

Inhalt

Vorwort <i>Thomas Drachenberg</i>	6
Denkmalpflege und energetische Sanierung: Neue Lösungsansätze aus Forschung und Praxis <i>Ralf Kilian, Stefan Bichlmair, Martin Krus, Dominik Merkle, Christine Milch</i>	8
Das unkalkulierbare Risiko – Museen zwischen Sanierung und Neubau <i>Volker Huckemann</i>	18
Less energy input = better collections care outcome? Practical elements of climate change mitigation and resilience in museums <i>Christian Baars</i>	26
Sustainable museum storage – experience from Denmark <i>Poul Klenz Larsen</i>	37
Keep it simple – Ein Low-Tech-Magazin für die Funde aus der Römerzeit <i>Peter Kienzle</i>	44
Lüften, Heizen, Klimatisieren ... Wie viel Technik brauchen Museumsschlösser? <i>Wulf Eckermann</i>	53
Vom Kaltschloss zur Vollklimaanlage und zurück: Konzepte zur Klimakonditionierung im Vergleich – Praxisbeispiele aus der Bayerischen Schlösserverwaltung <i>Tina Naumović</i>	61
Energieeinsparung um jeden Preis? Sinn und Unsinn amtlicher Empfehlungen für denkmalgeschützte Gebäude <i>Lutz Baumann</i>	73
Mittelalterliche Wandmalerei im Ratskeller von Wismar: konservatorische Überlegungen und Aspekte zur Energiebilanz verschiedener baulicher Konzepte <i>Matthias Staschull</i>	78
Senkung der Luftfeuchte in Backsteinkirchen durch klimageführte passive Lüftung <i>Andreas Weiß</i>	88
Erfolgreich Energie sparen in Museen, Depots und historischen Bauten. Alle reden vom Energie sparen – keiner macht's! <i>Jochen Käferhaus</i>	93
How little is enough – Key Performance Indicators for Energy Consumption and Climate in Memory Institutions <i>Stefan Simon, Lukasz Bratasz</i>	103
Autorenverzeichnis	111

Denkmalpflege und energetische Sanierung: Neue Lösungsansätze aus Forschung und Praxis

RALF KILIAN^{1,*}, STEFAN BICHLMAIR¹, MARTIN KRUS¹, DOMINIK MERKLE², CHRISTINE MILCH¹

¹ Fraunhofer Institut für Bauphysik, 83626 Valley

² Mayer Ingenieure, 86637 Wertingen

Abstract

This paper offers an introduction into research to better combine measures of monument conservation and the energy performance of the Alte Schäferei (Old Cooperage) in the monastery of Benediktbeuern in Upper Bavaria, Germany. The project began in 2010 when a contract was signed between the monastery and the Fraunhofer Gesellschaft to establish the “Fraunhofer Center for Conservation and Energy Performance of Historic Buildings”. The center focuses its research on both resource and energy efficiency. In addition, all the measures should comply with monument preservation rules and respect the original building substance. This article presents the calculation of the impact of different energy saving measures, such as improvement of the historic windows, internal and external wall insulation, attic and floor insulation, as well as the use of renewable energies from the central power station of the monastery on the overall energy demand.

1. Hintergrund

Die globale Klimakrise und ihr schnelles Fortschreiten machen uns mehr als deutlich, dass wir jetzt handeln müssen. Das Bewusstsein dafür ist an vielen Stellen gestiegen und der Wunsch zur Verbesserung der Energieeffizienz vorhanden, wenngleich der Weg dahin oft nicht klar ist. Gerade für historische oder denkmalgeschützte Bauten bedeutet dies eine große Herausforderung, da Klimaschutz-Maßnahmen zur Senkung des CO₂-Ausstoßes bzw. des Energiebedarfs von Gebäuden in der Regel mit mehr oder weniger großen Eingriffen in die Bausubstanz verbunden sind. Doch es gibt Möglichkeiten für eine substanzschonende Sanierung historischer Bauten und auch die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien birgt ein erhebliches Potential zur Senkung des Primärenergie-Bedarfs.

Der folgende Artikel stellt am Beispiel der Alten Schäferei in Benediktbeuern verschiedene Lösungsansätze vor und ordnet diese in Hinsicht auf ihr Potential zur Energieeinsparung ein.

1.1 Forschung für Energieeffizienz in historischen Gebäuden mit Priorität der Gebäudeerhaltung

Die „Alte Schäferei“ (Abb. 1) am Kloster Benediktbeuern, erbaut in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, gehört zum ehemaligen Handwerkerhof des Klosters und ist ein idealer Ort für Forschungen zu Bauwerkserhaltung und Energieeffizienz. Zentraler Aspekt des dort angesiedelten Fraunhofer-Zentrums für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege ist die enge Verzahnung von praktischer Denkmalpflege, Wissenschaft und Denkmalschutz sowie die kritische Auseinandersetzung mit neuen, innovativen Materialien und Technologien für historische Gebäude (KILIAN ET AL., 2021).

Die Sanierung und energetische Ertüchtigung historischer Gebäude birgt oft die Gefahr des Verlustes der ursprünglichen Konstruktionen und der historischen Bausubstanz. Die sogenannten Primärdokumente (Abb. 3b) geben Aufschluss über die Nutzungsgeschichte des Gebäudes, den Geschmack einer bestimmten Zeit oder über alte Bautechnik. Auch historische Fenster, Putz und Architekturfassungen oder alte Holzfußböden bilden faszinierende ästhetische



Abb. 1: Seit 2010 dient das historische Gebäude der Alten Schäferei am Kloster Benediktbeuern als Ort der Forschung zu Denkmalpflege und energetischer Altbausanierung (Bildautor: © Fraunhofer IBP).

sche Elemente und stellen ein Erbe dar, das wir für künftige Generationen bewahren wollen. Ziel aller Forschungs- und Demonstrationsaktivitäten am Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern ist es daher, zu erforschen, wie man historische Bauteile erhalten und gleichzeitig Gebäude nachhaltig und dauerhaft verbessern kann.

Das erste Forschungsprojekt, das in der Alten Schäferei umgesetzt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) zwischen 2008 und 2014 gefördert wurde, untersuchte erfolgreich Möglichkeiten für den Einbau von Niedertemperatur-Wandheizungen in historischen Gebäuden, einen optimierten Heizkörper sowie das sogenannte Temperierungsheizsystem (Bauteiltemperierung) zur Vermeidung von Feuchtigkeitsschäden an kalten Wänden und Ecken (BICHLMAIR, 2020; KILIAN ET AL., 2018).

In den letzten Jahren wurden auch verschiedene Maßnahmen zur Wärmedämmung der Gebäudehülle durchgeführt und durch umfangreiches Monitoring überwacht. Als eine der ersten Maßnahmen wurde der Fußboden im



Abb. 2: Im Obergeschoss der denkmalgeschützten Alten Schäferei wurden unterschiedliche Innendämmungen reversibel, also rückbaubar, eingebaut und messtechnisch untersucht. Rechts im Bild ein innovativer Dämmstoff aus Rohrkolben (Typha) und in der Mitte Schilfrohmatten beim Verputzen (Bildautor: © Fraunhofer IBP).

Keep it simple – Ein Low-Tech-Magazin für die Funde aus der Römerzeit

PETER KIENZLE

LVR-Archäologischer Park Xanten, 46509 Xanten

Abstract

In 2008 the planning process for a new administrative building with offices, workshops, and storerooms for the LVR-Archaeological Park at Xanten began: To provide storage for a growing number of excavated archaeological artefacts, a depot was needed, which provides ample space and—at the same time—fulfils modern demands on preservation conditions. The building—designed and opened in 2016—features several low-tech storerooms with thick concrete walls, few openings, clay plaster, and minimal air-conditioning. Only three small special storerooms for metal, organic objects, and deep-freezing feature sophisticated climatic control. Thus, the new storerooms fulfil the preservation demands and at the same time are sustainable as regards building materials and operational costs.

Hintergrund

Die römische Stadt *Colonia Ulpia Traiana* lag an den Ufern des Rheins unmittelbar nördlich der heutigen Stadt Xanten und ungefähr 100 km nördlich der Stadt Köln. Im Jahr 1977 wurde ein archäologischer Park eröffnet, der zur Aufgabe hat, die Überreste der ehemaligen römischen Stadt zu schützen, zu erforschen und dem breiten Publikum zu erschließen. Im Gründungsjahr des LVR-Archäologischen Parks Xanten¹ bestand die Mitarbeiterschaft aus zwei Architekten und einer Sekretärin. Die Ausgrabungen wurden durch Grabungsfirmen unter Aufsicht des Rheinischen Landesmuseums in Bonn durchgeführt. Inzwischen ist der Mitarbeiterstamm auf rund 70 Personen angewachsen und die zahlreichen ausgegrabenen Fundstücke füllen tausende von Kisten. Die Zielsetzung und das Selbstverständnis des LVR-Archäologischen Parks Xanten beinhaltet nicht nur die Vermittlung an die Bevölkerung, sondern versteht sich auch als Forschungsinstitut und möchte deshalb die Befunde im Boden, die Funde in den Kisten und die Grabungsdokumentation dem Fachpublikum und anderen Forschern erschließen. Über viele Jahre war die stetig anwachsende Mitarbeiterzahl in ganz unterschiedlichen Provisorien untergebracht. Die ausgegrabenen Funde lagerten in nicht beheizten Lagerhallen mit undichtem Dach. Nach längerer Vorplanung entschloss sich deshalb der Landschaftsverband Rheinland

als Träger des LVR-Archäologischen Parks Xanten im Jahr 2008, im Bereich der ehemaligen *Colonia Ulpia Traiana* einen Neubau zu Unterbringung von Büroräumen, Werkstätten und Fundmagazin zu errichten (Abb. 1). Die Büroräume und Werkstätten wurden nach dem heute üblichen Passivhausstandard errichtet. In diesem Beitrag soll der Fokus auf die energieoptimierte Unterbringung der Funde in den Magazinen gerichtet werden.²

Zielsetzung

Seit ihrer Gründung kennen Museumssammlungen, Magazine und Archive immer nur eine Bewegungsrichtung: Sie wachsen! Wurde ein Kulturgut, sei es ein archäologischer Fund, ein Museumsobjekt oder ein schriftliches Zeugnis der Vergangenheit, einmal als historisch und wertvoll eingestuft, behält es diesen Status in den allermeisten Fällen für immer. Kein Museumsleiter und kein Archivar würde jemals einem Objekt den erhaltungswürdigen Zustand wieder aberkennen. Auf der anderen Seite werden jedoch jedes Jahr den Sammlungen neue erhaltenswerte Objekte hinzugefügt.³ Zugleich liegen die Wurzeln vieler Sammlungen und Archive weit in der Vergangenheit; viele der Magazine und Archive sind veraltet und entsprechen nicht mehr den modernen konservatorischen Anforderungen.



Abb. 1: Die neue Dienststelle des LVR-Archäologischen Parks Xanten. Rechts der Verwaltungstrakt, links das Magazin für die archäologischen Funde (Bildautor: Axel Thünker, DGPh).

Seit der Verabschiedung der Charta von Venedig im Jahr 1964, aber insbesondere in den letzten zwei Jahrzehnten ist die wissenschaftliche Erforschung und Dokumentation der konservatorisch optimalen Erhaltungskonditionen von Kulturgut erheblich vorangeschritten. Restauratoren haben die bestmöglichen Erhaltungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit etc.) für verschiedene Objektgattungen definiert und schädliche Umwelteinflüsse identifiziert. Da die meisten musealen Sammlungen aus Objekten ganz unterschiedlicher Materialien bestehen, entwickeln sich hieraus komplexe Anforderungen an die Raumklimatisierung. Der bisherige Ansatz war meist, diesen Anforderungen durch immer aufwendigere und komplexere technische Anlagen zu begegnen. Der daraus entstehende Konflikt tritt sehr schnell bei den Planungsbesprechungen für einen Magazinneubau zu Tage: Die größer werdende Sammlung benötigt mehr Raum, durch die immer weiter verbesserte Grabungsmethodik müssen zudem vermehrt empfindlichere Funde eingelagert werden (z. B. organische Überreste anstatt lediglich Steine und Scherben) und zugleich steht die Forderung nach einer sehr feinfühlig geregelten Klimatisierung der Magazine im Raum. Dadurch steigen die Baukosten für das größere Raumvolumen, die Baukosten pro Raumeinheit und – folglich – später die Betriebskosten. Diese Kosten können von den verantwortlichen Trägern der Sammlung (Länder, Kommunen, Stiftungen, Universitäten etc.) oft nicht mehr aufgebracht werden.

Im Verlauf der Planungsbesprechungen für den Archäologischen Park Xanten wurde das Anforderungsprofil an den Magazinbau zum einen kritisch hinterfragt, zum anderen aber auch differenzierter betrachtet (HUBER UND VON LERBER, 2008):

Müssen alle Funde klimatisiert werden? Gibt es besonders empfindliche Funde? Gelten enge Grenzwerte für alle Fundgattungen gleichermaßen?⁴ In der Regel besteht der allergrößte Anteil der archäologischen Überreste, die bei den Grabungen gefunden werden, aus mineralischen Materialien (Tonscherben, Steine, Baukeramik und Wandputz). Diese können durchaus eine größere Bandbreite an Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen ohne Schäden aushalten, sofern diese nicht abrupt verlaufen, sondern sehr langsam und kontinuierlich. Mit einer Magazinfläche von ca. 1.420 m² haben diese Funde den größten Anteil des Raumbedarfs.⁵ Lediglich ein kleinerer Teil der Sammlung benötigt sehr eng gefasste klimatische Bedingungen. Es handelt sich hierbei um ein Organik-Magazin (ca. 32 m²) für Funde aus Holz, Leder oder pflanzlichen Überresten, welche relativ feucht gelagert werden müssen, damit die Materialien nicht verspröden. Zudem gibt es ein Metall-Magazin (ca. 90 m²) für Eisenfunde, Bunt- und Edelmetalle, die ein relativ trockenes Klima benötigen, damit die Materialien nicht korrodieren. Zu guter Letzt bestand noch der Bedarf an einem Gefrier-Magazin (ca. 28 m²), um frisch geborgene archäologische Funde aus Feuchtboden-Gra-



Abb. 5: Rollregal-Anlage mit roten Fundkisten. Im Hintergrund der Lehmputz und die Entrauchungskappen (Bildautor: Peter Kienzle, LVR-Archäologischer Park Xanten).



Abb. 6: Das über zwei Stockwerke reichende Großfund-Lager. An der Decke die Zuleitung zur Wandflächenheizung (Bildautor: Peter Kienzle, LVR-Archäologischer Park Xanten).

Die Inneneinrichtung besteht überwiegend aus einem elektrisch angetriebenen Rollregal-System (Abb. 5). Dieses wurde so programmiert, dass es abends nach Ende der Benutzungszeit automatisch in eine Grundstellung fährt, bei der zwischen den Regalen ein gleichmäßiger Abstand entsteht. So sind alle Fundkisten luftumspült und es bilden sich keine „toten Ecken“. Im Bereitstellungsmagazin und im Schaumagazin wurden feste Regale verbaut, während im Stein-Magazin palettenfähige Hochregale installiert wurden (Abb. 6). Mit dem Scharfschalten der Einbruchmeldeanlage werden bis auf Einbruch- und Brandalarm alle anderen elektrischen Verbraucher automatisch vom Netz getrennt, um damit die Brandgefahr zu reduzieren.

Das Ergebnis

Die gewählte Bauart hat grundsätzlich alle an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Zur Überprüfung wurden im Magazin an verschiedenen Stellen mobile Datenlogger installiert, die unabhängig von den Messfühlern der Lüftungssteuerung tatsächliche Ist-Werte von Temperatur und

Feuchtigkeit in den einzelnen Räumen ermitteln. Die Temperatur folgt, mit einer Phasenverschiebung und in deutlicher Reduzierung der Temperaturspitzen, dem Außenklima. Dies zeigt ein Ausschnitt der gemessenen Temperaturwerte: Am 22.6.2017 wurde mit 35,1 °C einer der heißesten Tage in der Region gemessen.⁶ Die Temperatur hatte sich in den Tagen davor kontinuierlich gesteigert. Am folgenden Tag wurde der Temperaturanstieg durch ein Gewitterereignis beendet. Die Temperatur fiel bis zum 24.6. um 13,8 °C auf 21,3 °C. Die Temperatur im Magazin stieg trotz der starken Hitze draußen nur um ca. 2 °C an und zeigte dabei eine merkliche Phasenverschiebung. Die höchste Innentemperatur wurde am 29.6. mit 20,8 °C erreicht – eine Woche nach dem starken Hitzeereignis (Abb. 7). Danach begann auch die Temperatur im Gebäude wieder zu fallen. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich grundsätzlich auch im Winter, wobei hier einige Unterschiede zu beachten sind: Zum einen bringt die Wandflächenheizung ab einer Außentemperatur von ca. 18 °C zusätzlich Wärme in das Magazin und arbeitet somit gegen die fallenden Temperaturen. Die Wandflächenheizung wird mit einer Vorlauftempera-

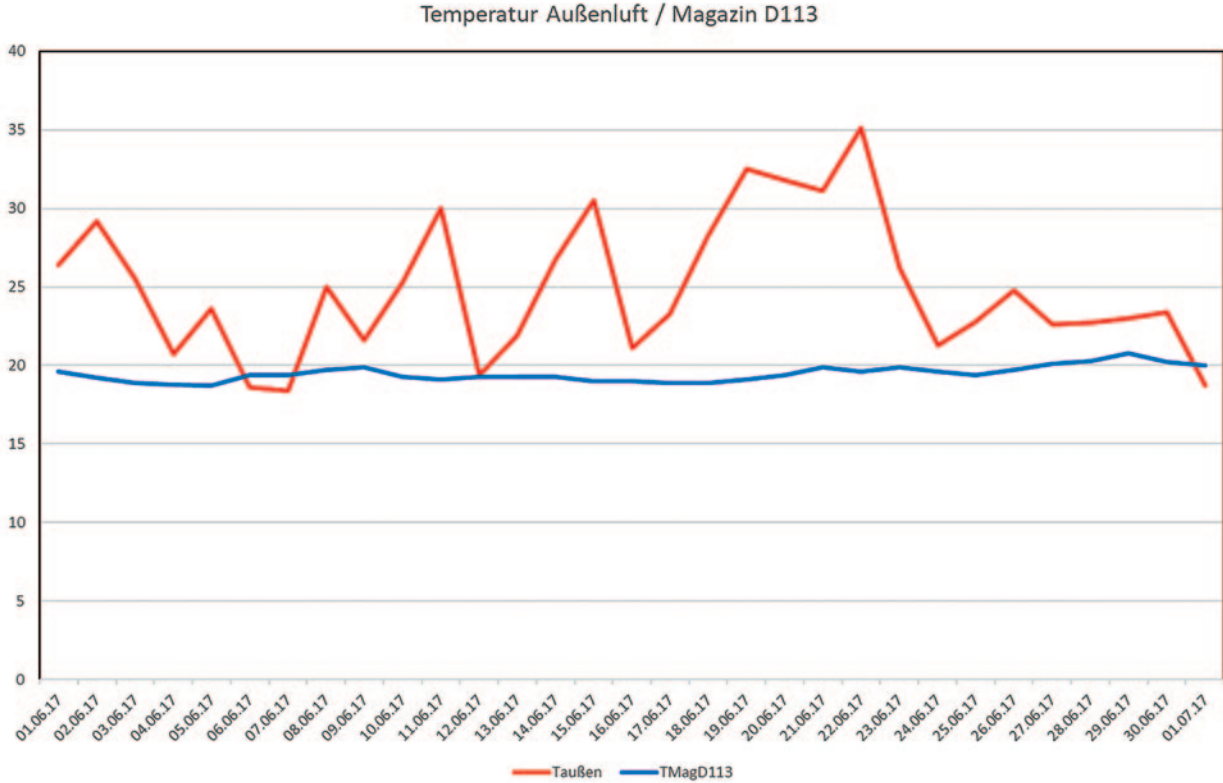


Abb. 7: Verlauf der Tageshöchsttemperatur der Wetterstation Tönisvorst im Vergleich zur Innentemperatur im Magazin vom 01.06. bis zum 01.07.2017 (Bildautor: Peter Kienzle, LVR-Archäologischer Park Xanten)

Gerätename: D.113 Depot		04.07.2019 09:35:06		Seite	1/1
Startzeit: 23.05.2019 15:50:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte
Endzeit: 03.07.2019 15:50:00	D.113 Temp [°C]	16,70	24,70	18,115	30,0/70,0
Messkanäle: 2	D.113 r.F. [%rF]	49,00	72,10	60,435	0,0/100,0
Messwerte: 3937					
36912364					

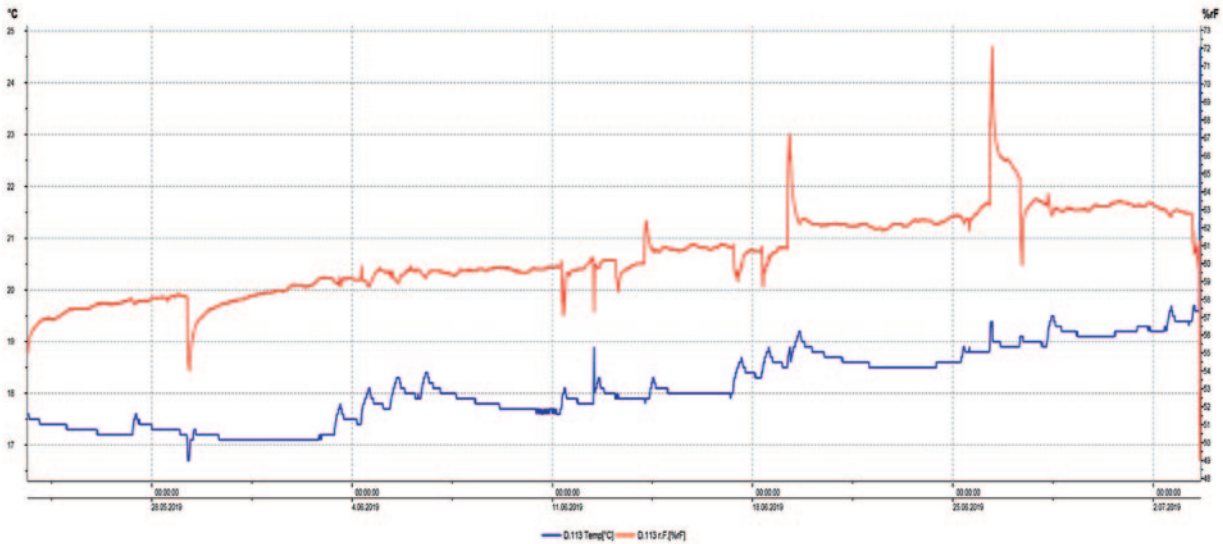


Abb. 8: Temperatur und Feuchtigkeit vom 23.05.2019 bis zum 03.07.2019 im Magazin D113 (Bildautorin: Petra Becker, LVR-Archäologischer Park Xanten)

Senkung der Luftfeuchte in Backsteinkirchen durch klimageführte passive Lüftung

ANDREAS WEISS

Technisches Museum Wien mit Österreichischer Mediathek, 1140 Wien

Abstract

The interior of medieval brick churches in the southern Baltic region is increasingly exposed to very high relative humidity. The causes are the influence of weather-related moisture loads and the inherent material properties of the brick walls. In general, village church halls are not air-conditioned. The financial capabilities of local parishes do not usually permit the use of energy to reduce humidity, for example through conservation heating or mechanical dehumidification. The village church of Mellenthin on the island of Usedom will serve as an example for describing climate-guided natural ventilation with accompanying measures on the exterior, offering an alternative for improving the interior climate.

Eine kurze Einführung in das zu lösende Klimaproblem

Das Interieur mittelalterlicher Backsteinkirchen im südlichen Ostseeraum ist zunehmend sehr hoher bis extremer relativer Luftfeuchte ausgesetzt. Jahresmittelwerte jenseits von 80 % rF sind dabei nach Beobachtungen und Messungen des Verfassers keine Seltenheit (Abb. 1). Deren wahrscheinliche Ursache – ein Zusammenwirken von Materialeigenschaften des Backsteins, Witterungsexposition und der Zunahme witterungsbedingter Feuchtelasten – soll hier nur zum Verständnis der Gesamtproblematik kurz umrissen werden: Aufgrund der Porenstruktur der Ziegel – mit w-Werten von beispielsweise $7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ an der Dorfkirche Poseritz auf der Insel Rügen – saugen mittelalterliche Backsteinmauerwerke nahezu alles wetterbedingt anstehende Wasser – von Schlagregen über Ablaufwässer der Dächer und Tauwasser bis zur Aerosolimpaktion aus Nebel – über die Oberfläche kapillar auf. Darüber hinaus werden nennenswerte Wassermengen auch durch Sickerströmungen in Quetschfugen des Backsteins, Flankenabrissen von Fugen und sonstigen Rissen in das Mauerwerk transportiert. Bei der Abtrocknung endet der kapillare Wassertransport in umgekehrter Richtung jedoch an einem Verdunstungshorizont, der sich mit zunehmender Trocknung

von der Oberfläche ins Mauerinnere verlagert (Abb. 2). Der Weitertransport der Feuchtigkeit über die wachsende Distanz vom Verdunstungshorizont zur Oberfläche erfolgt durch Dampfdiffusion erheblich langsamer als jeglicher kapillare Wassertransport (KRUS UND HOLM, 1999). Aus diesen Gründen wird zwischen aufeinanderfolgenden Befuchtungsereignissen häufig keine vollständige Abtrocknung nach außen erreicht. Die Folge ist eine fortlaufende Feuchteanreicherung im Mauerwerk, wobei sich über den gesamten Mauerquerschnitt ein Ausgleich der Mauerfeuchte entsprechend der Porenradienverteilung bzw. dem – sich aus dieser ergebenden – Wasserspeichervermögen einstellt (KRUS, 1995, S. 9). An unverschatteten Süd- und Westwänden mit regional erhöhter Schlagregenexposition wird die Abtrocknung nach außen zusätzlich verzögert, da durch die stärkere Erwärmung infolge intensiverer Sonneneinstrahlung der Verdunstungshorizont tiefer ins Mauerwerk wandert (Abb. 3). An der Innenseite der in der Regel nicht abgesperrten Mauern kann das Wasser hingegen ungehindert verdunsten, bis es entsprechend der Sorptionsisothermen des Mauerwerks zu einem Ausgleich der Mauerfeuchte mit der in die Raumluft auf sehr hohem Feuchteniveau kommt. In der Mehrzahl der Kirchen im Küstenwind Mecklenburg-Vorpommerns trifft die solchermassen in der Raum-

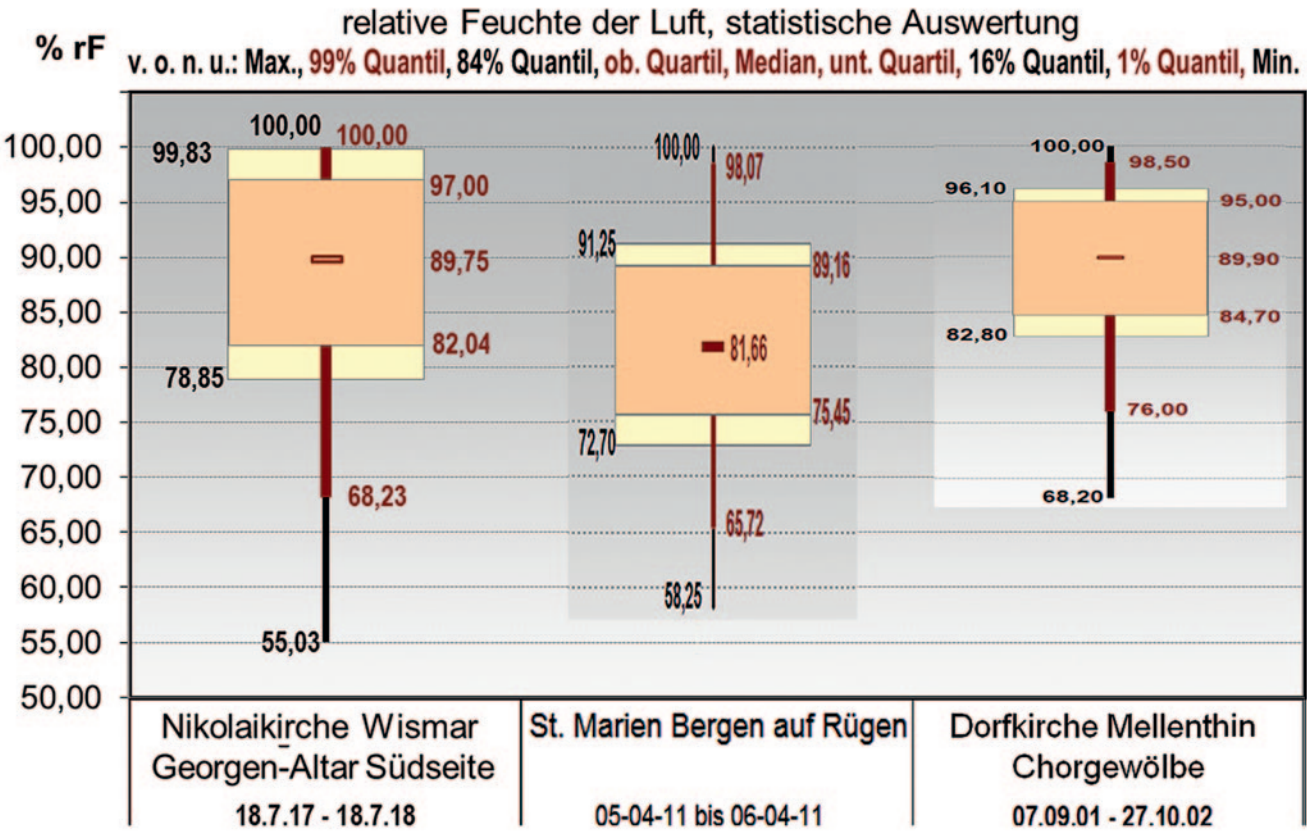


Abb. 1: Boxplots zur Verteilung der relativen Feuchte der Raumluft im Jahresgang in drei exemplarischen mittelalterlichen Backsteinkirchen im südlichen Ostseeraum (Bildautor: Andreas Weiß)



Abb. 2: An der Südfassade der Dorfkirche Poseritz auf Rügen liegt der Verdunstungshorizont der Mauerfeuchte nach einer regenfreien Woche im September 5 mm unter der Oberfläche (Bildautor: Andreas Weiß)

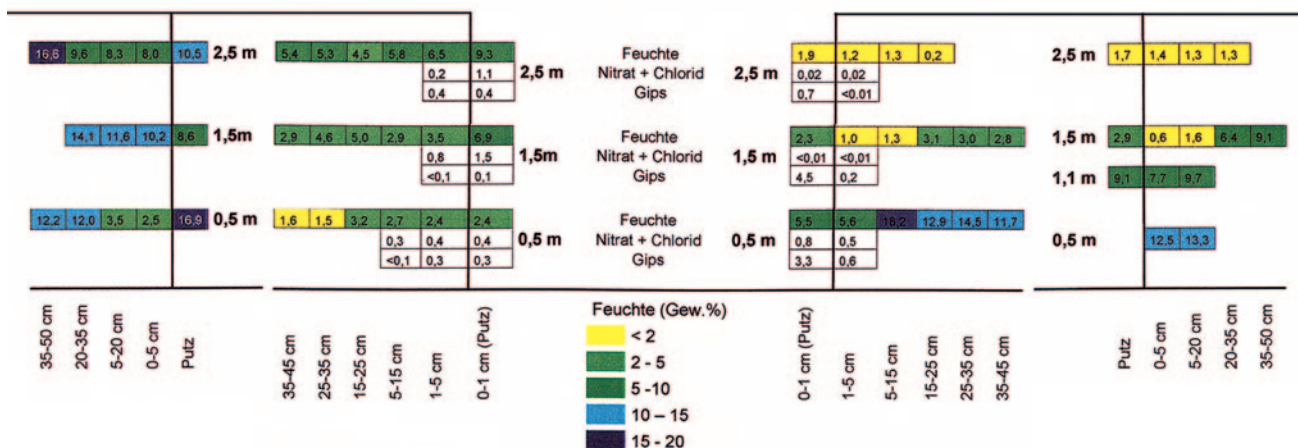


Abb. 3: Mauerfeuchteprofile von Süd- (links) und Nordwand (rechts) der Dorfkirche in Mellenthin zeigen exemplarisch das Zusammenwirken zwischen Schlagregenexposition und solaren Wärmeeinträgen an der Südseite. An der Nordseite treten überhygroskopische Materialfeuchten vor allem im Spritzwasserbereich des Sockels auf (Bildautor: Frank Schlütter, MPA Bremen).

luft angereicherte Feuchte auf nicht klimatisierte, bestenfalls mit antiquierten Bankheizungen ausgestattete Kirchenräume und Kirchengemeinden, deren finanzielle Leistungsfähigkeit jeglichen anhaltenden Energieeinsatz zur Verbesserung des Raumklimas – beispielsweise durch konservatorische Beheizung oder maschinelle Entfeuchtung – von vornherein ausschließt. Die klimageführte natürliche Belüftung mit flankierenden baulichen Maßnahmen zur Verringerung der Feuchteinträge und Verbesserung der Verdunstung über die Fassaden wird deshalb hier nicht im Vergleich mit energieintensiveren Lösungen, sondern als energetisch oft einzig leistbare Alternative diskutiert.

Geregelte Belüftung mit natürlichem Antrieb

An jedem windangeströmten Gebäude entstehen natürliche Druckdifferenzen zwischen Luv- und Leeseite, also zwischen der dem Wind zugewandten und der dem Wind abgewandten Gebäudeseite. Wird zwischen der Überdruck- bzw. Luvseite und der Unterdruck- bzw. Leeseite eine Verbindung durch das Gebäude hergestellt, wird dieses zum Ausgleich der Druckverhältnisse von Außenluft durchströmt. Das heißt, das Gebäude wird ohne jeden Energieeinsatz, beispielsweise für Ventilatoren, witterungsabhängig durchlüftet. Gleichwohl ist eine klimageführte Regelung erforderlich, wo unter konservatorischen Gesichtspunkten lüftungsbedingte Verschlechterungen des Raumklimas ausgeschlossen werden müssen. In der einfachsten Auslegung sind dafür Sensoren für Temperatur und relative Feuchte in Zu- und Raumluft, sowie eine intelligente Steuerung erforderlich, welche zwei Ventilelemente in Zu- und Abluft immer dann synchron öffnet, wenn durch den Austausch von Raumluft und Außenluft das Raumklima verbessert

werden kann. Das ist bei dem hier betrachteten überfeuchteten Raumklima zunächst immer dann anzunehmen, wenn die Außenluft trockener ist als die Raumluft. Bei den vom Verfasser untersuchten Kirchen auf den Ostseeinseln Rügen und Usedom war dies zu etwa 50 % der Jahreszeit gegeben. Für die Regelung dieses Parameters ist lediglich ein Vergleich der Wassergehalte von Zu- und Raumluft erforderlich, welche aus den jeweiligen Messwerten von Temperatur und relativer Luftfeuchte errechnet werden können. Entsprechende Regelsysteme sind beispielsweise für die Lüftung von Kellern konfektioniert erhältlich. Mit jeder Zufuhr von Außenluft werden jedoch auch witterungsbedingte Temperatur- und Feuchteschwankungen in die Raumluft übertragen. Während dabei saisonale Schwankungen zu vernachlässigen sind, weil sie ohnehin – mit Abschwächung und Verzögerung durch die Gebäudehülle – das Klima nicht klimatisierter historischer Räume bestimmen, sind kurzzeitige Schwankungen schon durch die Häufigkeit ihres Auftretens konservatorisch hochrelevant. Ihre Begrenzung auf tolerable Werte stellt eine lösbare, aber deutlich anspruchsvollere Regelaufgabe dar. Grundsätzlich müssen hier gleitende – aus zurückliegenden Messwerten des Raumklimas ermittelte – Grenzwerte mit einem fiktiven, sich im Lüftungsfall aktuell einstellenden Raumklima verglichen werden. Dieses fiktive Raumklima kann aus den aktuellen Messwerten von Zu- und Raumluft, sowie geschätzten Luftwechselraten oder der simultan gemessenen Zuluftmengen errechnet werden. Letzteres würde zusätzlich einen Luftmengensensor für die Zuluft erfordern. Für die Vorhaltung der zurückliegenden Werte des Raumklimas, beispielsweise der gleitenden Minima und Maxima über die letzten 24 Stunden, ist außerdem ein Ringspeicher nötig – mehr aber nicht! Der Betriebsaufwand einer solchen Anlage bleibt, von dem vernachlässigbaren Energieaufwand