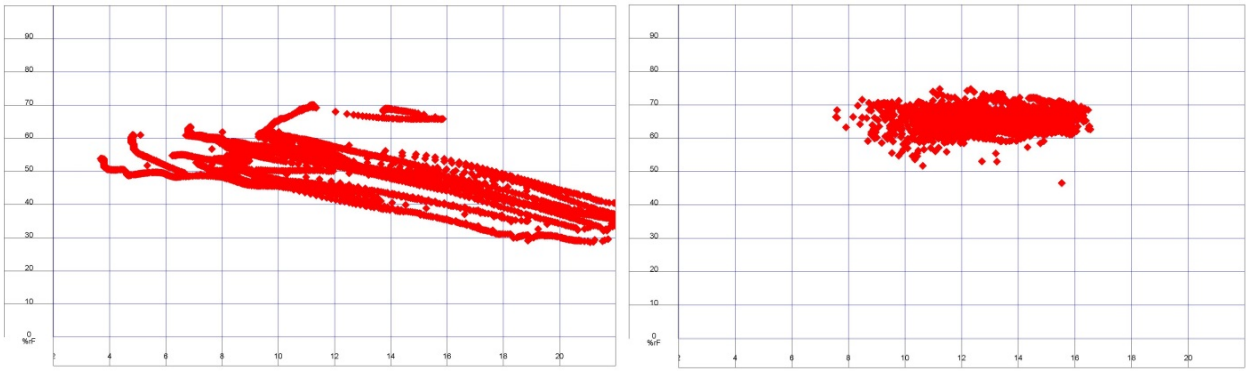


Abb. 7 Darstellung der Nahfeldklimaparameter der Mustersäule als Punktdiagramm
links Voruntersuchung (Februar 2011 – April 2011), rechts Nachuntersuchung (Februar 2014 – April 2014)
Jeder Punkt steht für einen Werte der Oberflächentemperatur (X – Achse – 2°C – 22°C) und der dazugehörigen relativen Luftfeuchte (Y – Achse – 0% - 100% rel.LF)

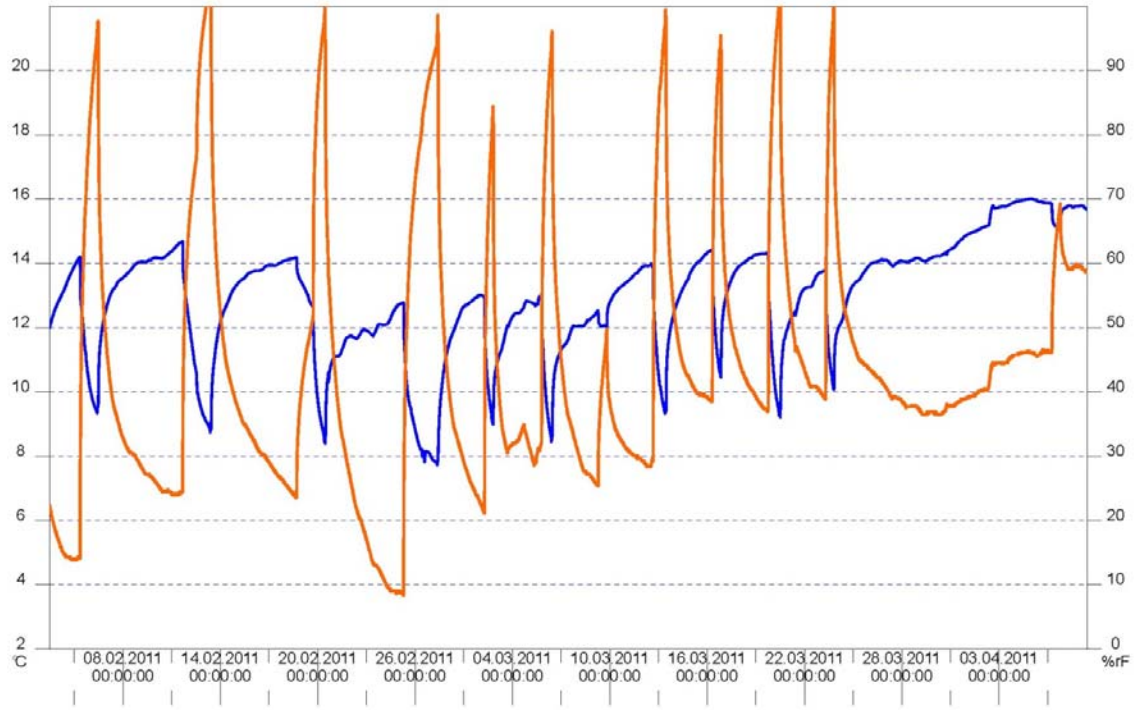


Abb. 8 Nahfeldklimamessung an der Mustersäule, Ausrichtung zum Heizkörper
Zeitraum: Anfang Februar 2011 bis Mitte April 2011 / Voruntersuchung
orange Kurve: Oberflächentemperatur blaue Kurve: relative Luftfeuchte Oberfläche

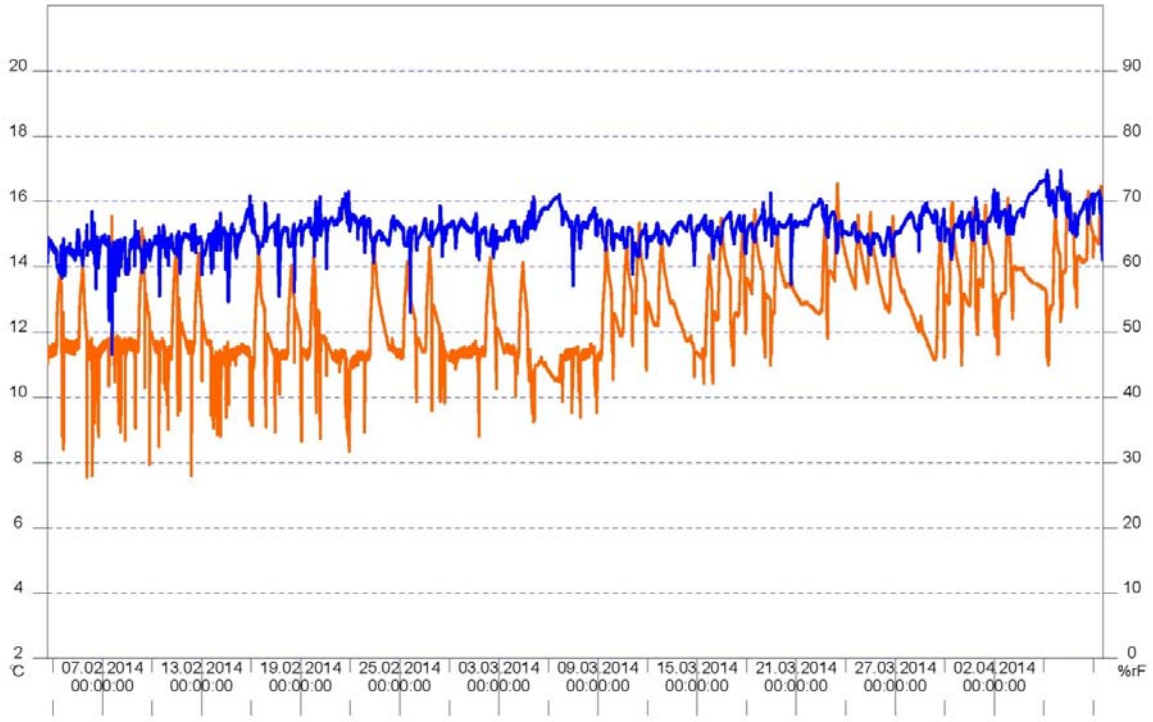


Abb. 9 Nahfeldklimamessung an der Mustersäule, Ausrichtung zum ehemaligen Heizkörper
Zeitraum: Anfang Februar 2014 bis Mitte April 2014 / Nachuntersuchung
orange Kurve: Oberflächentemperatur blaue Kurve: relative Luftfeuchte Oberfläche

Bei den Auswertungen der erfassten Raumklimadaten wurde festgestellt, dass die Messdaten der relativen Luftfeuchte am Messpunkt der Empore im oberen Bereich der Kirche unterhalb des Gewölbeansatzes, etwas höhere Werte aufwiesen als im Bereich der Mustersäule im Bereich des Gestühls. Durch die installierte sensorgesteuerte Raumlüftung und deren Betrieb sollte es jedoch zu einer Angleichung der Raumklimaparameter kommen, da trockenere Außenluft durch geöffnete Fenster im unteren Kirchenraum eingelassen und durch eine Absaugung im Gewölbebereich nach außen abgeführt wird. Auch steigt die warme Raumluft im Kirchenraum nach oben und sorgt so für etwas geringere Werte der relativen Luftfeuchte im oberen Raumbereich. In Abb. 11 wird die gewählte Funktionsweise der installierten Raumlüftung schematisch dargestellt. Durchgeführte Visualisierungen der vorherrschenden Luftströmungen bei funktionierender und ausgeschalteter Raumlüftung mit Hilfe von Rauchversuchen Abb. 10) ergaben, dass es derzeit vor allem zu einem Luftaustausch im unteren Kirchenschiff kommt. Dies wurde vor allem an Tagen mit höheren Windgeschwindigkeiten im Außenbereich festgestellt. Somit kommt es an diesen Tagen zu einer stärkeren Durchströmung des unteren Kirchenschiffbereichs und nur zu einer geringeren Abführung von Raumluft durch die Absaugung über den Gewölbebereich nach außen. Hier werden weitere raumklimatische Beobachtungen durchgeführt, um zu entscheiden, inwieweit eine Verbesserung dieser Maßnahmen notwendig wird, damit die gewollte Absaugung nach außen verstärkt werden kann. Derzeit ist jedoch die Wirkung der sensorgesteuerten Raumlüftung als positiv für den allgemeinen raumklimatischen Zustand zu bewerten.

Abb. 10 Rauchversuch mittels Theaternebel zur Visualisierung der Funktionsweise der sensorgesteuerten Raumlüftung – Abluftabsaugung unterhalt Gewölbe

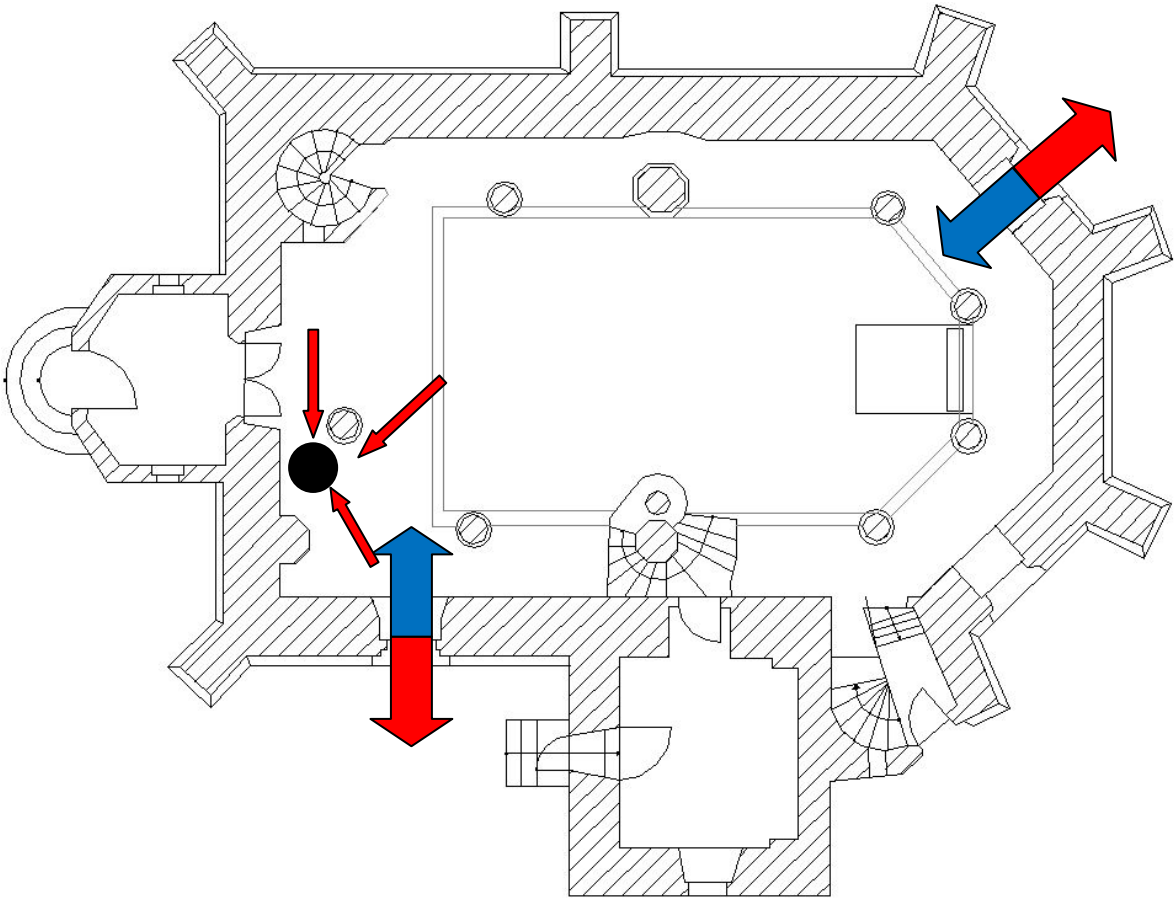


Abb. 11 Grundriss St. Annenkirche mit Lüftungsschema der sensorgesteuerten Raumlüftung
rot – Abluft von innen blau – Zuluft von außen
schwarzer Kreis: Abluftabsaugung im Gewölbe

5 Fazit

Die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen konnten in beiden Stufen ihres Einsatzes, als Vor- und als Nachuntersuchung, wichtige Anhaltspunkte für die notwendigen Restaurierungs- und Sanierungsarbeiten an der Mustersäule und im Kirchenschiff liefern. Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer unzureichenden Erwärmung der Raumluft durch die einzeln im Raum verteilten Gasheizkörper und den Schadensprozessen an den kunsthistorisch wertvollen Säulen und Kapitellen aus Zwickauer Kohlesandstein abgeleitet werden.

Die aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen erarbeiteten Empfehlungen zur Neuanordnung der Raumheizung im Kirchenschiff, der Planung einer auf den Raum abgestimmten sensorgesteuerten Raumlüftung und die allgemeinen Angaben zur raumklimatischen Stabilisierung konnten mit Hilfe des von der DBU geförderten Projektes erfolgreich baulich umgesetzt werden. Durch die raumklimatischen Nachuntersuchungen konnten diese umgesetzten gebäudetechnischen Installationen in der St. Annenkirche als erfolgreich bewertet werden. Mit Hilfe dieser Maßnahmen zur Raumklimastabilisierung ist ein ganz wesentlicher Aspekt für eine langfristige präventive Konservierung der Säulen und Kapitelle geleistet worden.

Die kleinteilige Form der durchgeführten raumklimatischen Untersuchung in der St. Annenkirche zeigt aber auch, wie wichtig diese Form der Schadanalyse ist. Erst mit Hilfe der raumklimatischen Untersuchungen und der begleitenden naturwissenschaftlichen Untersuchung am Zwickauer Kohlesandstein, konnten Schadzusammenhänge und Schadprozesse erkannt und ein angepasstes Restaurierungskonzept erarbeitet werden. Durch diese Untersuchungskombination war es möglich, langfristig angesetzte Lösungen zur Stabilisierung der Natursteinoberflächen zu erarbeiten.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine identische Form des überschaubaren Messaufbaus nicht für jedes andere Bauwerk übernommen werden kann. Je nach Bauart und Bauwerksgröße sind die Anzahl der Klimamesspunkte und der begleitenden Untersuchungen zu erweitern.

Dennoch dienen die Erfahrungen aus dem konkreten Fall als Vorlage für angepasste Untersuchungsformen an anderen geschädigten Bauwerken mit Zwickauer Kohlesandstein und darüber hinaus. Die Auswirkungen eines unzureichenden Raumklimas bzw. Nahfeldklimas auf empfindliche Natursteinoberflächen sollten nicht unterschätzt werden. Neben den restauratorischen Sicherungen und Aufarbeitungen der Natursteinobjekte sollte auch immer das vorherrschende Raumklima mit erfasst und in die Bewertung zur präventiven Konservierung einbezogen werden.

Abb. 12 Kirchenraum der St. Annenkirche nach fertiggestellter Innenraumrestaurierung

6 Literaturverzeichnis

ARENDT, K. (1993) Raumklima in großen historischen Räumen, Verlaggesellschaft Rudolf Müller, Köln

KALISCH, U. (2006) Bau und Kunstdenkmale unter dem Einfluss wechselnder Klimafaktoren, in: Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege –10 Jahre IDK, Hrsg.: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. 2006, S. 7-22.

LÖTHER, Th. (2008) Ziele und Grenzen der Beheizung sakraler Gebäude, Denkmalpflege in Sachsen, Jahrbuch 2008, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Sax-Verlag Beucha, S. 95 -96.

LÖTHER, Th. (2009) DD 95/2010 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Raumklimauntersuchung – 1. Zwischenbericht– unveröffentlicht

FRANZEN, C., LÖTHER, T., KELM, C., MEINHOLD, U. (2009) Nutzungsorientierte, optimierte Lokaltemperierung von Kirchen - modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung, Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ: 24824, DD 60/2008, 129 S., DOI: 10.5165/hawk-hhg/63

LÖTHER, T., EISBEIN, M., (2009) Raumklimatische Vor- und Nachuntersuchungen bei der Restaurierung des Cranachaltars in der Schlosskapelle Augustusburg, in: WTA (Hrsg.) Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken, Tagungsband, S. 19 – 32.

LÖTHER, Th. (2011) DD 27/2011 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Raumklimauntersuchung – Abschlussbericht - unveröffentlicht

LÖTHER, T. (2011) Einfache Messung - anspruchsvolle Auswertung - Vom Umgang mit Thermohygrographen, Datenloggern und Rissmesssystemen, Grenzen und Ausblicke, Arbeitsheft des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums, Nr. 26

Kelm, C., Löther, T., Vom Sinn und Nutzen bauphysikalischer Untersuchungen – Empfehlungen für die museale Nutzung von Denkmalen, in: Mieth, K., Museum Waldenburg (Hrsg.) Das Naturalienkabinett, Sammeln – Forschen – Zeigen, Beiträge zur Fachtagung, Sächsische Landesstelle für Museumswesen, S. 181 - 188

LÖTHER, Th. (2012) Präventive Konservierung durch sensorgesteuerte Raumlüftung, Jahrbuch 2011, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Sax-Verlag Beucha, S. 104 – 108.

LÖTHER, Th. (2012) DD 84/2012 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Empfehlungen zur baulichen Umsetzung einer sensorgesteuerte Raumlüftung - unveröffentlicht

SCHMIDT, J., LÖTHER, Th. (2012) DD 95/2012 - Auswertung sensorgesteuerter Raumlüftungen – bestehende Anlagen in Sachsen - unveröffentlicht

WTA-Merkblatt "Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken" (2009): WTA-Merkblatt E 6-12: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

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

Bericht DD 61/2014

Ruppertsgrün, St. Annenkirche

Untersuchungen zur Konservierung von Kohlesandstein und Entwicklung von Steinergänzungsmaterialien an der Kohlesandstein-Mustersäule

Beauftragt durch: Ev.-Luth. St. Annenkirchgemeinde
St.-Annen-Str. 5
08427 Fraureuth / OT Rupperstgrün

Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl
Anzahl der Seiten: 25
Anlagen: -

Dresden, 23.07.2014

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:
Sachsen:
Schloßplatz 1
01067 Dresden
Tel.: 0351 48430 408/09/10/27
Fax.: 0351 48430 468
Internet: www.idk-info.de

Sachsen-Anhalt:
Domplatz 3
06108 Halle
Tel.: 0345 472257 21/22/23
Fax.: 0345 472257 29
e-mail: info@idk-info.de

Vorstand:
Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke
Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. Uwe Kalisch
Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:
Ostsächsische Sparkasse Dresden
IBAN.: DE52850503003120115524
BIC: OSDDDE81XXX
Kto-Nr.: 3120 115 524 **BLZ:** 850 503 00
St-Nr.: 203/140/15097
Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1 Kurzfassung 3
2 Einleitung 3
3 Zustandskartierung 4
4 Voruntersuchungen 6
4.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen 7
4.2 Fazit der Voruntersuchungen 12
5 Untersuchungen zur Konsolidierung an Musterflächen 13
5.1 Bohrwiderstandsmessungen an Musterflächen 15
6 Entwicklung von Ergänzungsmörteln für Kohlesandstein 17
6.1 Untersuchungen an Kohlesandstein 17
6.2 Untersuchungen an Steinergänzungsmörteln 19
6.2.1 Vorgehensweise 19
6.2.2 Untersuchungen an Mörtelprismen 19
6.2.3 Untersuchungen an Scheiben 19
6.2.4 Entwicklung eines Ergänzungsmörtels für Kohlesandstein, Ergebnisse 20
7 Zusammenfassung 23
8 Literaturverzeichnis 24

Abb. 1 Zustandskartierung nach Entfernung der Schlämme (2013) an der Mustersäule, Kartierung und Grafiken: D. Gühne

1 Kurzfassung

Zur hochrangigen Innenausstattung der St. Annenkirche in Ruppertsgrün zählen 7 Säulen aus Zwickauer Kohlesandstein. Die Säulen zeigten vor der Restaurierung erhebliche Schäden durch Abschalen und Absanden oberflächennaher Bereiche. Im Rahmen der beispielhaften Konservierung einer Kohlesandstein-Mustersäule wurden die Schäden kartiert, Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden durchgeführt und Empfehlungen zum restauratorischen Vorgehen erarbeitet sowie restauratorische Maßnahmen analytisch begleitet. Im Rahmen des Projektes wurden Konsolidierungsversuche mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis an Musterflächen salzreduzierter und salzbelasteter Kohlesandsteinoberflächen durchgeführt und bewertet. Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel entwickelt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an die Kohlesandsteinvarietät der Mustersäule angepasst und Materialkennwerte untersucht.

2 Einleitung

Zur hochrangigen Innenausstattung der St. Annenkirche in Ruppertsgrün zählen 7 Säulen aus Zwickauer Kohlesandstein. Die Natursteinarbeiten stehen für eine erste Verwendung von Renaissance-Elementen im Bereich der ländlichen Architektur in Sachsen. Die Abb. 2 zeigt die Lage der Säulen im Grundriss der St. Annenkirche.

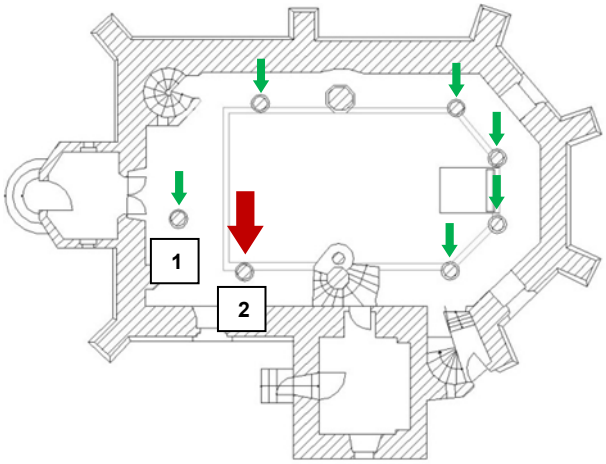


Abb. 2 Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Grundriss mit Kennzeichnung der 7 Kohlesandsteinsäulen (Säule 1 und 2 bis 7 = grüne Pfeile), Säule 2 = Mustersäule (roter Pfeil)

Abb. 3 Ruppertsgrün, St.Annenkirche, gefasste Kohlesandsteinmustersäule mit Kapitell (Säule 2), starke Schäden an Sandsteinoberflächen, Aufnahme vor der Restaurierung

Die farblich gefassten Kohlesandsteinsäulen zeigten erhebliche Schäden, die sich durch Abschalen und Absanden oberflächennaher Bereiche darstellten und sich auf Bereiche mit rotbraunen oder seltener schwarzen Lagen, die das gesamte Gestein durchziehen, konzentrierten (Abb. 3).

Eine unterhalb der Farbfassung, auf der Kohlesandsteinoberfläche aufliegende Schlämme ist das Ergebnis einer restauratorischen Maßnahme der Vergangenheit. Die (Abb. 3) zeigt eine auf der gesamten Sandsteinoberfläche aufsitzende augenscheinlich zementhaltige Schlämme, die vermutlich zum damaligen Zeitpunkt einen fortschreitenden Steinzerfall aufhalten sollte. Diese Schlämme war vor der aktuellen Restaurierungin in vielen Bereichen mit unterliegenden rotbraunen oder schwarzen Lagen bereits wieder abgängig.
Die Oberflächen der Säulen zeigten zum Teil gravierende Schäden und einen rasanten Schadensfortschritt, dem dringend begegnet werden musste.
Durch erste Untersuchungen konnte belegt werden, dass das bestehende Heizsystem in der Kirche negative Auswirkungen auf die heute durch Verbrennungsrückstände geschädigten, schadsalzbelasteten Natursteinoberflächen der Kohlesandsteinsäulen und deren Kapitelle hatte (siehe LÖTHER, 2014).
Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte durch die dankenswerte Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt das Projekt „Modellhafte Präventive Konservierung von umweltgeschädigten Sandsteinsäulen und -kapitellen aus der Frührenaissance in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün“ erarbeitet werden.
Zielstellung des Projekts war die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Verhinderung einer weiteren anthropogenen Schädigung der Sandsteinoberflächen der Säulen und Kapitelle durch eine nachhaltige Stabilisierung des raumklimatischen Zustandes im Kirchenraum sowie die Entwicklung einer modellhaften Restaurierung und eines präventiven Konservierungskonzeptes für den Kircheninnenraum mit den belasteten hochwertigen Säulen aus Zwickauer Kohlesandstein. Das modellhafte Vorgehen ist auch eine gut übertragbare Konservierungslösung für andere Objekte aus diesem als schwierig einzustufenden Denkmalgestein.
In der Kirche St. Annen wurden für die Säulen und Kapitelle verschiedene Phänotypen des Zwickauer Kohlesandsteins verwendet, allgemein überwiegt jedoch der rote Kohlesandstein. Daher wurde auch als Mustersäule für die modellhafte Konservierung eine aus dem roten Kohlesandstein geschaffene Säule ausgesucht (Abb. 3).
Im Rahmen dieser beispielhaften Konservierung wurden die Schäden kartiert, Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden durchgeführt und Empfehlungen zum restauratorischen Vorgehen erarbeitet sowie restauratorische Maßnahmen analytisch begleitet. Es wurden Konsolidierungsversuche mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis an Musterflächen an salzreduzierten und salzbelasteten Kohlesandsteinoberflächen durchgeführt und mittels Bohrwiderstandsmessungen bewertet. Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel entwickelt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an die Kohlesandsteinvarietät der Mustersäule angepasst und Materialkennwerte untersucht.

3 Zustandskartierung

Bevor mit den Voruntersuchungen begonnen werden konnte, wurde der Zustand der Mustersäule 2 mit einer Kartierung dokumentiert (Abb. 4 aus GÜHNE, 2013). Neben Bereichen, in den denen die Schlämme eine intakte Oberfläche nachbildete, waren in anderen Bereichen große Flächen der Schlämme abgängig oder nicht mehr vorhanden bzw. löste sich die Schlämme mit dem Untergrund als Schale ab. Ein Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein der Flöze, Verwitterung der Steinsubstanz und dem Fehlen der Schlämme konnte durch die Kartierung deutlich visualisiert werden.
Nachdem die Schlämme vollständig abgetragen und auch die Flöze bei der Reinigung entfernt worden waren, wurde der Zustand der Säule 2 erneut durch eine Kartierung aufgenommen. Die Steinsubstanz zeigt im Bereich der entfernten Flöze größere Flächen mit Absanden bis hin zu Abbröckeln; diese Schäden sind auch im Bereich der Fugen zwischen den Säulentrommel verstärkt zu beobachten. Einige Bereiche wurden aufgrund ihrer Größe und Tiefe als Fehlstelle kartiert. Möglicherweise sind diese Schäden auf mechanische Ursachen in der Vergangenheit zurückzuführen.

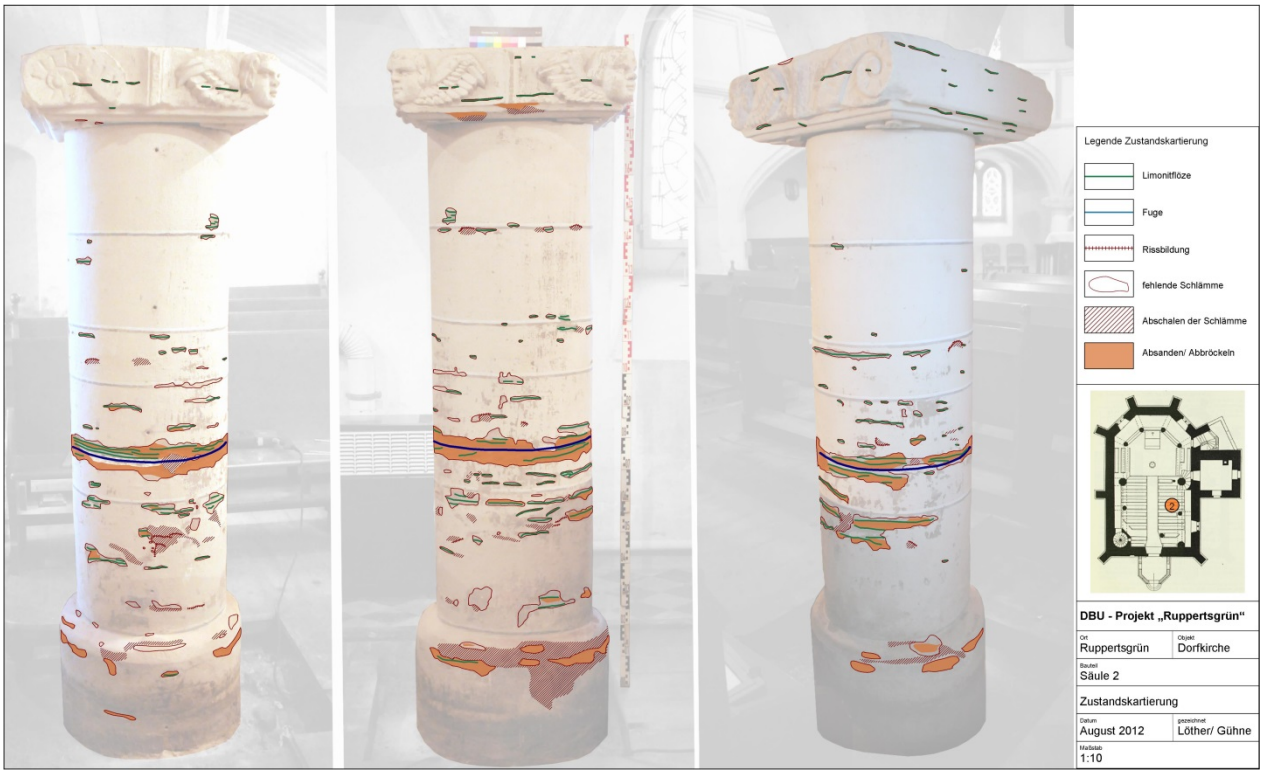


Abb. 4 Zustandskartierung vor (2012, oben) und nach der Entfernung der Schlämme (2013, unten) an der Mustersäule, Grafiken: D. Gühne

4 Voruntersuchungen

Im Vorfeld restauratorischer Arbeiten sind naturwissenschaftliche Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden notwendig. Im Rahmen der Voruntersuchungen an der für die Erprobung konservatorischer Maßnahmen vorgesehenen Kohlesandsteinmustersäule wurden Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung sowie Materialanalysen durchgeführt. Begleitend erfolgten Klimamessungen an der Säulenoberfläche sowie im Innenraum (siehe LÖTHER, 2014). Die Ergebnisse der Voruntersuchungen dienten als Basis für das restauratorische Vorgehen. In einem Höhen- und Tiefenprofil mit 6 Höhen- und 5 Tiefenstufen wurden Bohrmehlproben entnommen und die Feuchte- und Salzgehalte der Kohlesandsteinmustersäule untersucht.

Die Profile wurden bei einem Säulendurchmesser von 60 bis 48 cm bis in eine Tiefe von 32 cm angelegt (Abb. 5). Es wurden 5 Tiefenprofile im Sandstein bei 10, 60, 130, 150 und 180 cm und ein Tiefenprofil direkt in eine rotbraune Lagein einer Höhe von 75 cm angelegt (Abb. 6). Die Bohrmehlentnahme erfolgte in den Tiefenstufen 0-1, 1-3, 3-5, 20-22 und 30-32 cm. Bei allen Proben wurde die Darrfeuchte (WTA, 1999) ermittelt. An Proben der ersten beiden Tiefenstufen erfolgte die Bestimmung des Anteils der wasserlöslichen Bestandteile sowie die Messung der Leitfähigkeit und des pH-Werts des Extrakts. Die Ermittlung der Schadsalzbelastung erfolgte durch qualitative und quantitative Salzanalysen an Bohrmehlproben der ersten Tiefenstufe. Diese wurden nach WTA-Merkblatt „Kompressenentsalzung“ bewertet.

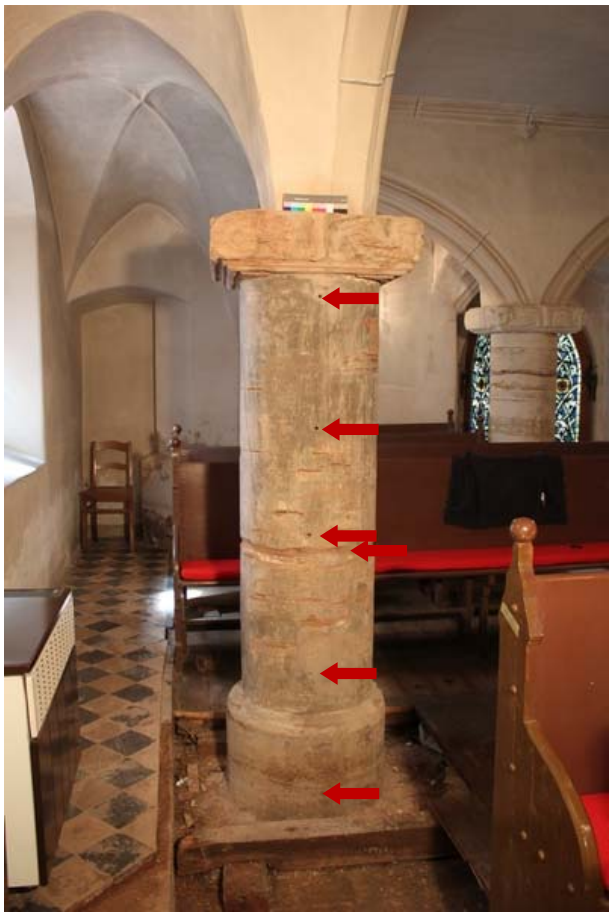


Abb. 5 Mustersäule mit abgenommener Farbfassung, Voruntersuchungen, Höhen- und Tiefenprofilen zur Bestimmung der Feuchte- und Salzbelastung, Bohrmehlentnahme in den Höhen 10, 60, 75, 130, 150 und 180 cm über FOK

Abb. 6 Mustersäule, Schäden konzentrieren sich auf Bereiche rotbrauner Lagen, Probenahmepunkte für das Feuchte-Salz-Tiefenprofil im Bereiche rotbrauner Lagenund Ausblühsalz-Material-Mischproben

Abb. 7 Mustersäule, Untersuchungen an Schlämme und Ausblühsalz

Reduzierte Salzanalysen mit Bestimmung der Gesamtgehalte löslicher Salze erfolgten auch an Proben der 6. Tiefenstufe. Ausblühsalz- und phasenanalytische Untersuchungen an Gesteinsmaterial wurden mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie durchgeführt. Die Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 dokumentieren die beprobten Bereiche.

4.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Ergebnisse der Basisuntersuchungen an den Bohrmehlen sind in Abb. 8 und Tab. 1 zusammengefasst. Zum Zeitpunkt der Probenahme wird keine hohe Feuchtebelastung festgestellt (siehe Abb. 8). Es ist keine aufsteigende Feuchte nachweisbar. Geringe Feuchten von bis ca. 2 bis 3 Ma.-% werden jedoch oberflächennah bis in eine Tiefe von 3 cm festgestellt. Im Flözbereich steigt die Feuchte in diesen Tiefenstufen auf ca. 4 Ma. %. Die in einigen den unteren Bereichen oberflächennah entnommenen Bohrmehlproben ermittelten pH-Werte sind leicht erhöht, was mit der zementhaltigen Schlämme auf der Säulenoberfläche in Verbindung gebracht werden kann. Die Werte für die Summe der wasserlöslichen Bestandeile korrelierten gut mit den Leitfähigkeitswerten (Tab. 1). In Tab. 2 und Tab. 3 werden die Ergebnisse der Kat- und Anionenkonzentrationen im Bohrmehl dargestellt.

In den untersuchten Proben wurden überwiegend oberflächennah hohe Schadsalzanionengehalte an Nitrat, Chlorid und Sulfat festgestellt. Diese korrelieren gut mit den Ergebnissen der Kationenanalysen. Stichprobenartig wurden auch an in der Tiefe entnommenen Bohrmehlproben Salzuntersuchungen durchgeführt und noch deutliche Salzionengehalte festgestellt.

Die Bewertung der Salzanalysen an den Bohrmehlprobennach WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung" erfolgt in Tab. 4.

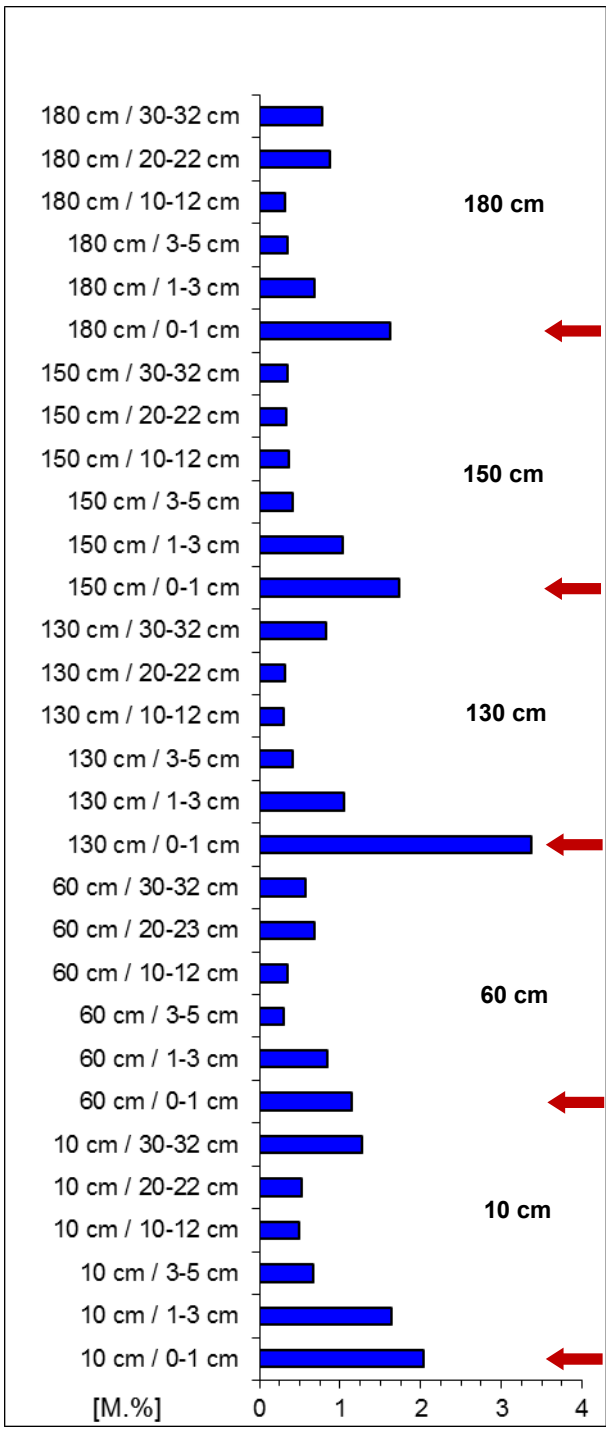


Abb. 8 Mustersäule, Feuchteverteilung im Höhen- und Tiefenprofil, Bohrmehlentnahme in den Höhenstufen 10, 60, 130, 150 und 180 cm über FOK und den Tiefenstufen 0-1, 1-3, 3-5, 20-22 und 30-32 cm

Tab. 1 Ergebnisse der Basisuntersuchungen

Höhe FOK / Tiefe [cm]	**Lf_{250}** [µS/cm]	**pH** [-]	**∑ H_2O-lösl. Bestandt.** [Ma.-%]
10 / 0-1	65	9,58	0,62
10 / 1-3	35	9,44	0,13
10 / 30-32	53	9,14	0,15
60 / 0-1	145	8,68	1,59
60 / 1-3	67	8,05	0,34
60 / 30-32	98	7,87	0,27
75 / 0-1	276	7,03	2,76
75 / 1-3	242	7,02	1,46
75 / 30-32	354	6,82	1,42
130 / 0-1	405	7,56	3,55
130 / 1-3	132	7,54	0,72
130 / 30-32	234	7,28	0,92
150 /0-1	130	7,75	1,39
150 / 1-3	146	7,36	0,12
180 / 0-1	81	7,67	1,46
180 / 1-3	107	7,39	0,83
180 / 30-32	140	7,22	0,76

Tab. 2 Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Anteile an löslichen Kationen in Ma.-%

Höhe FOK [cm]	**Ca^{2+}** [Ma.-%]	**Mg^{2+}** [Ma.-%]	**K^{+}** [Ma.-%]	**Na^{+}** [Ma.-%]
10	0,24	0,12	0,03	0,02
60	0,35	0,11	0,04	0,05
75	0,39	0,10	0,06	0,18
130	0,59	0,08	0,05	0,16
150	0,66	0,10	0,05	0,04
180	0,29	0,10	0,02	0,02

Tab. 3 Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Anteile an löslichen Anionen in Ma.-%

Höhe FOK [cm]	**SO_4^{2-}** [Ma.-%]	**Cl^{-}** [Ma.-%]	**NO_3^{-}** [Ma.-%]
10	0,14	0,02	0,05
60	0,74	0,12	0,13
75	0,54	0,46	0,31
130	0,93	0,25	0,25
150	0,10	0,17	0,28
180	0,08	0,06	0,28

Tab. 4 Bewertung der Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Bewertung nach WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung"

Höhe FOK [cm]	**WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung"**		
	SO_4^{2-}	**Cl^{-}**	**NO_3^{-}**
10	mittel	gering	gering
60	hoch	hoch	mittel
75	hoch	extrem	hoch
130	extrem	hoch	hoch
150	gering	hoch	hoch
180	gering	mittel	hoch

Auf rotbraunen Lagen aufsitzende Ausblühsalze wurden bewusst zusammen mit dem unterliegenden Material beprobt (Abb. 6 und Abb. 9) und mittels Röntgenpulverdiffraktometrie phasenanalytisch untersucht. In allen drei untersuchten Proben wurden Mineralphasen analysiert, die dem Kohlesandsteingefüge zuzuordnen sind. Dazu zählen Quarz (SiO_2), Hellglimmer (Muskovit, $KAl_2[(OH,F)_2/AlSi_3O_{10}]$ und Kaolinit ($Al_2[(OH_4)$-/$Si_2O_5]$). Der analysierte Hämatit (Fe_2O_3) ist farbgebender Bestandteil der rotbraunen Lagen im roten Kohlesandstein und zum Teil auch Bindemittel im Sandsteingefüge. Eine Schadsalzbelastung mit dem hygroskopischen Salz Halit (NaCl) wird in einer Probe nachgewiesen. Vorhergehende XRD-Untersuchungen an Ausblühungen und Flözoberflächenmaterial der Mustersäule und der Säule 1 zeigten neben Halit das Schadsalz Natriumnitrat ($NaNO_3$) und Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Diese Salze werden auch mit der chemischen Schadsalzanalyse am Eluat weiterer Proben bestätigt. Die festgestellten hygroskopischen Salze (Nitrate, Chloride) führen zu einer Befeuchtung der Sandsteinoberflächen. Dazu tritt Pyrit (FeS_2) auf. Pyrit ist Bestandteil der Steinkohlelagen im Kohlesandstein der Säule 1. Eine dauerhafte Durchfeuchtung kann eine Pyritverwitterung beschleunigen. Die Verwitterungsprodukte können das sehr heterogene Kohlesandsteingefüge, die tonigen bis silikatischen Kornbindungen und die Komponenten schädigen.

Abb. 9 Mustersäule, Untersuchungen an Ausblühsalz

Abb. 10 Mustersäule, hämatitreiche Lage mit abgängiger Schlämme

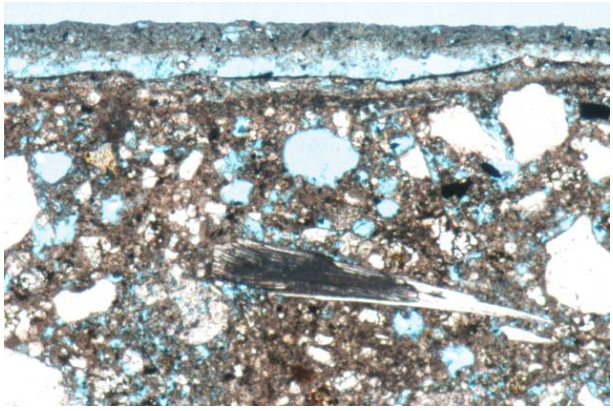


Abb. 11 Mustersäule, Schlämme mit organischer Faser im Zentrum, Dünnschliffaufnahme (Nicols ||, Bildbreite: 1,9 x 1,29 mm)

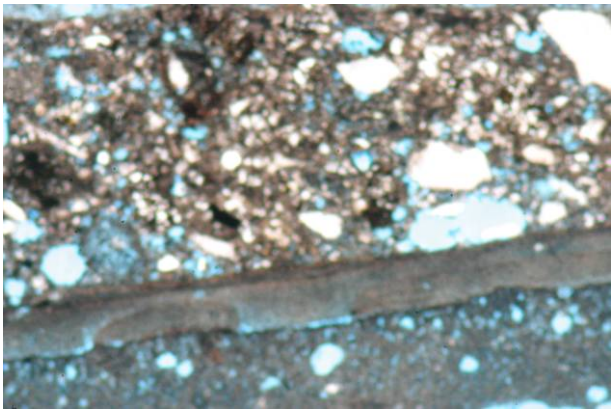


Abb. 12 Schlämme, Dünnschliffaufnahme (Nicols ||, Bildbreite: 1,9 x 1,29 mm) Unterseite mit Resten der Farbfassung auf Kohlesandstein

Die aufliegende, grünlich bis graue Schlämme wurde beprobt (Abb. 10). Sie zeigt einen hohen Haftverbund zur Kohlesandsteinoberfläche der Säule. Ihre Stärke variiert zwischen 1 bis 5 mm. In Bereichen mit Hämatitlagen ist sie abgängig und führt auf Grund des guten Haftverbundes zur Abschalung der Natursteinoberfläche. Dünnschliffuntersuchungen (Abb. 10 und Abb. 11) zeigen ein dichtes bindemittelgestutztes Gefüge mit hohen hydraulischen Anteilen, die auf einen hohen Zementgehalt hinweisen. Es wird ein Quarzsandzuschlag 0/1 mm mit Überkorn bis 3 mm festgestellt.

4.2 Fazit der Voruntersuchungen

In der Kirche St. Annen wurden für die Säulen und Kapitelle verschiedene Phänotypen des Zwickauer Kohlesandsteins verwendet. Es überwiegt jedoch der rote Sandstein. Der Sandstein zeigt schichtparallele Einschaltungen von mikroskopisch kleinen bis 1,5 cm starken rotbraunen Lagen und Einschaltungen, die an der Mustersäule hauptsächlich aus Hämatit bestehen (Abb. 10). Das Material ist extrem mürbe und sandet stark ab. Salze werden in diesen Bereichen deutlich aufkonzentriert. Die Mineralphasen Quarz, Kaolinit und Muskovit und untergeordnet Hämatit sind dem Kohlesandsteingefüge zuzuordnen. Teilweise wurden die Säulen aber auch aus Werksteinen unterschiedlicher Phänotypen zusammengesetzt. Zum Beispiel wird im unteren Bereich der Säule 1 der graue Phänotyp mit kohlehaltigen Lagen angetroffen, nach oben hin folgt ein Werkstein mit einer gelblichen in das Rötliche übergehenden Farbigkeit. In Fugenbereichen zwischen den Werksteinen konnte ein Kalkmörtel analysiert werden.

Die Sandsteinsäulen und Kapitelle zeigen erhebliche Schäden, die sich durch Abschalen und Absanden oberflächennaher Bereiche darstellen und sich hauptsächlich auf die oben beschriebenen Bereiche konzentrieren.
Durch die frühere restauratorische Maßnahme des Auftragens der zementhaltigen Schlämme mit dem Ziel die Oberflächen zu schützen, konnte der Schadensfortschritt nicht gestoppt werden. Vermutlich wurden durch diese Maßnahme zusätzliche Alkalien in das Gestein eingebracht.

Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse zum Zeitpunkt der Probenahme festgestellt:

Es sind keine hohen Feuchtewerte im Sandsteingefüge nachweisbar. Eine geringe oberflächennahe Feuchtebelastung (bis 3 cm) von ca. 2 bis 3 Ma.-% wird im Sandstein festgestellt. Im Flözbereich steigt die Feuchte oberflächennah auf ca. 3 Ma.-%. Auf Grund hoher Werte der relativen Luftfeuchte kam es durch Sorption und Kapillarkondensation zu einer Auffeuchtung der Säulenoberflächen (siehe LÖTHER, 2014). Die Belastung mit hygroskopischen Salzen behindert die Abtrocknung. Die hohe Schadsalzbelastung ist Resultat aufsteigender Feuchte in der Vergangenheit. Eine Fraktionierung der Salzbelastung nach der Löslichkeit ist aus den Ergebnissen ableitbar. In den unteren Bereichen werden höhere Konzentrationen an Sulfaten, in oberen Bereichen hohe Konzentrationen an Chloriden und Nitraten und nur geringe Sulfatgehalte festgestellt. Eine geringfügig höhere Salzanreicherung im untersuchten hämatitreichen Bereich wird nachgewiesen und mit der starken Schädigung dieser Bereiche in Verbindung gebracht. Die Schäden treten oberflächennah in Verbindung mit dem Raumklima, verursacht durch die Heizanlage auf (siehe LÖTHER, 2014).

Im Rahmen einer Ergebnisdiskussion, die auch im Rahmen eines Projekt-Kolloquiums geführt wurde, konnten folgende Empfehlungen für das weitere restauratorische Vorgehen erarbeitet und festgelegt werden:

- Da die Mustersäule bereits vom Untergrund durch eine Schieferplatte abgekoppelt ist, erfolgt als flankierende Maßnahme die Einbettung der Säule in ein Kiesbett.
- Auf Grund der hohen oberflächennahen Salzbelastung der hämatitreichen Lagen, sollen diese oberflächennah ausgeräumt und durch einen zu entwickelnden Ergänzungsmörtel ersetzt werden.
- Die Schlämme führt zur weiteren Schädigung durch Oberflächenabschluss. Unterliegende Schadsalze führen zum Abschalen der Schlämme zusammenmit anhaftenden Natursteinoberflächen. Eine Entfernung der Schlämme wird empfohlen, da sie Voraussetzung für eine Salzminderung durch Kompressenapplikation ist. Gleichzeitig erfolgt eine oberflächennahe, mechanische Salzminderung.

- Im Vorfeld der Konsolidierung wird eine Salzminderung mittels Zellstoffkompressen in 2 bis 3 Zyklen empfohlen. Durch Reduzierung hygroskopischer Salze erfolgt ebenfalls eine oberflächennahe Abtrocknung.

- Die Konsolidierung entfestigter Kohlesandsteinoberflächen mittels KSE wird empfohlen. Im Vorfeld werden Musterflächen mit verschiedenen Steinfestigern auf KSE-Basis angelegt und die Musterflächen mittels Bohrwiderstandsmessungen bewertet.

- Vergleichend wird die Konsolidierung entfestigter, salzbelasteter Kohlesandsteinoberflächen an Musterflächen der Kohlesandsteinsäule 1 mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis empfehlen, um den Einfluss der Salzbelastung zu beurteilen zu können. Bewertung der Musterflächen mittels Bohrwiderstandsmessungen.

- Vermeidung starker Schwankungen der relativen Luftfeuchte durch Abänderung des Heizsystems und damit Einschränkung der Kristallisationen von Schadsalzen (siehe LÖTHER, 2014).

- Entwicklung eines Ergänzungsmörtels, vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel, Anpassung der Materialkennwerte an den Kohlesandstein.

5 Untersuchungen zur Konsolidierung an Musterflächen

Konsolidierungsversuche mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis wurden an einer Mustersäule durchgeführt. Dazu wurde im Vorfeld die auf der Kohlesandsteinoberfläche aufliegende Zementschlämme entfernt und mehrzyklische Salzminderungsmaßnahmen mit Zellstoffkompressen durchgeführt. Um den Einfluss einer Salzbelastung auf die Festigung bewerten zu können, wurden an einer weiteren Säule (Säule1, Abb. 13) vergleichende Festigungsversuche an salzkontaminierten Oberflächen durchgeführt. Dazu wurden vergleichbare Sandsteinoberflächen ausgesucht und Salzuntersuchungen durchgeführt.

Tab. 5 Ergebnisse der Basisuntersuchungen

Tiefe [cm]	**Lf_{250}** [µS/cm]	**pH** [-]	**∑ H_2O-lösl. Bestandt.** [Ma.-%]
0-1	66	8,48	0,48
1-2	74	8,68	0,50

Tab. 6 Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Anteile an löslichen Kationen in Ma.-%

Tiefe [cm]	**Ca^{2+}** [Ma.-%]	**Mg^{2+}** [Ma.-%]	**K^+** [Ma.-%]	**Na^+** [Ma.-%]
0-1	0,24	0,11	0,03	0,01
1-2	0,23	0,11	0,03	0,01

Tab. 7 Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Anteile an löslichen Anionen in Ma.-%

Tiefe [cm]	**SO_4^{2-}** [Ma.-%]	**Cl^-** [Ma.-%]	**NO_3^-** [Ma.-%]
0-1	<0,01	0,05	0,16
1-2	<0,01	0,06	0,21

Tab. 8 Bewertung der Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben, Bewertung nach WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung"

Tiefe [cm]	**WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung"**		
	SO_4^{2-}	**Cl^-**	**NO_3^-**
0-1	unbelastet	mittel	mittel
1-2	unbelastet	mittel	hoch

Die Ergebnisse sind in den Tab. 5, Tab. 6 und Tab. 7 aufgeführt. In den untersuchten Bohrmehlproben wurden überwiegend Schadsalzanionengehalte an Nitrat und Chlorid festgestellt (Tab. 7). Die Ergebnisse korrelieren mit XRD-Analysen an Ausblühsalzen: Halit und Natriumnitrat. Eine Bewertung der Anionen nach WTA-Merkblatt E 3-13-01/D "Kompressenentsalzung“ erfolgt in Tab. 8.

Abb. 13 Übersicht der Festigungsmusterflächen an der Säule 1

Abb. 14 Übersicht Probeflächen an der Mustersäule, Säule 2

Zur Bewertung der Festigungsversuche an Kohlesandsteinmusterflächen wurden an insgesamt 13 Musterflächen (Abb. 13 bis Abb. 16) Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt. Die Ausführung der Messungen erfolgte 7 Wochen nach Anlage der Musterflächen mit einem Bohrwiderstandsmessgerät vom Typ DURABO (PFEFFERKORN, 1998). Es wurde ohne Einsatz der Schlagfunktion, mit 3 kg Anpressdruck und schneller Schreibergeschwindigkeit gearbeitet. Pro Probefläche wurden drei bis fünf Bohrungen ausgeführt. Die Messungen wurden sowohl in unbehandelte als auch gefestigte Sandsteinoberflächen eingebracht. Die Probeflächen für die Festigung wurden durch das Atelier für Steinrestaurierung, Herrn Andreas Muth, angelegt (siehe MUTH, 2014). An der Säule 02 war, wie bereits erwähnt, im Vorfeld eine Salzreduzierung in 3 Zyklen vorgenommen worden. Die Größe der Probeflächen liegt jeweils bei 100 cm^2 (10 x 10 cm). Damit entspricht ein Festigerverbrauch von 1 ml in der Probefläche 0,1 L pro m². Bei der Festigung wurde grundsätzlich in drei Flutabläufen konserviert. Innerhalb eines Durchganges wurde das Konservierungsmittel mehrmals mit einem Pinsel appliziert. Die Grenze der Aufnahmefähigkeit des Steines wurde dabei anvisiert. Zwischen den drei Flutungsdurchgängen wurde eine Pause von ca. 15 min eingehalten. Nach Abschluss wurden alle Probeflächen mit Aceton nachbehandelt. Nach einer Standzeit von 7 Wochen wurden die Probeflächen mittels Bohrwiderstandsmessung untersucht. Eine optische Veränderung der getränkten Bereiche (Verdunklung, Glanzbildung) war nicht feststellbar.

5.1 Bohrwiderstandsmessungen an Musterflächen

Die Bohrwiderstandsmessungen wurden sowohl in unbehandelte als auch in gefestigte Sandsteinoberflächen eingebracht. Pro Probefläche wurden drei bis fünf Bohrungen ausgeführt. Referenzwerte für die Festigkeit der Steinsubstanz wurden in Bereichen ermittelt, die von den Tränkungsmaßnahmen ausgenommen wurden. Mit der eingesetzten Methode der Tränkung der Steinoberfläche mittels Pinselapplikation bis zur Sättigung der Steinsubstanz kann eine Konsolidierung oberflächennaher Bereiche erwartet werden. Die Festigungsmaßnahme soll den durch Verwitterung entstandenen Verlust an Bindungen im Gefüge der Steinsubstanz ausgleichen und ein möglichst gleichmäßiges Festigkeitsprofil erzielen.

Abb. 15 Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Säule 02, Messung des Bohrwiderstandes an den gefestigten Probeflächen

Abb. 16 Probeflächen an der Mustersäule, Säule 1

An der Säule 01 zeigt die Mittelwertkurve der unbehandelten Probefläche eine deutliche Entfestigung der Oberfläche. Eine Festigung dieser oberflächennahen Mürbzone konnte durch den Einsatz von KSE 100 erzielt werden. Eine tiefergehende Konsolidierung (ab ca. 6 mm) der Sandsteinsubstanz war nicht feststellbar. Auch an den Probeflächen mit einer Festigung mit KSE 100 und 300 bzw. mit KSE 100 und 300E konnte kein konsolidierender Effekt durch die Festigungsmaßnahmen gemessen werden.
Im oberen Bereich der Säule 02 zeigt die Mittelwertkurve der unbehandelten Probefläche eine deutliche Entfestigung der Oberfläche und auch einen stark entfestigten Bereich bis in eine Bohrtiefe von ca. 18 mm. Die Festigungsmaßnahmen mit KSE 100 bzw. mit KSE 100 und 300E konnten die Mürbzone nicht überbrücken und auch die generell stark entfestigte Steinsubstanz nur punktuell geringfügig konsolidieren.
Durch den Einsatz von KSE 100 und 300 konnte sowohl die oberflächennahen Bereiche, als auch über die gesamte Bohrtiefe eine deutliche Festigung der Sandsteinsubstanz erzielt werden. Die Messwerte liegen deutlich über denen der Vormessung. Die Mittelwertkurve zeigt aber auch deutliche Sprünge im Festigkeitsprofil, mit denen das Risiko einer Überfestigung und einer folgenden Schalenbildung verbunden sein könnte.

Im unteren Bereich der Säule 02 zeigt die Mittelwertkurve der unbehandelten Probefläche eine deutliche Entfestigung der Steinsubstanz bis ca. 15 mm Bohrtiefe. Die Festigungsmaßnahmen mit KSE 300E bzw. mit KSE 100 und der Kombination von KSE 100 und 300 konnten weder die oberflächennahe Mürbzone überbrücken, noch über die gesamte Bohrtiefe den Sandstein konsolidieren. Lediglich punktuell war eine geringfügige Festigung der Steinsubstanz messbar. Eine Versorgung in diesem Bereich konnte nach dem Einsatz von KSE 300 festgestellt werden. Ab 3 mm Bohrtiefe ist ein deutlicher und kontinuierlicher Anstieg des Bohrwiderstandes messbar. Vergleichbare Werte zeigte die Festigung mit KSE 100 und der Kombination von KSE 100 und 300E. Jedoch ist hier ein sprunghafter Anstieg des Bohrwiderstandes zu verzeichnen, der als kritisch einzustufen ist.
Generell bedarf die Sandsteinsubstanz einer sorgfältigen Konsolidierung und durch das heterogene Gefüge des Sandsteins sollte vor allem die Gefahr einer Schalenbildung beachtet werden. Die Sandsteinsubstanz der Säule 01, an der keine Salzreduzierung im Vorfeld vorgenommen wurde, konnte durch die Festigung mit KSE 100 oberflächennah konsolidiert werden. An der Säule 02 waren im Vorfeld Maßnahmen zur Salzreduzierung durchgeführt worden. Nach einer Festigung mit KSE 300 war über die gesamte Bohrtiefe eine Konsolidierung des Sandsteins messbar, wobei der Bohrwiderstand nicht sprunghaft anstieg und somit das Risiko einer Überfestigung als gering einzuschätzen ist. Die aufgrund der Ergebnisse vermutete größere Eindringtiefe des Festigers ist vermutlich im Zusammenhang mit der Salzreduzierung zu sehen.
Bei der Anwendung sollte je nach Saugverhalten und Verwitterungsgrad die Tränkungsmenge variiert und vor allem eine Anreicherung des Festigers an der Oberfläche durch sorgfältige Verarbeitung vermieden werden.
Vernachlässigt man den Einfluss des heterogenen Kohlesandsteingefüges, so kann festgestellt werden, dass die Kristallisation der Salze im Porenraum des Kohlesandsteins einen deutlichen Einfluss auf das Eindringverhalten des Festigers und damit auf die Festigerwahl haben. Der wirkstoffärmere Steinfestiger KSE 100 erzielt hier die besten Ergebnisse, während in salzreduzierten Bereichen der Mustersäule (Säule 02) der Einsatz von KSE 300 über die gesamte Bohrtiefe eine deutliche Festigung der Sandsteinsubstanz erzielen konnte.

Abb. 17 MP 02_01 und MP 02_02, Messpunkte in gefestigtem Bereich mit KSE 100 bzw. mit KSE 100 und 300

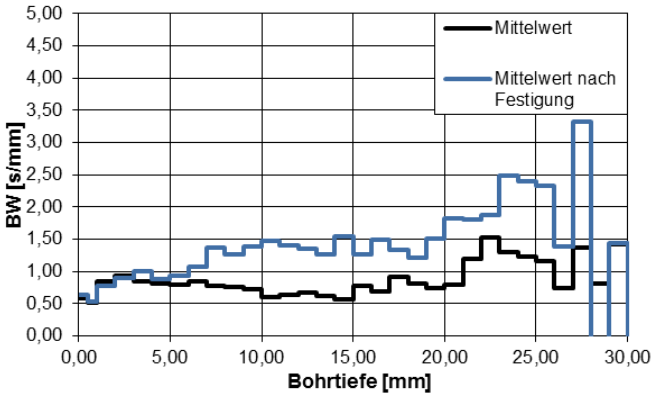


Abb. 18 Mittelwertkurven des Bohrwiderstandes vor und nach der Behandlung mit KSE 300 an Musterflächen der Säule 2

6 Entwicklung von Ergänzungsmörteln für Kohlesandstein

Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel entwickelt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an die Kohlesandsteinvarietät der Mustersäule in der St. Annenkirche angepasst und die Materialkennwerte untersucht. Die Anpassung der Mörtel erfolgte durch Zugabe von fraktioniertem Kohlesandsteinzuschlag, Zusätzen und Pigmenten durch die Firma Romstedt-Technologien für Restauratoren GmbH. Die Probekörper für die Bestimmung der Materialkennwerte wurden durch das Atelier für Steinkonservierung, Andreas Muth, hergestellt und durch das IDK untersucht. Für die Gewinnung von Erkenntnissen zum Langzeitverhalten der Mörtel sowie für die Optimierung der Mörtel für einen möglichen Einsatz auch im Außenbereich (Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Objekte) wurde ein Teil der Probekörper einer klimatischen Wechsellagerung (Standard Frost-Tauwechsel) unterzogen. Im Vorfeld formulierte Zielvorgaben für Materialkennwerte der Ergänzungsmörtel orientieren sich an durch SNETHLAGE (2003) formulierten Werten (Tab. 9).

Tab. 9 Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe zur Beurteilung der Anpassung der Eigenschaften an den Naturstein nach Snethlage (2003)

Eigenschaft	Symbol	Anforderung
Dynamischer E-Modul	E-dyn.	bis 80 %
Druckfestigkeit	β_D	bis 60 %
Feuchtedehn-koeffizient	α_{Hy}	50 – 100 %
Wärmedehn-koeffizient	α_T	50 – 150 %
Wasseraufnahme-koeffizient	w	50 – 100 %
Wasserdampf-diffusions-widerstandszahl	μ	50 – 100 %
Haftzugfestigkeit*	β_{HZ}	0,5…0,8 β_{HZ} Substrat
Die Anforderungen sind auf die Eigenschaften des Substrats bezogen. *Ein Versagen im Steinersatzstoff ist wünschenswert.		

6.1 Untersuchungen an Kohlesandstein

Im Vorfeld der Mörtelanpassung erfolgte die Bestimmung von Kohlesandsteinmaterialkennwerten. Neben der Bestimmung von Materialkennwerten des an der Mustersäule verbauten Kohlesandsteins wurde versucht, grundlegende Kennwerte (E-Modul und Wasseraufnahme) an möglichst verschiedenen Kohlesandsteinvarietäten zu ermitteln, um die Streubreite der Werte sowie den Einsatzbereich der Mörtel beurteilen zu können. Dafür wurde Ausbaumaterial aus dem Dom St. Marien, der Münze in Zwickau und dem Planitzer Schloss zur Verfügung gestellt. Es wurden Kohlesandsteinprobekörper (Prismen 20 x 20 x 40 mm und Scheiben 50 x 5 mm) von 6 farblich-strukturell unterschiedlichen Varietäten hergestellt (Abb. 19 und Abb. 20).

Abb. 19 Kohlesandsteinvarietäten, Scheiben 50 x 5 mm

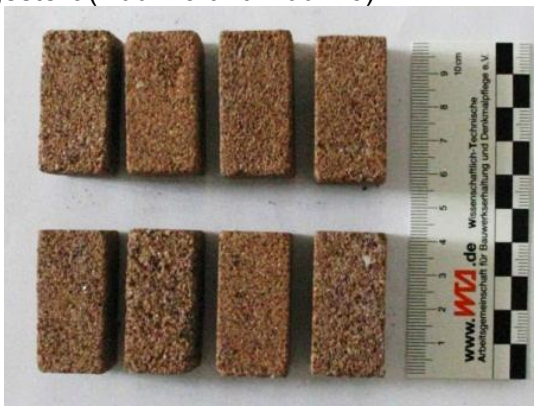


Abb. 20 Kohlesandsteinprismen der roten Varietät

Für die Bestimmung von Materialkennwerten an Kohlesandsteinausbaumaterial wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Dynamischer E-Modul an Prismen nach DIN EN 14146:2004
- Druckfestigkeit und Zugfestigkeit an Prismen DIN EN 1015-12 bzw. 1048-2
- kapillare Wasseraufnahme an Prismen in Anlehnung an DIN EN 1925
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ-Wert) an Scheiben mittels „wet-cup"-Verfahren in Anlehnung an DIN 52615
- Hydrische Dehnung an Prismen in Anlehnung an DIN 52 450

Zur Bestimmung der dynamischen E-Moduln wurden Kohlesandsteinprismen (20 x 20 x 40 mm) von 6 farblich-strukturell unterschiedlichen Varietäten hergestellt und an je 5 Probekörpern der dynamische E-Modul bestimmt. Die Tab. 10 zeigt die Ergebnisse der E-Modulmessungen. Alle Messungen erfolgten parallel zur Schichtung. Die gemessenen Werte werden für Sandsteine als gering eingestuft. Es werden Mittelwerte zwischen 7 und 14 kN/mm^2 ermittelt. Die höchsten Werte werden bei der sehr dichten, feinkörnigen roten Varietät 3 festgestellt. Das sehr porenreiche Material der grobkörnigen Varietät 6 zeigt die niedrigsten Messwerte. Die Varietät 2 zeigt einen Mittelwert von 10 kN/mm^2. Die Kohlesandsteinvarietät 2 ist vergleichbar mit dem Kohlesandstein der Mustersäule in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün. Die an diesem Sandstein ermittelten Materialkennwerte dienen als Grundlage für die Anpassung der Steinergänzungsmörtel.

Tab. 10 Dynamischer E-Modul bestimmt an Zwickauer Kohlesandstein-Prismen verschiedener Varietäten, Ausbaumaterial von verschiedenen Objekten in Zwickau, Anzahl der Messungen: 3-5, alle Probekörper parallel zur Schichtung geschnitten

Stein - Nr.	Dynam. E-Modul [kN/mm^2] Minimum	Dynam. E-Modul [kN/mm^2] Maximum	Dynam. E-Modul [kN/mm^2] Mittelwert
1 grob, rötlich	9,27	10,85	9,99
2 mittel, braun	8,85	10,66	10,13
3 fein, rot	13,69	13,98	13,81
4 mittel, braun	13,55	9,68	12,15
5 mittel, grau	8,37	9,40	9,0
6 grob, bunt	5,87	7,69	6,61

Druckfestigkeiten wurden an Kohlesandsteinprismen (20 x 20 x 40 mm) der roten Varietät 2 parallel und senkrecht zur Schichtung bestimmt. Parallel zur Schichtung werden Werte zwischen 10,84 und 12,34 (Mittelwert = 11,7) N/mm^2, senkrecht zur Schichtung Werte zwischen 10,38 und 12,18 (Mittelwert = 11,3) N/mm^2 ermittelt. Die Werte werden als gering eingestuft, parallel und senkrecht zur Schichtung werden keine großen Abweichungen beobachtet. Hier wurde ein deutlicherer Unterschied mit geringeren Werten parallel zur Schichtung erwartet. Zugfestigkeitsuntersuchungen an Prismen der roten Varietät 2 wurden durchgeführt. Parallel zur Schichtung werden Werte zwischen 0,3 bis 0,5 (Mittelwert = 0,4) N/mm^2 gemessen, senkrecht zur Schichtung 0,09 bis 0,31 (Mittelwert = 0,13) N/mm^2. Die Zugbelastung senkrecht zur Schichtung ist erwartungsgemäß bedeutend geringer, da hier Gefügeinhomogenitäten in Form von Hämatitlagen sowie parallel zu den Schichtflächen eingeregelte Hellglimmerlagen der Haftverbund im Sandsteingefüge unterbrechen. Diese Lagen fungieren praktisch als eine Art Sollbruchstelle und setzen senkrecht zur Schichtung die Zugfestigkeit erheblich herab. Das Auftreten oder Nichtauftreten dieser Lagen führt zu der festgestellten großen Streubreite der Werte.

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte an Kohlesandsteinprismen (Abmessungen 20 x 20 x 40 mm) der Varietäten 2, 3, 4 und 5. Die ermittelten w-Werte (30 min in kg/m2·√h, Mittelwerte) liegen zwischen 2,2 und 3,1.
Für die Varietät 2 erfolgte die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (µ-Wert) an Scheiben (50 mm x 5 mm). Die gemessenen Werte liegen im Mittel bei µ = 35,1.
An Prismen der Varietät 2 wurde ebenfalls die hydrische Dehnung gemessen. Die Messung der Längenänderung erfolgte an Prismen parallel und senkrecht zur Schichtung, nach 24 Stunden und 7 Tagen Wasserlagerung. Nach 7 Tagen wurden die Proben zum Abschluss der Messung gewogen und die Gesamtwasseraufnahme in Ma.-% ermittelt. Nach 24 Stunden wird parallel zur Schichtung eine hydrische Dehnung von 0,832 mm/m (Mittelwert aus n = 5) und nach 7 Tagen ein Wert von 1,127 mm/m (Mittelwert) gemessen. Messungen senkrecht zur Schichtung zeigen 24-Stunden-Werte von 1,744 mm/m (Mittelwert aus n = 5) und 7-Tages-Werte von 2,338 mm/m. Nach 7 Tagen wurde ein Mittelwert (n = 10) der Wasseraufnahme von 7,50 Ma. % gemessen. Die gemessenen Werte können als hoch eingeschätzt werden. In SIEGESMUND & DÜRRAST (2011) werden für Sandsteine 24-h-Werte zwischen 0,09 und 2,9 mm/m angegeben. Bemerkenswert ist auch der hohe Anisotropiefaktor (> 2). Senkrecht zur Schichtung erfolgt eine mehr als doppelt so hohe hydrische Dehnung wie parallel zur Schichtung, was, wie die XRD-Analyse einer Probe bestätigt, auf die eingelagerten Glimmer und den relativ hohen Kaolinitgehalt zurückzuführen ist. Die experimentell ermittelten Materialkennwerte liegen im Bereich der von KUTSCHKE (1993) und KUTSCHKE et al. (1994) und RINNE et al. (1997) an einer grauen Varietät ermittelten Daten.

6.2 Untersuchungen an Steinergänzungsmörteln

6.2.1 Vorgehensweise

Für die Entwicklung und die Untersuchungen an Steinergänzungsmörteln wurden folgende Schwerpunkte festgelegt:

- 3 unterschiedliche Mörtelsysteme (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden)
- Untersuchungen der Materialkennwerte
- Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Mörtel durch Frost-Tau-Wechsel- Beanspruchung
- Anlegen von Musterflächen am Objekt und deren Bewertung

6.2.2 Untersuchungen an Mörtelprismen

- Herstellung von Probekörpern (20 x 20 x 40 mm) für die Bestimmung physiko-mechanischer Eigenschaften
- Ermittlung von dynamischen E-Moduln (in Anlehnung an DIN EN 14146:2004) und Druckfestigkeiten (in Anlehnung an DIN EN 196-1 und DIN 18555-3) an Prismen
- Standard- und Frost-Tau-Wechsellagerung der Probekörper
- Ermittlung von Druckfestigkeiten an Probe-körpern nach Frost-Tau-Wechselbelastung
- Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme

6.2.3 Untersuchungen an Scheiben

- Herstellung von Probekörpern (Scheiben 50 x 5 mm) für die Bestimmung des Haftverbundes zwischen Naturstein und Ergänzungsmörtel
- Beurteilung des Haftverbundes Naturstein-Ergänzungsmörtel mittels Haftzugfestigkeit an Scheiben (50 x 5 mm)
- Prüfung der Haftzugfestigkeit an Zweisteinproben ohne klimatische Wechselbelastung
- Standard- und Frost-Tau-Wechsellagerung der Probekörper
- Prüfung der Haftzugfestigkeit an Zweisteinproben nach klimatischer Wechselbelastung

6.2.4 Entwicklung eines Ergänzungsmörtels für Kohlesandstein, Ergebnisse

Sowohl der mineralische, als auch der acrylatgebundene Mörtel zeigten visuell eine gute Anpassung an den Kohlesandstein der Mustersäule. Der KSE-gebundene Mörtel mit fraktioniertem Kohlesandsteinzuschlag zeigt auch nach mehrmonatiger Lagerung keine befriedigende Kornbindung, eine stark absandende Oberfläche bis hin zum Zerfall des Probekörpers (Abb. 21). Die Probleme lassen sich mit dem hohen Kaolinitanteil im Kohlesandsteinzuschlag erklären, da KSE Haftungsprobleme an Kaolinit zeigt. Da Kaolinit ein Hauptbestandteil des Kohlesandsteins ist, wurde das Bindemittel daher nicht weiter untersucht. Ein Teil der hergestellten Probekörper wurde den oben beschriebenen Untersuchungen unterzogen. Ein weiterer Teil einer klimatischen Standardwechselbelastung (Frost-Tau-Wechsel, Tab. 11) unterzogen.

Tab. 11 Bewertung Temperaturprofil der Standard-Klimabelastung

Lfd.-Nr.	T_{Start} [C°]	T_{Ziel} [C°]	Dauer [min]
1	+20	-20	120
2	-20	-20	120
3	-20	+60	240
4	+60	+60	120
5	+60	+20	120

Abb. 21 KSE-gebundener Mörtel, Zerfall der Prismen nach Ausschalung

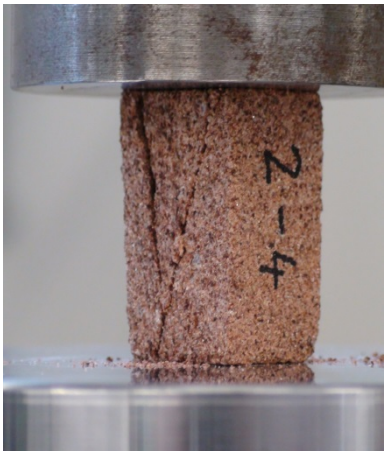


Abb. 22 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Druckfestigkeit an Kohlesandsteinbeispiel, Foto Butler

Die Bestimmung der dynamischen E-Moduln und der Druckfestigkeit nach > 28 Tagen erfolgten an Mörtelprismen (20 x 20 x 40 mm) (Tab. 12). Druckfestigkeitsmessungen erfolgten ebenfalls nach einer klimatischen Wechselbelastung. Die Ergebnisse zeigt Tab. 12.

Tab. 12 Dynamischer E-Modul und Druckfestigkeit (Mittelwertangabe in Klammern)

Probe	E-Modul, dynamisch [kN/mm²]	Druckfestigkeit [N/mm²]
mineralisch ohne kl. W.-Belastung	8,2 bis 8,9 (8,6)	7,1 bis 8,9 (8,0)
mineralisch mit kl. W.-Belastung	-	5,2 bis 7,1 (6,0)
acrylatgebunden ohne kl. W.-Belastung	7,7 bis 9,5 (8,9)	8,1 bis 9,0 (8,5)
acrylatgebunden mit kl. W.-Belastung	-	8,2 bis 9,5 (8,7)

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeiten erfolgte an Stein-Mörtel-Stein-Probekörpern. Dazu wurde eine 5 mm starke Mörtelfuge zwischen zwei Kohlesandsteinscheiben mit den Abmessungen 50 x 5 mm der Varietät 2 eingebracht (Abb. 21). Nach > 28 Tagen wurden die Probezylinder in Anlehnung an DIN EN 1015-12 bzw. DIN 1048-2 geprüft. Ein Teil der Probekörper wurde einer klimatischen Wechselbelastung unterzogen und ebenfalls geprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Tab. 13 und in Abb. 24 vorgestellt.

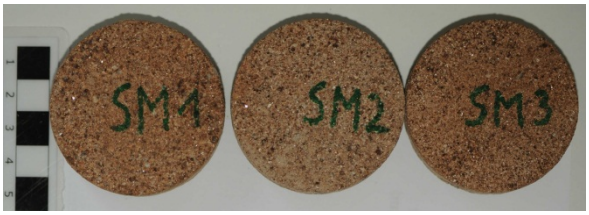


Abb. 23 Zweisteinproben für Haftzugmessungen mit mineralischer Fuge, Aufsicht

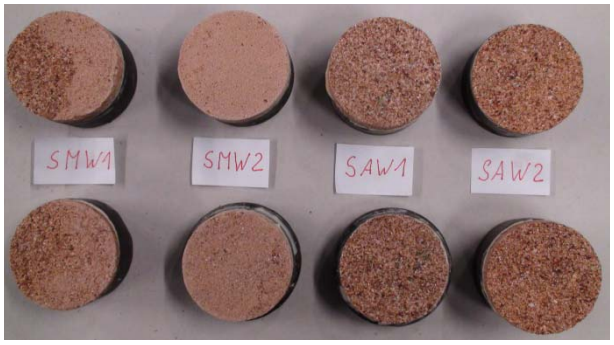


Abb. 24 Bruchflächen der Haftzugproben nach der Prüfung, SMW = mineralische Mörtel, SAW = Acrylatmörtel

Tab. 13 Haftzugfestigkeiten der Stein-Mörtel-Stein-Proben

Probe	Haftzug N/mm² (MW)*	Bruchbild %Stein I %Mörtel
mineralisch ohne kl. W.-Belastung	0,55 bis 0,69 (0,6)	2 x 100% Stein 1 x Verbundfuge Stein / Mörtel
mineralisch nach kl. W.-Belastung	0,35 bis 0,44 (0,40)	1 x 50% Mörtel 1 x 100%Mörtel Mörtelbruch in Verbundfuge Stein / Mörtel
acrylatgebunden ohne kl. W.-Belastung	0,26 bis 0,43 (0,35)	2 x 100% Stein 1 x 40 I 60
acrylatgebunden nach kl. W.-Belastung	0,37 bis 0,50 (0,44)	2 x 100% Stein 1 x 40 I 60

*MW = Mittelwertangabe in Klammern

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte an Mörtelprismen (Abmessungen 20 x 20 x 40 mm). Die ermittelten w-Werte (30 min in kg/m^2·√h) liegen beim mineralischen Mörtel bei 2,5 und beim acrylatgebundenen Mörtel bei 1,1. Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ-Wert) erfolgte an Mörtelscheiben (50 x 5 mm). Die gemessenen Werte liegen beim mineralischen Mörtel bei μ = 29,5 und beim acrylatgebundenen Mörtel bei μ = 26,54.

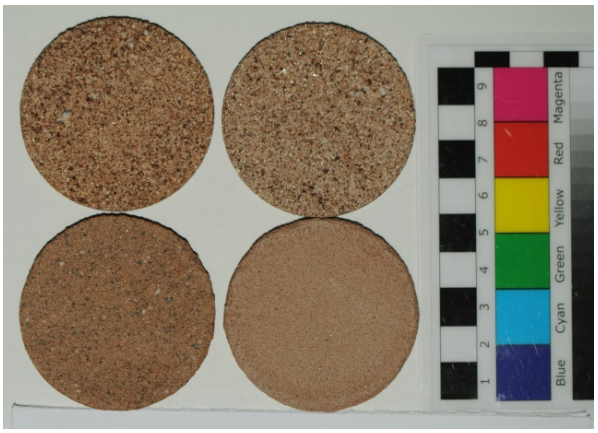


Abb. 25 Steinergänzungsmörtel (unten) im Vergleich zum Kohlesandstein (oben): Acrylatmörtel (links) und mineralischer Mörtel (rechts)

Bezogen auf den Sandstein sollte der E-Modul der Steinergänzungsmörtel nach SNETHLAGE (2003) im Bereich 60 bis 80 % liegen. Beide Mörtel liegen mit 85 % (mineralischer Mörtel) und 88 % (Acrylatmörtel) geringfügig über dem maximalen Anforderungswert von 80 %.

Die Druckfestigkeiten sollten im Bereich bis 60 % der des Sandsteins, bezogen auf die parallel und senkrecht zur Schichtung gemessenen Werte, liegen. Nach > 28 Tagen liegen die Werte (mineralischer Mörtel mit 70 % und Acrylatmörtel mit 74 %) etwas über dem maximalen Anforderungswert. Nach klimatischer Wechselbelastung erfüllt der mineralische Mörtel mit 52 % diese Vorgabe. Die Festigkeit des Acrylatmörtels steigt leicht auf 76 % an.

Die Haftzugfestigkeiten der Stein-Mörtel-Stein-Probekörper sollten 50 bis 80 % des Sandsteins betragen. Bezogen auf die parallel zur Schichtung gemessenen Werte für den Kohlesandstein liegen die Werte der mineralischen Mörtel nach > 28 Tagen bei 171 %, die der Acrylatmörtelproben bei 100 %. Nach der Bewitterung fällt der Mittelwert für den mineralischen Mörtel auf 113 %, der für den Acrylatmörtel steigt dagegen auf 124 % an. Bei den mineralischen Verbundprobekörpern liegt der Bruch immer in Verbundfuge Stein / Mörtel. Hingegen zeigt der Acrylatmörtel erwartungsgemäß höhere Zugfestigkeiten als der Stein, die immer zu einem Bruch im Stein führen.

Die w-Werte der Mörtel sollten 50-100 % bezogen auf den Sandstein betragen. Der mineralische Mörtel erfüllt diesen Wert mit 83 %, während deracrylatgebundene Mörtel mit 37 % unterhalb der 50 %-Anforderung bleibt. Bei einer Hinterfeuchtung, die im Innenraum der Kirche in Ruppertsgrün nicht zu erwarten ist, kann es zur Behinderung der Trocknung und damit zu Auswirkungen auf die Frostbeständigkeit kommen.

Die µ-Werte der Mörtel sollten 50-100 % bezogen auf den Sandstein betragen. Beide Mörtel erfüllen diese Vorgaben. Der mineralische Mörtel zeigt Mittelwerte von 84 %, der Acrylatmörtel Werte von 76 %.

Die Anforderungen an Steinergänzungsmörtel nach Vorgaben von SNETHLAGE (2003) dienen der Orientierung und sind keine Ausschlusskriterien. Beide Mörtel sind für eine Anwendung an der Kohlesandsteinsäule geeignet, zeigen jedoch, wie oben beschrieben, Stärken und Schwächen. Der Acrylatmörtel zeigt farblich eine noch bessere Anpassung an den Kohlesandstein. Um den hohen Haftzugfestigkeiten des Acrylatmörtels entgegen-zuwirken, kann ein zweilagiger Aufbau mineralisch-acrylatgebunden empfohlen werden.

7 Zusammenfassung

Die Kohlesandsteinsäulen in der St. Annenkirche in Ruppertsgrün zeigten erhebliche Schäden durch Abschalen und Absanden oberflächennaher Bereiche. Im Rahmen der beispielhaften Konservierung einer Kohlesandstein-Mustersäule wurden Voruntersuchungen zu den Ursachen der Schäden durchgeführt und Empfehlungen zum restauratorischen Vorgehen erarbeitet sowie restauratorische Maßnahmen analytisch begleitet. Im Vorfeld von Konsolidierungsversuchen mit verschiedenen Festigern auf KSE-Basis an Musterflächen an salzreduzierten und salzbelasteten Kohlesandsteinoberflächen wurden Salzminderungsmaßnahmen durchgeführt und bewertet. Es kann festgestellt werden, dass die Kristallisation der Salze im Porenraum des Kohlesandsteins einen deutlichen Einfluss auf das Eindringverhalten des Festigers und damit auf die Festigerwahl haben. Der wirkstoffärmere Steinfestiger KSE 100 erzielt an salzbelasteten die besten Ergebnisse, während in salzreduzierten Bereichen der Mustersäule (Säule 02) der Einsatz von KSE 300 über die gesamte Bohrtiefe eine deutliche Festigung der Sandsteinsubstanz erzielen konnte.

Für Ergänzungen an den Kohlesandsteinsäulen wurden vergleichend auf Basis drei verschiedener Bindemittel (mineralisch, acrylatgebunden und KSE-gebunden) Steinergänzungsmörtel hergestellt. Die Mörtel wurden farblich-strukturell und in ihren Materialkennwerten an den Kohlesandstein der Mustersäule angepasst und die Materialkennwerte untersucht. Sowohl der mineralische, als auch der acrylatgebundene Mörtel erfüllen die Vorgaben nach SNETHLAGE (2003) und wurden farblich-strukturell sehr gut angepasst. Besonders gut passte der Acrylatmörtel farblich zum vorgegebenen Kohlesandstein. Bei größeren Antragungen wird empfohlen, auf Grund längerer Aushärtezeiten stärkeren Acrylatmörtelschichten und der hohen Haftzugfestigkeiten, den mineralischen Mörtel vorzulegen und danach mit dem Acrylatmörtel aufzubauen. Auch die Anlage der Musterflächen und Ausführung der Ergänzungen an der Mustersäule durch den Restaurator, Herrn Andreas Muth (siehe MUTH, 2014), zeigen visuell sehr gute Ergebnisse.

Die Kohlesandsteinelemente in der St. Annenkirche waren in der Vergangenheit farblich gefasst (siehe NIMOTH, 2014). Die Fassung bietet einen ersten Schutz vor eindringender Feuchte und dient als eine Opferschicht bei Salzaktivitäten. Eine Fassung der Säulen wird daher empfohlen.

Der Zusammenhang zwischen Raumklima und Schädigung der Säulenoberflächen konnte in Verbindung mit Klimamessungen belegt werden.

Durch Neuinstallation und Neuanordnung der Wärmeabgabeflächen im Kirchenraum und die Installation der sensorgesteuerten Raumlüftung kann ein ausgeglichener raumklimatischer Zustand gehalten werden, der ein weiteres zyklisches Zerstören der originalen Oberflächen behindert (siehe LÖTHER, 2014).

8 Literaturverzeichnis

BEEGER, Beiträge zur Verwendung, Verwitterung und Konservierung von Gesteinen in Architektur und Plastik der DDR, Geologie und Denkmalpflege Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden 35 (1988) 137 S.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (2000) DIN EN 14146:2004-06 (D) Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls (durch Messung der Resonanzfrequenz der Grundschwingung); Deutsche Fassung EN 14146:2004, Beuth Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (2000) DIN EN 1015-12, Juni 2000. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 12: Bestimmung der Haftfestigkeit von erhärteten Putzmörteln; Deutsche Fassung EN 1015-12:2000, Beuth Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (1991) Prüfverfahren für Beton; Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Beuth Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (1991) Prüfverfahren von Naturstein - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung; Deutsche Fassung EN 1925:1999, Beuth Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (1987) DIN 52615:1987-11: Wärmeschutztechnische Prüfungen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Beuth Verlag

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: (1985) DIN 52450:1985-08: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern, Beuth Verlag

GÜHNE, D. (2013) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Schadenskartierung an der Mustersäule, unveröffentl.

GÜHNE, D., ZÖTZL, M. (2011) Zwickau, Gewandhaus, Schadenskartierung. IDK-Bericht DD 97/2011, unveröffentl, 11 S.

KULLE, Ch., GORETZKI, L., KRAUS, K. (2012) Steinergänzungsmörtel im Vergleich. Bausubstanz, Jg. 3 (2012), Heft 2, S. 52-57

KUTSCHKE, D., MENZEL, U. & GRUNERT, S. (1994) Petrographische und gesteinstechnische Eigenschaften des Zwickauer Sandsteins. Schriftenreine des Instituts für Tragwerke und Baustoffe. TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, S. 80-89

KUTSCHKE, D. (1993): Untersuchungen zu Petrographie, Salzbelastung und historischen Steinergänzungsstoffen am Mariendom in Zwickau. Unv. Arbeitsbericht TU Dresden, Institut für Geotechnik.

LAUE, S., PFEFFERKORN, ST., (2003) Untersuchungen zum Verwitterungszustand des Natursteinmaterials am Chor der Frauenkirche in Grimma und Empfehlungen zur Konservierung,unveröffentl. IDK-Bericht DD 10/2003

LÖTHER, Th. (2014) DD 58/2014 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, raumklimatische Untersuchungen - unveröffentlicht

LÖTHER, Th. (2009) DD 95/2010 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Raumklimauntersuchung – 1. Zwischenbericht– unveröffentlicht

LÖTHER, Th. (2011) DD 27/2011 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Raumklimauntersuchung – Abschlussbericht – unveröffentlicht

LÖTHER, Th. (2012) DD 84/2012 - Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Empfehlungen zur baulichen Umsetzung einer sensorgesteuerte Raumlüftung – unveröffentlicht

MUTH, A. (2014) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Restauratorische Bearbeitung der Mustersäule. Arbeitsbericht – unveröffentlicht

NEUMANN, H. H. (1994) Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie die zusammenhängenden Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. Dissertation. Universität Hamburg. 178 S.

NIMOTH, T. (2014) dieser Band

PFEFFERKORN, ST. (1998): Auswertung von Untersuchungen mit dem Bohrhärte-Prüfgerät an Gesteinen mit makroskopisch inhomogenem Gefüge - Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung Band 6, 1994-1996, S. 105-112.

PFEFFERKORN, ST. (1998): Untersuchungen zur Abschätzung des Einflusses des Bohrerverschleißes auf das Ergebnis von Bohrwiderstandsmessungen. - Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzung, 4. Jahrgang, S. 467-478

RINNE, A., MARZAGANOV, R. & ROSTASY, F.S. (1997) Forschung über Baudenkmalpflege. Arbeitsberichte, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, IBMB, TU Braunschweig, MPA Braunschweig, 137 S.

SIEGESMUND, S. & DÜRRAST, H. (2011) Mechanical and physical properties of rocks, 2011. In: S. Siegesmund & R. Snethlage. Stone in Architecture. 97-225. DOI 10.1007/ß78-3-642-14475-2_3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

SIEDEL, H. (2014) Zwickauer Kohlesandstein - Geologie und Petrographie, historische Gewinnung und Verwendung, technische Eigenschaften und Verwitterungsverhalten. In dieser Publikation

SNETHLAGE, R. (2003) Qualitätsprüfung von Steinersatzstoffen im Zusammenhang mit Konservierungsmaßnahmen in Petra. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege

SNETHLAGE, R. (2011) Genese und Eigenschaften von Gesteinen. In: Auras, M., Meinhardt, J., Snethlage, R.: Leitfaden Naturstein-Monitoring. Fraunhofer IRB-Verlag. 301 S.

WTA-Merkblatt "Feuchtemessung" (1999): WTA-Merkblatt 4-11-02/D: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

WTA-MERKBLATT „Kompressenentsalzung“ (2001): WTA-Merkblatt E 3-13-01/D: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

WTA-Merkblatt "Natursteinrestaurierung" (1997): WTA-Merkblatt 3-11-97: Steinergänzung mit Restauriermörteln und Steinersatzstoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

ZÖTZL, M. & LÖTHER, Th. (2011) Ruppertsgrün, Kirche St. Annen, Untersuchungen zur Salzbelastung an Kohlesandsteinsäulen. IDK-Bericht DD23/2011, unveröffentl., 10 S.

ZÖTZL, M. & GÜHNE, D. (2011) Zwickau, Gewandhaus, Feuchte-, Salz- und Mörtel-untersuchungen. IDK-Bericht DD88/2011, unveröffentl., 30 S.

ZÖTZL, M. & GÜHNE, D. (2011) Zwickau, Katharinenkirche, Feuchte- und Salzuntersuchungen. IDK-Bericht DD95/2011, unveröffentl., 10 S.

ZÖTZL, M. & GÜHNE, D. (2012) Zwickau, Gewandhaus, Untersuchungen zur Salzminderung und Festigung von Kohlesandsteinoberflächen. IDK-Bericht DD 98/2012, unveröffentl., 19 S.

ZÖTZL, M. (2012) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Mustersäule, Kohlesandsteinmustersäule, Feuchte- und Salzvoruntersuchungen. IDK-Bericht DD97/2012. unveröffentl., 17 S.

ZÖTZL, M. (2012) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Mustersäule, Entwicklung von Kohlesand-stein-Ergänzungsmaterial. IDK-Bericht DD97/2012. unveröffentl., 10 S.

ZÖTZL, M. (2013) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Festigungsversuche an salzbelasteten Kohlesandsteinmusterflächen, Voruntersuchungen. IDK-Bericht DD44/2013. unveröffentl., 7 S.

ZÖTZL, M. (2013) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Begleitende Untersuchungen der Salzminderungsmaßnahme an der Mustersäule. IDK-Bericht DD77/2013. unveröffentl., 11 S.

ZÖTZL, M. & GÜHNE, D. (2013) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Bohrwiderstandsmessungen zur Bewertung der Festigungsversuche an Kohlesandsteinmusterflächen. IDK-Bericht DD86/2013. unveröffentl., 18 S.

ZÖTZL, M. (2014) Ruppertsgrün, St. Annenkirche, Analytische Begleitung der Begleitende Untersuchungen der Salzminderung. IDK-Bericht DD20/2014. unveröffentl., 5 S.

INGENIEURBÜRO NIEHSEN-BAUMANN
INHABER: DIPL.-ING. LUTZ BAUMANN VDI
INGENIEURBÜRO FÜR TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG
HEIZUNGS - LÜFTUNGS - KLIMA - SANITÄR - ELEKTRO - ANLAGEN
WIESENUFER 7 · 09123 CHEMNITZ · TEL.: 03 72 09 / 8 04 01 · FAX: 03 72 09 / 8 04 02 · INFO@NIEHSEN-BAUMANN.DE · WWW.NIEHSEN-BAUMANN.DE

B E R I C H T

ÜBER DIE

FACHPLANUNG ZUR OPTIMIERUNG DES RAUMKLIMAS

11.04.2014

St.-Annen-Kirche
Ruppertsgrün b. Zwickau

St.-Annen-Kirche Ruppertsgrün b. Zwickau

Art der Unterlage / Inhalt	:	BERICHT ÜBER DIE FACHPLANUNG ZUR OPTIMIERUNG DES RAUMKLIMAS
Bauherr / Auftraggeber	:	Ev.-Luth. Kirchgemeinde Ruppertsgrün St.-Annen-Str. 5 08427 Fraureuth
Projektsteuerer / Raumklimamessungen	:	Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt Schloßplatz 1 01067 Dresden
Architekt / Objektplaner	:	Neubauer & Eismann GbR Bosestr. 9 08056 Zwickau
Auftragnehmer / Fachplanung Temperierung und Lüftung	:	Ing.-Büro Niehsen-Baumann Inhaber: Dipl.-Ing. Lutz Baumann VDI Wiesenufer 7 09123 Chemnitz OT Einsiedel
Projekt-Nr.	:	574 / 12470
Bearbeitungsstand	:	11.04.2014
Verteiler	:	1x Auftraggeber (als PDF) 1x Projektsteuerer (als PDF) 1x Auftragnehmer (gedruckt)

Hinweis: Nachstehende Ausarbeitung soll als Entscheidungshilfe dem Auftraggeber und den fachlich Beteiligten (siehe Verteiler) dienen. Sie ist nicht zur Weitergabe an Dritte vorgesehen. Ist eine Weitergabe oder Vervielfältigung erwünscht, ist dies mit uns abzustimmen.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Ausgangssituation 4

2. Fachplanung zur präventiven Konservierung durch modellhafte Optimierung des Raumklimas 5

2.1. Grundlagen 5

2.2. Wärmeerzeugung und Regelung 6

2.3. Wärmeverteilung 8

2.4. Lüftung und Regelung 10

2.5. Kombinierte Regelung für Temperieren und Lüften 12

3. Erfolgskontrolle 14

4. Zusammenfassung 15

1. Ausgangssituation

Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen im Innenraum der Kirche soll auch die alte Heizung durch eine moderne Anlage ersetzt werden.

Die Besonderheit der Aufgabenstellung bestand darin, nicht nur eine Kirchenheizung zu konzipieren, sondern eine Temperieranlage zu bauen, die in Zukunft keinen schädigenden Einfluss auf die Sandsteinsäulen hat. Da mit einer Temperieranlage dies nur eingeschränkt möglich ist, wurde die Temperierung durch eine kontrollierte Fensterlüftungsanlage ergänzt.

Früher wurde die Kirche mittels Gas-Außenwandheizern erwärmt. Diese waren nicht nur ungleichmäßig verteilt, sondern sie führten auch zu sehr ungleichmäßigen Raumtemperaturen. Während in unmittelbarer Nähe der Gasheizer die Temperatur sehr hoch war, gab es Bereiche in der Kirche, wo es kalt blieb.

Bild 1: Frontalansicht Gas-Außenwand-Heizer

Bild 2: Seitenansicht Gas-Außenwand-Heizer

2. Fachplanung zur präventiven Konservierung durch modellhafte Optimierung des Raumklimas

2.1. Grundlagen

Voraussetzung für die Erarbeitung einer technischen Lösung ist die Kenntnis des Wärmeenergiebedarfes. Die Ermittlung des Wärmeenergiebedarfes erfolgt unter Verwendung von „Kirchenheizungsformeln“, die den instationären Betrieb, d. h. das periodische Heizen, hinreichend berücksichtigen. Hierfür stehen verschiedene Rechenverfahren zur Verfügung.

Wichtig für die Berechnung ist neben der Raumtemperatur die Grundtemperatur, da diese den Wärmeenergiebedarf für das Aufheizen für die Nutzung wesentlich beeinflusst. Die Grundtemperatur richtet sich sowohl nach der Nutzung als auch nach der schützenswerten Ausstattung.

In der Literatur gibt es sehr unterschiedliche Angaben für die mittlere Raumtemperatur in Kirchräumen. Als in den meisten Fällen ausreichend hat sich in den Wintermonaten ein Bereich von 12 - 15 °C bewährt.

Bei der Festlegung der Raumtemperatur ist außerdem zwischen den Winter- und den Sommermonaten zu unterscheiden. Im Sommer kommen die Kirchenbesucher in luftigerer Kleidung, sodass aus diesem Grund, aber auch aus bauphysikalischen Gründen, höhere Temperaturen anzustreben sind. Im Winter hingegen sind die Besucher warm angezogen, sodass ohne weiteres relativ niedrige Raumtemperaturen akzeptabel sein sollten.

Es wurde eingeschätzt, dass die mittlere Raumtemperatur auf maximal 15 °C bei extrem kalter Witterung begrenzt werden sollte.

Die Ermittlung des Wärmeenergiebedarfes erfolgte für das Kirchenschiff nach verschiedenen Rechenverfahren.

Je nach Berechnungsverfahren und nach technischer Lösung ergaben sich Werte zwischen 24 und 35 kW.

Bild 3: Berechnungsergebnisse Wärmeenergiebedarf

WÄRMEBEDARFSBERECHNUNG FÜR KIRCHEN

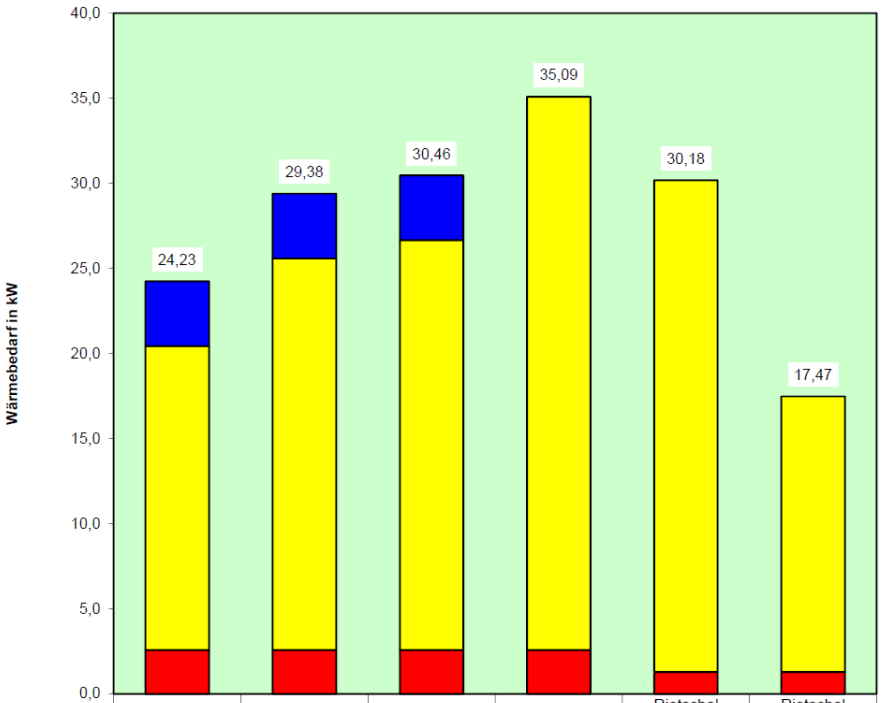
ERGEBNISSE NACH VERSCHIEDENEN RECHENVERFAHREN

Kirche: **St.-Annen-Kirche Ruppertsgrün** Datum: 28.08.2012

AUSGANGSWERTE

t_i = 15 °C
t_a = -14 °C
t_0 = 5 °C
Δt = 1 K/h

BERECHNUNGSERGEBNISSE



	IBNB mFBH	IBNB oFBH	Krischer/Kast	Gröber/Sieler	Rietschel (ungleichm.)	Rietschel (gleichm.)
QL in kW	3,81	3,81	3,81			
QW in kW	17,85	23,00	24,08	32,51	28,90	16,18
QF in kW	2,57	2,57	2,57	2,57	1,29	1,29
Qges in kW	24,23	29,38	30,46	35,09	30,18	17,47

2.2. Wärmeerzeugung und Regelung

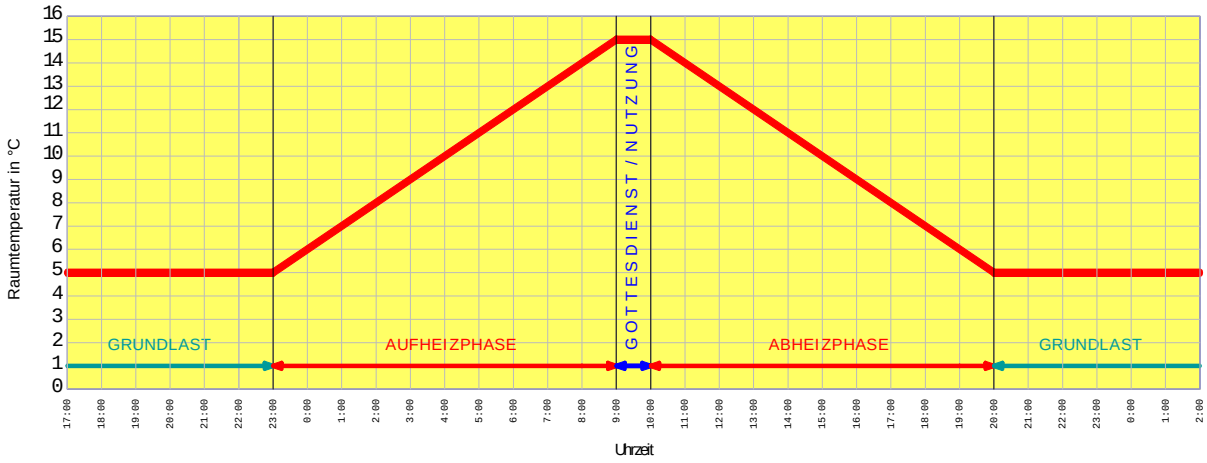
Die zukünftige Wärmeversorgung richtet sich nach der Verfügbarkeit der Energieträger, den Investitions- und Betriebskosten und der Gleichzeitigkeit der Nutzung der einzelnen beheizbaren Bereiche davon.

Da es bereits einen vorhandenen Hausanschluss für Erdgas gab und die baulichen Bedingungen Alternativen mit regenerativen Energien nicht zuließen, wurde die neue Heizungsanlage ebenfalls für Erdgas konzipiert.

Die Regelung der Kirchenheizung wurde wie folgt realisiert: Eine mikroprozessorgesteuerte Regelung sorgt für eine schonende Aufheiz- und Abkühlphase, d. h. Aufheizen und Abkühlen mit der Heizungsanlage erfolgt in kleinen Schritten, nutzerseitig wählbar und einstellbar, z. B. zwischen 0,5 und 1,5 K/h. Vom BUND DEUTSCHER ORGELBAUMEISTER wird eine solche Regelung gewünscht.

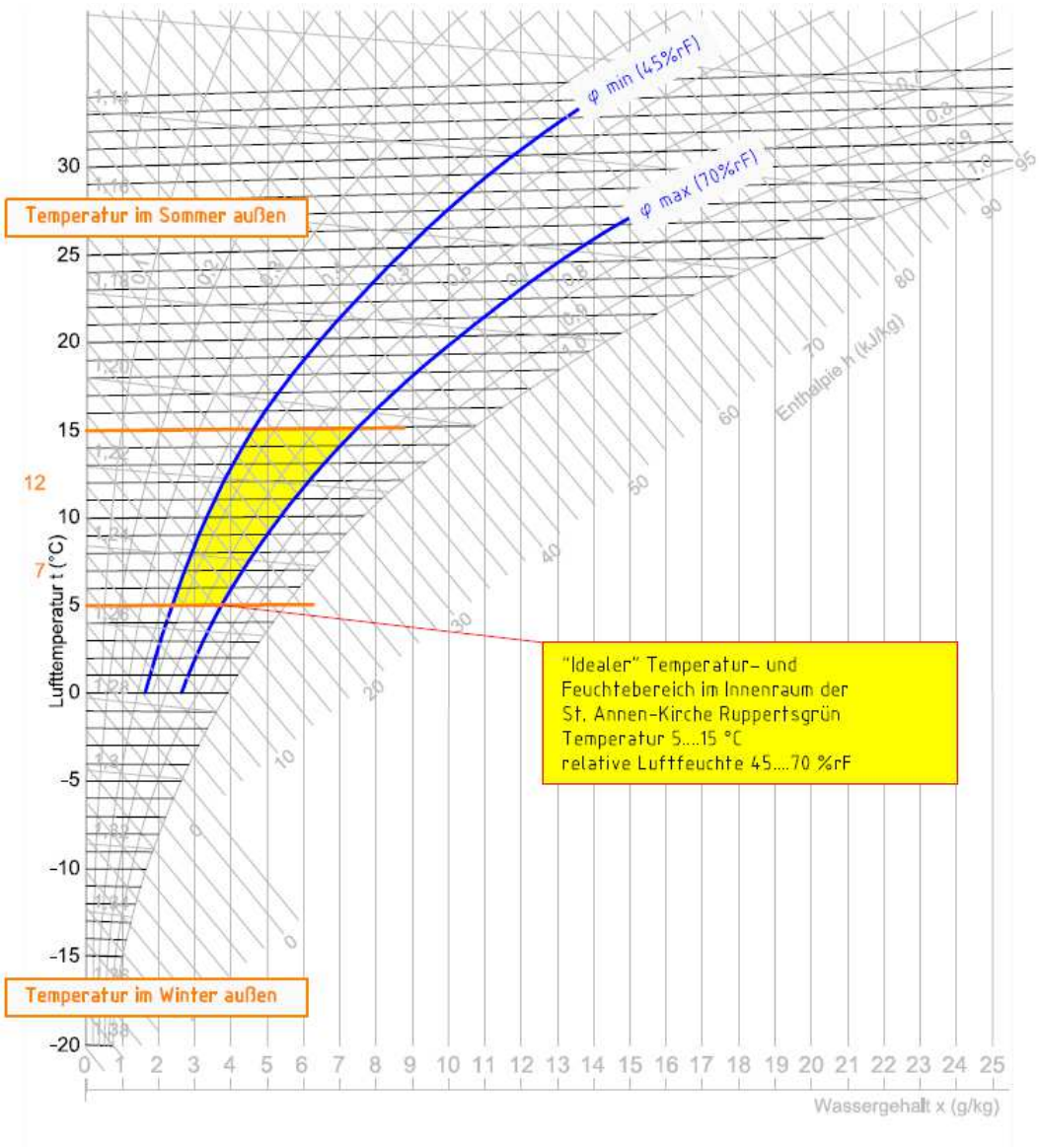
Die Regelanlage erfasst ständig die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchte und errechnet selbstständig den Beginn der Aufheizphase, sodass zum programmierten Zeitpunkt die gewünschte Raumtemperatur erreicht wird. Sie erlaubt eine individuelle Sollwertprogrammierung für den Tagbetrieb an verschiedenen Tagen zu vorgegebenen Zeiten wie auch den Absenkbetrieb für die restliche Zeit mit einer konstanten Grundtemperatur.

Bild 4: Optimale Temperaturänderung nach vorstehender Beschreibung mit Aufheiz- und Abheizvorgang (hier von 5 auf 15 °C)



Die Regelanlage berücksichtigt auch die Raumluftfeuchte und zwar vorrangig. Dies erfolgt mittels Feuchtefühlern. Damit wird die gewählte und eingestellte Temperatur übergeordnet beeinflusst, d. h. bei abnehmender relativer Feuchte (z. B. $\varphi < 50$ %) wird die angestrebte Raumtemperatur reduziert. Bei einem Feuchteanstieg z. B. über 70 % ist ein geringeres Höherheizen möglich. Diese Regelvorgänge erfolgen vollautomatisch ohne Beeinflussung des Betreibers. Diese Regelung hat zur Folge, dass es unter bestimmten Bedingungen (vor allem bei extrem kalter Witterung) möglich ist, dass die gewünschte Raumtemperatur nicht erreicht wird. Im Sinne der Erhaltung der Ausstattung und der Orgel muss dies akzeptiert werden.

Bild 5: h,x-Diagramm für die St.-Annen-Kirche



2.3. Wärmeverteilung

Wichtig für eine gleichmäßige Wärmeverteilung sind die Art und Anordnung der Wärmequellen.

Ungünstig sind punktuelle Heizflächen und Heizflächen mit hohen Oberflächentemperaturen. Durch diese entsteht eine große Thermik, die nicht nur hohe - und damit unangenehme - Luftbewegungen verursacht, sondern auch einen höheren Energieverbrauch nach sich zieht.

Im Zusammenhang mit der Nutzung muss der Kaltluftabfall der Fenster beachtet werden. Dieser ist je nach Qualität des Fensters nicht unerheblich und kann zu Unbehaglichkeit bei den Besuchern führen.

Nicht unerheblichen Einfluss auf die Auswahl und Anordnung von Wärmequellen haben bauphysikalische Aspekte. Erfahrungsgemäß sind die Sockelbereiche die kältesten und feuchtesten Stellen in einer Kirche, sodass gerade diesen Bereichen erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken ist.

Bild 6: Wärmequellen im Altargeschoss

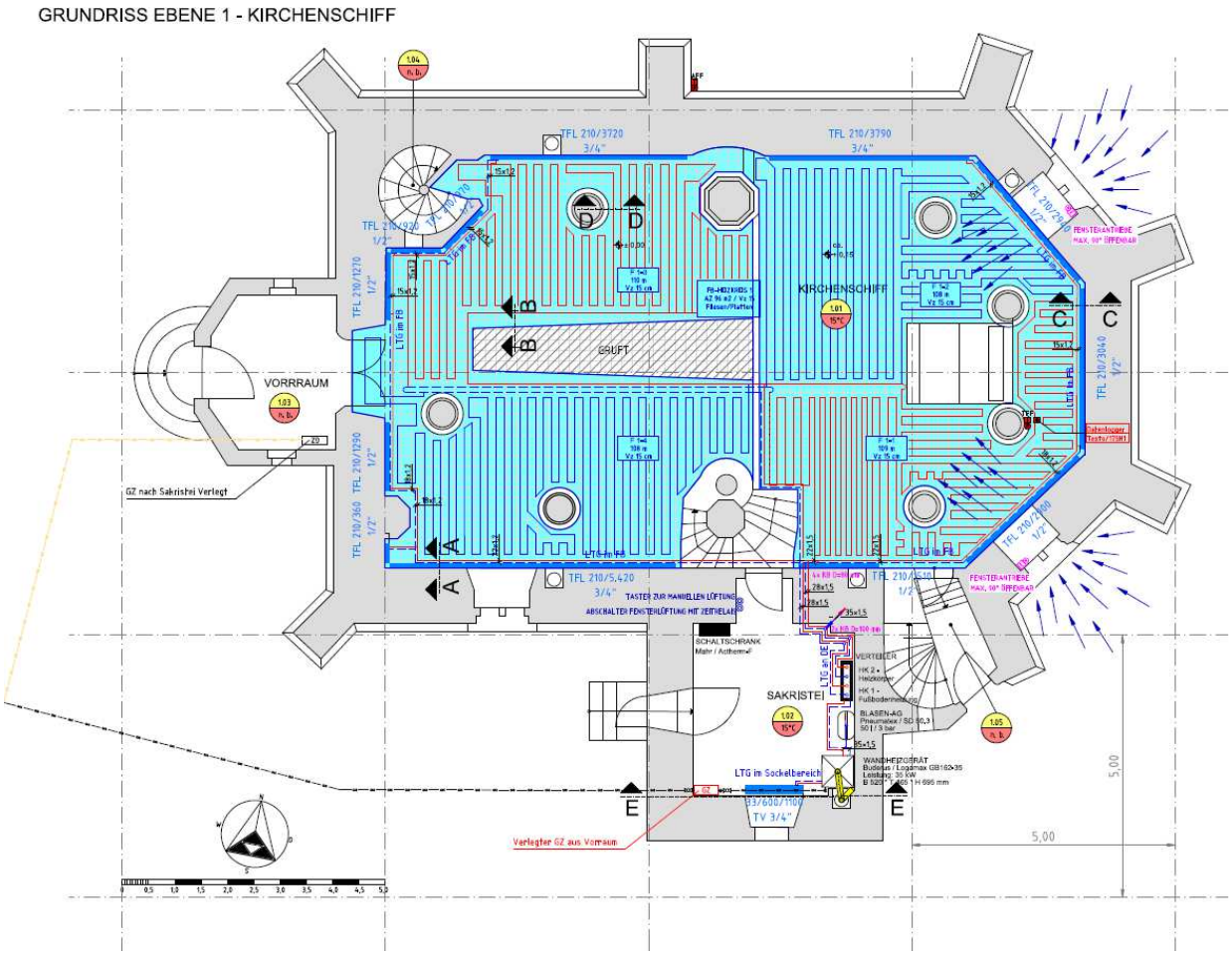


Bild 7: Fußbodentemperierung mit Tichelmann-Verlegung

Bild 8: Aussparung der Fußbodentemperierung bei der Gruft

Zur Verminderung der Energiezufuhr, Absenkung der Wärmeleistung und Erhöhung der Behaglichkeit im Altargeschoss wurde eine Fußbodentemperierung eingebaut. Diese musste um eine Gruft herum gebaut werden.

Im Sockelbereich entlang der Außenwände wurden Thermofußleisten montiert. Diese wirken nicht nur dem Kaltluftabfall an Wänden und Fenstern entgegen, sondern führen auch zu einer Temperaturerhöhung der Außenwände. Dies ist bauphysikalisch günstig und wirkt sich außerdem positiv auf die Behaglichkeit der sich in den jeweiligen Räumen aufhaltenden Personen aus.

Bild 9: Thermofußleisten im Sockelbereich im Altarraum

Bild 10: Temperierung Emporenbereich

Mittels Rohrheizkörpern werden die Wandbereiche der Emporen temperiert. Außerdem wird auch hier dem Kaltluftabfall an Wänden und Fenstern entgegen gewirkt.

Die Verlegung der Rohrleitungen erfolgte in Kanälen, im Sockelbereich, in Podesten und an geeigneten anderen, weitgehend unsichtbaren Stellen bzw. unter Putz.

2.4. Lüftung und Regelung

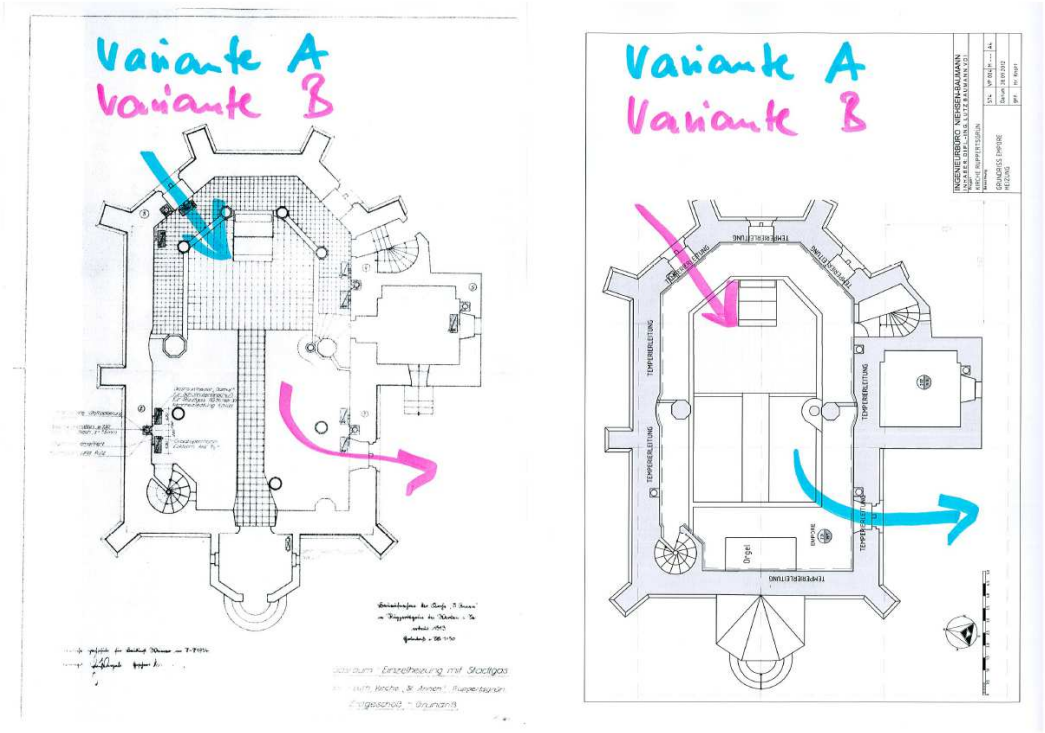
Eine Kirche ist wie jedes andere Gebäude regelmäßig zu lüften. Wichtig ist, dass die Lüftung vorzugsweise nur dann erfolgt, wenn dies günstig für das Bauwerk und die Ausstattung ist. Es gibt Situationen, in denen es sinnvoll ist, feuchte Luft in die Kirche zu lenken. Ebenso gibt es aber auch Zeiten, in denen es sinnvoll ist, trockene Luft in die Kirche zu leiten.

Während „kalt“ und „warm“ von Menschen relativ gut zu beurteilen und deshalb bekannt ist, wann geheizt werden müsste, ist es wesentlich schwieriger, die Luftfeuchte zu „empfinden“ und zu beurteilen. Dies ist letztlich aber nötig, um das Lüften zur „richtigen“ Zeit vorzunehmen. Ansonsten kann es passieren, dass feuchtwarme Luft verstärkt in die Kirche strömt und zu bauphysikalischen Problemen führt. Beispiele für ungenügendes oder ungeeignetes Lüften sind in verschiedenen Kirchen zu finden.

Im anderen Fall kann falsches Lüften auch zum Einströmen von zu trockener Luft führen, die zu Schäden an Holzbauteilen und Orgeln führen kann. Eine Beurteilung der Lüftungszustände in der Kirche und außerhalb ist daher besonders wichtig.

Maßgebend für das Lüften sind vor allem die Luftfeuchten innen und außen. Hierbei sind aber nicht die relativen Luftfeuchten, sondern die absoluten Luftfeuchten maßgebend. Diese sind nicht direkt messbar, sondern werden aus der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ermittelt.

Bild 11: Skizze der Varianten der Lüftung



Darüber hinaus sind Öffnungen erforderlich, die eine Durchströmung der Kirche ermöglichen. In der Regel können hierfür Fenster genutzt werden. Reicht das nicht aus, müssen weitere Öffnungen geschaffen werden.

In der St.-Annen-Kirche wurden zwei Fenster mit Antrieben versehen. Sie befinden seitlich hinter bzw. neben dem Altar. Im Normalfall wird hier die Zuluft einströmen. Für die Abluft aus dem Kirchenraum wurde eine alte Lüftungsöffnung in der Gewölbedecke wieder aktiviert. Die Abluft wird zunächst in den Dachraum geleitet und bei Bedarf bzw. Notwendigkeit noch mit einem Außenwandanschluss versehen.

Bild 12: Fenster Altarraum mit Fensterantrieb

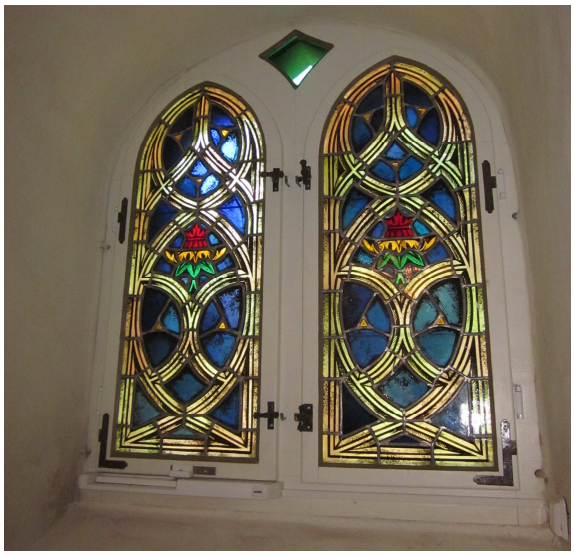


Bild 13: Detail Fensterantrieb

Zur Ansteuerung der Fensterlüftung werden zwei Fensterflügel sowie ein Abluftventilator genutzt. Beides ist parallel geschalten. Es gibt drei verschiedene Zustände:

Im Zustand 1 erfolgt ein klimaregulierender Automatikbetrieb für das Befeuchten und das Entfeuchten der Kirche nach Vergleich der Innen- und Außenzustände außerhalb eines Aufheizvorgangs und außerhalb der Nutzung der Kirche.

Zustand 2 verursacht eine automatische Sperre während des Aufheizvorgangs, jedoch nicht während eines Abheizvorganges, um die Fensterlüftung vorübergehend abschalten zu können. Hierbei schließen die Fenster und der Abluftventilator schaltet ab.

Im Zustand 3 kann mittels eines Kurzzeitasters bzw. einem zusätzlichen Taster mit Zeitrelais die Fensterlüftung vorübergehend eingeschaltet werden. Hierbei öffnen die Fenster und der Abluftventilator schaltet sich ein.

2.5. Kombinierte Regelung für Temperieren und Lüften

Wird die Luft in der Kirche zu feucht oder zu trocken, prüft die Regelung, ob zuerst eine Fensterlüftung sinnvoll ist, um gegensteuern zu können. Maßgebend hierfür ist die absolute Luftfeuchte innen und außen, nicht die relative Luftfeuchte. Sind die Bedingungen für eine Fensterlüftung geeignet, geht die Fensterlüftung in Betrieb.

Während der Fensterlüftung wird fortlaufend die Raumtemperatur überprüft, damit ein unkontrolliertes Auskühlen der Kirche vermieden wird.

Sinkt bzw. steigt die Raumtemperatur um mehr als eine zulässige Differenztemperatur, wird die Fensterlüftung wieder deaktiviert.

Mit der gleichen Regelung erfolgt die Temperierung der Kirche auf den eingestellten Sollwert der Raumtemperatur.

Durch die kombinierte Regelung ist ausgeschlossen, dass sich das Lüften und Heizen gegenseitig negativ beeinflusst.

3. Erfolgskontrolle

Zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion der Anlagentechnik sind Datenlogger eingebaut, die unabhängig von der Regelung permanent die Temperatur und die relative Luftfeuchte erfassen.

In regelmäßigen Abständen werden die Daten ausgelesen und in Zusammenarbeit mit dem IDK interpretiert.

Bild 14: Datenlogger auf Sims einer Sandsteinsäule

Bild 15: Datenlogger Orgel

Das IDK überwacht das Raumklima auch selbst, sodass eine größtmögliche Sicherheit besteht, Fehlfunktionen schnell zu erkennen und gegenzusteuern. Darüber hinaus ermöglicht es eine Optimierung des Raumklimas.

4. Zusammenfassung

Die St.-Annen-Kirche ist eine der ersten Kirchen, die eine kombinierte Regelung für Temperieren und Lüften erhalten hat, die nicht mit Gebäudeleittechnik und einer DDC-Anlage realisiert werden musste.

Durch den Einbau einer Fußbodentemperierung ließ sich der Wärmeenergiebedarf deutlich reduzieren, sodass die Anlage hocheffizient und wirtschaftlich arbeiten kann. Gleichzeitig sorgt die Anlage für ein hohes Maß an Behaglichkeit bei den Kirchenbesuchern.

Die Art und Ausführung der Anlage wird nach Projektabschluss weiterhin überprüft.

Bei bestimmungsgemäßer Funktion soll die St.-Annen-Kirche als Beispiel für weitere Projekte dienen.

Chemnitz, 11.04.2014

.....
Dipl.-Ing. L. Baumann VDI
Beratender Ingenieur

ATELIER FÜR STEINRESTAURIERUNG
ANDREAS MUTH RESTAURATOR VDR

Trillerstraße 04
08066 Zwickau
Tel: 0375 / 46 00 788 Fax: 0375 / 46 00 799

E- Mail: steinrestaurierung-muth@freenet.de

Restauratorische Bearbeitung der Mustersäule

Andreas Muth, Restaurator VdR, Atelier für Steinrestaurierung

Dem Beginn der praktisch-restauratorischen Maßnahmen an der Mustersäule ging eine Voruntersuchung voraus, in der Bohrmehlproben zur Untersuchung der enthaltenen Schadsalze und zur Feuchtigkeitssituation im Gestein entnommen wurden. In Vorbereitung weiterer Untersuchungen sowie der praktischen Restaurierungsmaßnahmen erfolgte zunächst die Freilegung der Oberfläche von einer jüngeren weißen Farbfassung durch den Restaurator für Wandmalerei und Architekturfassungen. Im Ergebnis zeigte sich auf Sockel und Säulenschaft eine großflächig aufliegende, die Oberfläche weitgehend abdichtende Zementmörtelschlämme. Am Kapitell war diese Schlämme jedoch nicht vorhanden. Nach Diskussion der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Untersuchungsergebnisse und des Objektzustandes wurde in Absprache mit den zuständigen Fachbehörden entschieden, diese Zementmörtelschlämme weitgehend abzunehmen, um bessere Voraussetzungen für eine folgende Entsalzung und Konservierung zu schaffen. Nach der Umsetzung trat die Oberfläche des verwendeten Zwickauer Kohlesandsteines rötlicher Varietät mit dessen typischen Verwitterungsformen auch im Bereich des Sockels und des Säulenschaftes zu Tage. Die Gesteinsoberfläche erschien als sehr heterogen. Leicht angewitterte Bereiche mit schwach absandenden oberen Kornlagen standen anderen Abschnitten mit sehr starken Schäden gegenüber. Die einzelnen Säulentrommeln zeigten starke Verwitterungserscheinungen besonders in fugennahen Bereichen. Die Tiefe der Abwitterungen betrug hier bis zu mehrere Zentimeter, die im Untergrund vorhandene Steinsubstanz war hier sehr stark aufgelockert. Ein weiteres Schadphänomen bestand in der starken Verwitterung der für diesen Sandstein typischen flözartigen Einlagerungen mit hohem Kohlegehalt. Das Material dieser Bereiche war ebenfalls tief ausgewittert oder völlig desolat, so dass es im Weiteren nur ausgeräumt werden konnte. Die Konzentration der Schäden im Bereich des Sockels und in etwa an der unteren Drittellinie des Säulenschaftes war dabei ein Hinweis auf Probleme mit kapillar aufsteigender Feuchtigkeit in früheren Zeiten. Weitere Schäden an der Säule bestanden in mechanisch verursachten Fehlstellen, die bei früheren Maßnahmen mit Mörtel und z.T. sogar durch kleine Ziegelausmauerungen geschlossen worden waren.

Abbildung 1: Zustand der Mustersäule nach Abnahme der jüngeren Farbschichten, großflächig aufliegende Zementmörtelschlämme

Zur Entwicklung bzw. Untersuchung von zur Verfügung stehenden Ergänzungsmaterialien wurden im Vorfeld aus vorhandenen, strukturell und farblich passenden Altsteinen anderer Objekte Probekörper, Prismen 20x20x40 mm und Scheiben Ø 50 mm geschnitten, mit denen vom IDK die Kennwerte des verwendeten Gesteines ermitteln wurden.

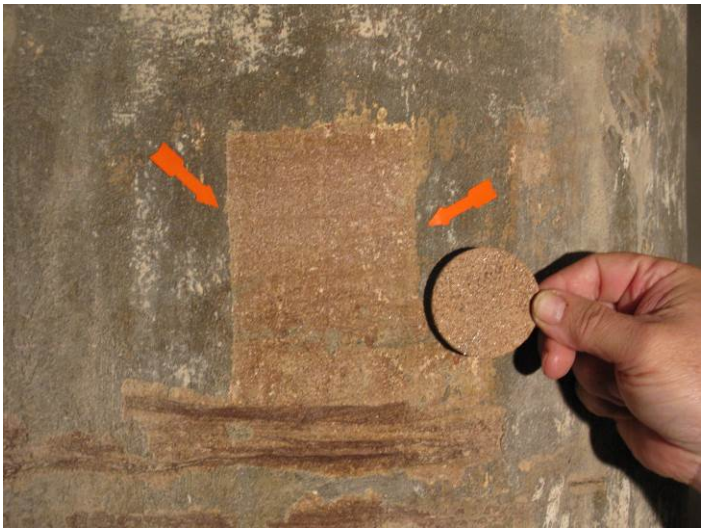


Abbildung 2: Probefläche zur Entfernung der Zementmörtelschlämme mit Probescheibe eines passenden Vergleichssteines

Anschließend erfolgte die Herstellung der Prüfkörper in drei Mörtelsystemen in für das Projekt angefertigten elastischen Formen aus Polyurethan. Verwendet wurden mehrere mineralische Mörtel (Rajasil, BASF), ein KSE-gebundener Mörtel (Bindemittel KSE 500 STE, Fa. Remmers, Zuschlagstoffe Fa. Romstedt) sowie ein Acrylharz-gebundener Mörtel (AC-Mörtel, Fa. Romstedt). Die Sieblinien der Zuschlagstoffe für den AC-Mörtel und den

KSE-Mörtel wurden dabei speziell auf das vorliegende Gestein abgestimmt. Die mineralischen Mörtel von Rajasil waren zunächst konfektioniert und wurden durch die Zugabe von einzelnen Komponenten und Pigmenten von der Fa. Romstedt angepasst. Im Ergebnis der Mörteluntersuchungen durch das IDK wurden bei der späteren Restaurierung nur der mineralische Mörtel Rajasil Spezial und der AC-Mörtel am Objekt verwendet, die auf das vorliegende Objekt durch verschiedene Zusätze angepasst wurden.
Die praktischen Arbeiten an der Säule wurden mit einer Trockenreinigung fortgesetzt, bei der zunächst der beschädigte Kalkmörtel der Fugen vorsichtig manuell ausgeräumt wurde. Die im Vorzustand in den Fugen enthaltenen kleinen Schieferstücke wurden dabei in situ belassen. Den Abschluss dieses Arbeitsschrittes bildete das Abbürsten und Absaugen aller restlichen Verschmutzungen, die nach dem Entfernen der Zementmörtelschlämme und dem Öffnen der Fugen noch auf dem Objekt auflagen.

Abbildung 3: Zustand der Säule nach Abnahme der Zementmörtelschlämme

Da im Ergebnis der Voruntersuchungen eine z.T. starke Belastung der Säule mit bauschädlichen Salzen festgestellt worden war, wurden im Anschluss Maßnahmen zur Entsalzung mittels Kompressen ausgeführt. Verwendet wurde Arbocel-Zellulose und destilliertes Wasser. Das Objekt wurde vollflächig in drei Zyklen entsalzt. Auf die Herstellung eines gerichteten Kapillarwasserstromes wurde dabei verzichtet, da sich die Gehalte an wasserlöslichen Bestandteilen im oberflächennahen Bereich bis ca. 3 cm Tiefe stark aufkonzentriert hatten. Zur Kontrolle des Entsalzungseffektes wurde in drei Höhenbereichen am Säulenschaft am Ende des jeweiligen Zyklus eine Kompressenprobe in der Größe von 10 x 10 cm entnommen und auf den Gesamtgehalt an wasserlöslichen Bestandteilen untersucht. Aufgrund der bauklimatischen Verhältnisse und der parallel zur Entsalzung laufenden anderweitigen Maßnahmen in der Kirche verblieb die Kompresse des ersten Zyklus bis zur weitgehenden Trocknung deutlich länger auf dem Objekt als die der Zyklen zwei und drei. Die Menge der durch die Kompressen extrahierten wasserlöslichen Bestandteile war in der untersten und obersten Trommel jeweils im zweiten Zyklus am größten. Im Bereich der mittleren Säulentrommel wurden nur die Zyklen II und III analysiert. Die Extraktionsmenge war in diesen beiden Zyklen gleich. Im Bereich der obersten Säulentrommel war die Menge der extrahierten wasserlöslichen Bestandteile mit 345g/m² am

größten, während im Hauptschadensbereich in der Mitte und am unteren Ende des Säulenschaftes dem Stein ca. 150g/m² an wasserlöslichen Bestandteilen entzogen wurden.

Abbildung 4: Entsalzungsmaßnahmen, Abnahme einer Zellulosekompresse

Zur Vorbereitung der Konservierung wurden an der entsalzten Mustersäule und an einer zweiten nicht entsalzten Säule zum Vergleich mehrere Probeflächen angelegt. Letztgenannte Säule war zuvor in Vorbereitung weiterer Maßnahmen ebenfalls von der jüngeren Farbfassung und der darunterliegenden Zementmörtelschlämme freigelegt worden. Konserviert werden sollte mit verschiedenen Kieselsäureesthern der Firma Remmers, die sich in der Gelabscheidungsrate und dem Vorhandensein einer elastifizierenden Komponente unterscheiden. Zur Verwendung kamen Funcosil KSE 100, KSE 300 und KSE 300 E jeweils ohne hydrophobierende Zusätze in unterschiedlichen Kombinationen. Gefestigt wurden die einzelnen Probeflächen jeweils in 3 Applikationsdurchgängen in einem zeitlichen Abstand von ca. 15 – 20 min. Die Flächen wurden bis zur Sättigung geflutet, die aufgenommene Festigermenge wurde protokolliert. Zur Vermeidung einer zu hohen Festigerkonzentration an der Oberfläche wurden alle Probeflächen abschließend mit Aceton nachbehandelt.

Tabelle 1: Anlegen der Probeflächen zur Konservierung an der Mustersäule, Konservierungsmittel und Applikationsmenge

Fläche	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3
2/1	KSE 100 5 ml	KSE 100 3 ml	KSE 100 2 ml
2/2	KSE 100 5 ml	KSE 300 3 ml	KSE 300 3 ml
2/3	KSE 100 5 ml	KSE 300 E 3 ml	KSE 300 E 2 ml
2/4	KSE 300 5 ml	KSE 300 5 ml	KSE 300 5 ml
2/5	KSE 300 E 5 ml	KSE 300 E 4 ml	KSE 300 E 4 ml
2/6	KSE 100 5 ml	KSE 100/300 1:1 4 ml	KSE 100/300 1:1 3 ml
2/7	KSE 100 5 ml	KSE 100/300 E 1:1 4 ml	KSE 100/300 E 1:1 3 ml

Abbildung 5: Anlegen von Probeflächen zur Konservierung

Zur Auswertung der Ergebnisse der Probefestigung wurden alle Flächen mit dem Bohrwiderstandsgerät als Nullprobe vor der Festigung und nach der Ausreaktion der Konservierungsmittel durch das IDK beprobt. Im Ergebnis erschien eine Festigung mit dem Festigungsmittel KSE 300 in allen drei Applikationsdurchgängen als die günstigste Variante bei der sowohl der Bohrwiderstand nicht sprunghaft ansteigt, als auch eine ausreichende Konsolidierung des Sandsteingefüges über die gesamte Bohrtiefe hinweg messbar ist. Im Unterschied zu den Probeflächen ohne vorangegangene Entsalzung waren die Eindringtiefen an der Mustersäule größer. Nach diesen Ergebnissen wurde die Mustersäule vollflächig, mit Aussparung der Musterflächen, konserviert. Die applizierte Menge wurde dabei je nach

Auflockerungsgrad und Eindringfähigkeit variiert und betrug zwischen ca. 1,4 l/m² bis zu ca. 2,1 l/m² im Maximum. Nach Abschluss der Festigung wurde die gesamte Oberfläche mit Aceton nachbehandelt.
Nach der Ausreaktion des Festigers an der Mustersäule begannen die Arbeiten zur Ergänzung. Im Vorfeld waren die jetzt verwendeten beiden Mörtel Rajasil Spezial und AC-Mörtel durch die Fa. Romstedt durch Zugabe von Pigmenten und Zuschlagstoffen wie Glimmer und farbigen Gesteinskörnern bestmöglich angeglichen worden. Insbesondere der Acrylmörtel kam in seiner optischen Erscheinung äußerst nahe an die der originalen Gesteinsoberflächen heran. Für die Ergänzung der Mustersäule standen von diesen Mörteln mehrere Farbvarianten zur Verfügung.

Abbildung 6: angepasster AC-Mörtel auf einer Musterplatte

Für kleinere Löcher und Versehrungen sowie für die Ergänzungen in den ausgeräumten ehemaligen Flözen kam der AC-Mörtel zum Einsatz. Dieser ist für die Ausführung von eher kleineren Ergänzungen aufgrund der praktischen Handhabbarkeit grundsätzlich besser geeignet. Die Fehlstellen wurden mit einem Wasser-Acrylat-Gemisch vorgenässt und der Mörtel anschließend nass in nass verarbeitet. Da der Mörtel genau wie das Originalmaterial relativ grobkörnig eingestellt war, gab es bei der Überarbeitung nach der vollständigen Durchhärtung des Mörtels kleinere Ausbrüche an den Ergänzungsrändern, die nachgearbeitet werden mussten. Deshalb wurde die Anpassung der fertigen Oberfläche später vorzugsweise gleich am Ende der Antragung im frischen Zustand ausgeführt.
Die größeren Fehlstellen wurden mit mineralischem Mörtel Rajasil Spezial geschlossen. Dies betraf vor allem die Fugenflanken, die stellenweise so zerstört waren, dass sich eine um den Säulenschaft umlaufende Ergänzung notwendig machte. Die Kanten der zu schließenden Fehlstellen wurden mit einem Nuteisen leicht nachgezogen und die Fläche geringfügig angezahnt. Der Stein wurde vorgenässt, eine Mörtelschlemme aufgetragen und der Mörtel nass in nass über das Steinniveau hinaus angetragen. Am nächsten Tag erfolgte die Überarbeitung und Anpassung mit Schleifsteinen und Werkzeugen. Bei tieferen Fehlstellen, z.B. an den abgebrochenen Ecken des Kapitells, wurde zweilagig gearbeitet. Auch ein verbliebener Fehlbereich an der Unterkante des Sockels, der vermutlich durch eine Absenkung des Kirchenbodens entstanden war, wurde mit mineralischem Restauriermörtel geschlossen.
In drei Bereichen waren die Fehlstellen so groß, dass diese vorzugsweise durch Vierungen geschlossen werden mussten. Die beschädigten Bereiche wurden winklig ausgearbeitet und danach ein vorgefertigtes Werkstück mit einem mineralischen Klebemörtel eingesetzt. Die Endbearbeitung der Vierung erfolgte dann direkt am Objekt, die Vierungsfugen wurden mit AC-Mörtel geschlossen. Für das Vierungsmaterial wurde auf Altbestände eines Zwickauer

Steinmetzen zurückgegriffen. Er bezeichnete das Gestein als Thüringer Buntsandstein, die Herkunft konnte nicht genauer verifiziert werden. Die Bereitstellung eines geeigneten Ersatzmateriales ist für den Zwickauer Kohlesandstein roter Varietät generell recht schwierig. Eine Materialsuche über das deutsche Natursteinarchiv in Wunsiedel ergab als mögliche Austauschgesteine Schweinsthaler oder auch Olsbrücker Sandstein. Während Farbigkeit und Körnung dieser Gesteine durchaus geeignet sind, ist die Druckfestigkeit jedoch deutlich höher als die des beprobten (jedoch angewitterten) Kohlesandsteinmateriales.

Abbildung 7: Mustersäule mit mineralischen Ergänzungen und Vierungsaussparung an der oberen Säulentrommel

Im Anschluss an den Vierungseinbau wurden die Fugen zwischen Sockel, Säulentrommel und dem Kapitell mit Rajasil Fugenmörtel auf Trasskalkbasis in der Körnung 0-1mm geschlossen. Dabei musste die Verfugung an die geringfügigen Unebenheiten der Fugenflanken angepasst werden. Da zum Abschluss der Arbeiten an der Mustersäule noch nicht entschieden war, ob die Säulen in der Zukunft wieder gefasst oder steinsichtig präsentiert werden, wurden abschließend die ausgeführten Ergänzungen feinretuschiert. Auch die eingesetzten Vierungen erhielten eine einstimmende Retusche, damit sie sich in das Gesamtbild besser einfügen, ohne diese jedoch vollständig zu verstecken. Als Bindemittel wurde Acrylharz AC35 mit 5%iger Feststoffkonzentration verwendet.
Nach dem Abschluss der praktischen Maßnahmen an der Mustersäule erscheint diese in einem geschlossenen Gesamterscheinungsbild, das dennoch die Spuren der gealterten Oberflächen aufzeigt.

Abbildung 8: Endzustand der Mustersäule nach ausgeführter Retusche