

Abschlußbericht

Projekttitlel	Sanierung der rückwärtigen Fassade der Schlosskirche Putbus auf Rügen unter Verwendung eines durch Klimamonitoring auf das ostseetypische Wechselklima optimierten Kalkputzes
Aktenzeichen	23213
Verfasser	Andreas Weiß, Dipl. Restaurator (HS) Architekten Johannsen + Partner, Hamburg
Projektbeginn	1.08.2005
Laufzeit	27 Monate
Ort	Putbus
Jahr	2007

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Bericht

Anlaß und Ziele des Projekts

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Putz- und Stuckinstandsetzung

Anstrich

Klimamonitoring

Grundlagen

Datenerfassung und Auswertung

Beurteilung der Verträglichkeit von Putz- und Klimaparametern

Ergebnisse

Charakteristik des Klimas am Standort Putbus im Meßzeitraum

Klimatische Belastung von Putzoberflächen

Frost–Tau–Wechsel Belastung

Schlagregen und Tauwasseranfall

Hygrothermische Belastung

Weitere Erkenntnisse zum Feuchtehaushalt des Putzes

Öffentlichkeitsarbeit

Quellenangaben

Anhang

Klimamessungen, Diagramme und Tabellen

Abb. A 1 Monatsmittel ausgewählter Klimawerte

Abb. A 2 Relative Feuchte im Nahfeld, statistische Verteilung

Abb. A 3 Temperatur im Nahfeld, statistische Verteilung

Abb. A 4 Wassergehalt der Luft im Nahfeld, statistische Verteilung

Abb. A 5 Schwankungsbreite des Wassergehaltes in 12 Stunden, statistische Verteilung

Abb. A 6 Frost – Tau – Wechsel Zyklen

Abb. A 7 Materialfeuchte bei Erreichen des Gefrierpunktes, statistische Verteilung

Abb. A 8 Monatliche Dauer der Tauwasserbildung im Vergleich mit der Schlagregendauer

Tabelle A 1 Datengrundlage für Abb. A 8

Abb. A 9 Übersättigung der Luft an den Oberflächen, statistische Verteilung

Abb. A 10 Monatliche Schlagregenbelastung der Westfassade

Abb. A 11 Theoretische relativen Feuchte an den Oberflächen, statistische Verteilung

Abb. A 12 Schwankungsbreite der theoretischen relativen Feuchte an den Oberflächen in 12 Stunden, statistische Verteilung

Abb. A 13 Oberflächentemperaturen, statistische Verteilung

Abb. A 14 Schwankungsbreite der Oberflächentemperaturen in 12 Stunden, statistische Verteilung

Abb. A 15 Materialfeuchte im Putz, statistische Verteilung

Abb. A 16 Schwankungsbreite der Materialfeuchte im Putz in 12 Stunden, statistische Verteilung

Tabelle A 2 Legende zu den Klimadiagrammen Abb. A. 17, S. 1 bis 55

Abb. A 17 Klimakurven aller relevanten Datenpunkte über den gesamten Meßzeitraum, Seiten 1 bis 55, den gedruckten Exemplaren des Berichts als pdf-Datei auf CD beiliegend.

Fehlerbetrachtung zu den Klimamessungen

Materialfeuchte

Oberflächentemperatur
Frost-Tau-Wechsel Zyklen
Schlagregendauer

Meßeinrichtung

- Abb. A 18 Anordnung der Meßstellen an den Fassaden
- Abb. A 19 Meßbrücke an der Westfassade
- Abb. A 20 Meßbrücke an der Ostfassade
- Abb. A 21 Meßbrücke an der Südfassade
- Abb. A 22 Einstellung der Regensensoren
- Abb. A 23 Datenlogger und Netzverteilerknoten Ostfassade
- Abb. A 24 Datenlogger und Netzverteilerknoten Westfassade
- Abb. A 25 Datenlogger und Netzverteilerknoten Südfassade

Anlagen

Anlage 1 – Untersuchungsbericht M 6008-04 MPA Bremen

Zusammenfassung

Bei der Sanierung historischer Mauerwerke kommen in der Regel Verputze mit Festigkeiten über P Ia zur Anwendung, da Luftkalkmörteln eine unzureichende Witterungsresistenz unterstellt wird. Auch die Standzeit härterer Verputze ist aber häufig durch Unverträglichkeit mit den weichen Mauerwerken eingeschränkt, die bei Erneuerung zementhaltiger Putze nicht selten beschädigt werden. Überdies ist schon die Herstellung zementärer bzw. hydraulischer Bindemittel energieintensiv. Ziel des Projektes sind deshalb die modellhafte Erfassung der klimatischen Belastungen einer mit Luftkalkputz sanierten Fassade unter den Bedingungen des kühl gemäßigten Wechselklimas der südlichen Ostseeküste, ferner die Beurteilung der langfristigen Verträglichkeit von Putz- und Klimaparametern, sowie flankierender Maßnahmen zur Erhöhung der Standzeiten von Luftkalkmörteln in der Region. Bei der Sanierung der Fassaden des rückwärtigen Anbaus der Schloßkirche zu Putbus wurden Putz- und Stuckergänzungen zur Erprobung der Witterungsfestigkeit in Luftkalkmörtel ausgeführt. Die Materialauswahl wurde auf Fertigmörtel mit Prüfzeugnis eingeschränkt, um die Übertragbarkeit der Projektergebnisse zu gewährleisten. Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlich exponierten Bauteile wurde ein einheitlicher Putz- und Anstrichaufbau angestrebt. Zur Verbreiterung der aus der natürlichen Bewitterung erwarteten Erkenntnisse wurden darüber hinaus Arbeitsproben in zwei weiteren Kalkmörtelsystemen angelegt. Nach Abschluß der Putz- und Anstricharbeiten wurden die klimatischen Belastungen von drei unterschiedlich ausgerichteten Fassaden mit identischen Meßaufbauten untersucht. Dabei wurden Frost-Tau-Wechsel, Schlagregen und Tauwasser, Temperatur- und Feuchteschwankungen an den Oberflächen, sowie der Feuchtehaushalt des Putzes im Jahreszyklus simultan überwacht. Die relevanten Daten wurden hinsichtlich der zeitlichen und statistischen Verteilung, sowie periodischer Schwankungen ausgewertet. Im Ergebnis liegen umfangreiche Erkenntnisse über die spezifischen klimatischen Belastungen vor, denen Luftkalkmörtel an der südlichen Ostseeküste unterworfen sind. Mit der erarbeiteten Datengrundlage sind somit Parameter für materialkundliche Untersuchungen, insbesondere für künstliche Bewitterungen verfügbar. Die statistische Auswertung der Klimawerte kann bei künftigen Maßnahmen zur präventiven Konservierung als Berechnungsgrundlage für die Abschätzung der Einflüsse des Außenklimas dienen. Da Ergebnisse der natürlichen Bewitterung der Arbeitsproben vor Ort im Projektzeitraum nicht zu erwarten waren, werden die Klimadaten mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen aus dem Projekt „Verarbeitungs- und Eigenschaftsanalyse der verwendeten Mörtel-Materialien bei der jüngsten Restaurierung des Bremer Rathauses“ abgeglichen, bei dem parallel die gleichen Mörtel zum Einsatz kamen. Zum Projektabschluß lagen diese Ergebnisse noch nicht vor.

Das Klima im Projektzeitraum war mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 12,5°C, 23 Frost- und 3 Eistagen verhältnismäßig mild, aber mit durchschnittlich 89,7 % relativer Feuchte extrem feucht. Selbst die Monatsmittel unterschreiten nur von April bis Juli die 80%-Grenze. An den Putzoberflächen kam es bei moderaten Temperaturschwankungen zu extremen Schwankungen der relativen Feuchte von bis zu 83%rF pro Tag. Sie stellen insbesondere bei latenter Belastung mit löslichen Salzen eine enorme Beanspruchung für poröse Baustoffe dar. Die Schlagregen- und Tauwasserbelastung der einzelnen Fassaden ist sowohl hinsichtlich der Jahressummen, als auch der monatlichen Verteilung sehr unterschiedlich. Dabei entspricht die jährliche Schlagregendauer nur etwa 2,3% der Perioden mit Tauwasserbildung, von denen die Ostfassade mit insgesamt 2928 Stunden am stärksten betroffen war. Während der Jahresgang und die mittlere relative Feuchte Klimadaten von Rügen und Usedom aus den Jahren 2002 bis 2006 entsprechen, liegen die mittlere Jahrestemperatur mehr als 3K über, Frost- und Eistage zwei Drittel unter dem langjährigen Durchschnitt am Standort Putbus. Die für die Instandsetzung der Fassaden gewählte Kombination von Putz- und Anstrichsystem reagiert auf die enorme Feuchtebelastung mit einem ausgeglichenen Feuchtehaushalt. Für hydrophobe bzw. kapillar inaktive Beschichtungen poröser Bauoberflächen besteht in der Region auch an massiven Fassaden ein hohes Risiko für mikrobiellen Besiedelung.

Bericht

Anlaß und Ziele des Projekts

Der 1844 bis 1846 nach Plänen von August Stüler und Johann Gottfried Steinmeier erbaute Kursalon des Fürsten zu Putbus wurde 1891/ 92 zur Schloßkirche umgebaut. Dabei blieb der südliche Anbau unverändert erhalten. Bei einer Restaurierung 1967 [Dehio 1968] wurden Teile des Fassadenstücks und der Putzflächen in Zementmörtel erneuert, größtenteils blieb jedoch der bauzeitliche Putz- und Stuckbestand erhalten, der in einem relativ bindemittelarmen Kalkmörtel ausgeführt war [Schlütter 2004].

Zu Projektbeginn wiesen allerdings insbesondere die Süd- und Westseite großflächige Abwitterungen und Verluste des bauzeitlichen Putz- und Stuckbestandes auf. Diese Schäden sind symptomatisch für eine Vielzahl von Kalkputzfassaden aus der Mitte des 19. Jahrhunderts in der Region.

Die Schäden an den Fassaden der Schloßkirche Putbus sind¹ nicht auf die technologischen Parameter des Kalkputzes, bzw. technologische Fehler beim Putzauftrag, sondern auf in jüngster Zeit aufgetretene oder veränderte äußere Einflüsse zurückzuführen. Schäden in der Dachentwässerung können aufgrund der flächigen Verteilung der Putzschäden als alleinige Schadensursache ausgeschlossen werden. Eine Veränderung der Bewitterungssituation durch Änderungen der Bebauungs- und Bepflanzungssituation im nahen Umfeld (denkmalgeschützter Schloßpark) kann ebenfalls ausgeschlossen werden [UdschuB 2007]. Somit sind Veränderungen der regional vorherrschenden Klimabedingungen als Ursache für die Putzschäden zu vermuten.

Der Standort Putbus ist innerhalb der kühl gemäßigten Klimazone von dem für die südliche Ostseeküste typischen Wechselklima betroffen, in dem es zur Überlagerung des Seeklimas und des kontinentalen Klimas kommt. Dies führt sowohl zur Addition der spezifischen Klimawirkungen, als auch zu periodischen Wechseln zwischen beiden Klimaten im Jahreszyklus. Hinsichtlich der klimatischen Belastungen für den Gebäudebestand ist die Region deshalb weder mit Standorten im reinen Seeklima, noch mit Standorten im ausgeprägten Kontinentalklima zu vergleichen. Durch die Wechsel zwischen beiden Klimaten werden die insgesamt zu verkraftenden Feuchte- und Temperaturspektren vergrößert und die Streßbelastung durch Klimaschwankungen erhöht.

Bei der Sanierung historischer, in Luftkalkmörtel gesetzter Mauerwerke kommen in der Regel Verputze mit Festigkeiten über P Ia zur Anwendung, da Luftkalkmörteln per se eine unzureichende Witterungsbeständigkeit unterstellt wird. Die Standzeit härterer Verputze auf weichen Mauerwerken ist jedoch durch die Gefahr von Rißbildungen mit nachfolgenden, auch das Mauerwerk betreffenden Frostschäden eingeschränkt. Die Erneuerung zementhaltiger Putze ist nicht selten mit Beschädigungen des Mauerwerks verbunden.

¹ im Ergebnis der durch Dr. Schlütter/ MPA Bremen durchgeführten Untersuchungen [Schlütter 2004]

Neben den o.a. Problemen bei der Verwendung in historischer Bausubstanz haben zementäre bzw. hydraulische Bindemittel auch einen höheren Energiebedarf bei der Herstellung.

Ziel des Projektes sind deshalb die modellhafte Erfassung der spezifischen klimatischen Belastungen einer mit Luftkalkputz sanierten Fassade unter den Bedingungen des für die südliche Ostseeküste typischen Wechselklimas, die Beurteilung der langfristigen Verträglichkeit der Putz- und Klimaparameter, sowie die Bestimmung geeigneter flankierender Maßnahmen zur Erhöhung der Standzeiten von Luftkalkmörtel in der Region.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Putz- und Stuckinstandsetzung

Die Fassaden des rückwärtigen Anbaus der Schloßkirche Putbus wurden im Bestand saniert. Den denkmalpflegerischen Vorgaben entsprechend wurde an den Putzflächen, sowie an den plastischen Stukkaturen nach jeweils abgestuften Konzepten vorgegangen. In den Glattputzflächen wurden nur intakte Bereiche im Bestand erhalten, an den Stukkaturen auch beschädigte Bereiche konserviert. Dabei kam das KSE-Modulsystem der Fa. Remmers zum Einsatz.

Bei der Ergänzung der Putzflächen und Stuckelemente sollten einheitliche Materialien und Aufbauten verwendet werden, um eine Vergleichbarkeit bei der Beurteilung der Standfestigkeit in unterschiedlicher Witterungsexposition zu gewährleisten. Für die Auswahl des Ergänzungsmörtels waren objektseitig zunächst folgende Parameter zu beachten:

- Niedrige Druckfestigkeiten zur Vermeidung von Folgeschäden im Originalbestand;
- Eignung sowohl für Glattputz, als auch für gezogenen Anstrich.

Um die Modellhaftigkeit der Projektergebnisse zu gewährleisten, war darüber hinaus die Verfügbarkeit als Fertigmörtel mit Prüfzeugnis für die Anwendung „nach anerkannten Regeln der Technik“ durch Handwerksbetriebe geboten.

Da sich die Druckfestigkeiten und E-Moduli mit steigenden hydraulischen Bindemittelanteilen erhöhen [Winnefeld 1996], wurde auf Materialien ohne hydraulische Bindemittelkomponenten orientiert. Marktüblich waren zu Projektbeginn lediglich vier laut Deklaration rein luftkalkgebundene Produkte, Rajasil Brandenburger Putz, Rajasil Luftkalkputz, Solubel Luftkalkmörtel und Baltus Muschelkalk [Rajasil 1, Rajasil 2, Solubel 2003]. Letzterer wurde ausgeschlossen, da die zu erwartenden Druckfestigkeiten von bis zu 7N/mm² [Schlütter 2000] für Ergänzungen an historischen Luftkalkmörteln ungeeignet sind und mikroskopische Untersuchungen auf hydraulische Bindemittelanteile schließen lassen [Schlütter 2000]. Von den verbleibenden Produkten wurde Solubel Luftkalkmörtel aufgrund des laut Deklaration geringsten Anteils an hydraulischen Zuschlägen ausgewählt. Darüber hinaus versprach Solubel aufgrund seines hohen Grobporenanteils die beste Frost-Tau-Wechselbeständigkeit.

Anwendung und Putzaufbau erfolgten nach Herstellervorschrift in folgenden Arbeitsgängen:

- Grundierung der freigelegten und gereinigten Untergründe durch Einsprühen mit 4%-iger Tonerdelösung
- Vorspritzen der frisch grundierten Flächen mit Solubel Luftkalkmörtel Körnung 6 mm (Haftspritzbewurf, dünn und vollflächig)
- Egalisierung von Untergrundvertiefungen mit Solubel Luftkalkmörtel Körnung 6 mm, nach ausreichender Ansteifung Aufrauen der Putzoberfläche für Carbonatisierung und nachfolgende Putzhaftung; max. Schichtstärke 25 mm, bei größeren Vertiefungen mehrlagiger Aufbau.
- Grundputz mit Solubel Luftkalkmörtel Körnung 4 mm mit einer mittleren Schichtstärke von ca. 15 mm, nach ausreichender Ansteifung Aufrauen der Putzoberfläche für Carbonatisierung und nachfolgende Putzhaftung;
- Oberputz mit Solubel Luftkalkmörtel 2 mm Körnung, abgefilzt, Schichtstärke ca. 10 mm.
- Feinzug auf Gesimsen mit Solubel Kalkglätte 0-0,5mm

Zur Verbreiterung der aus der natürlichen Bewitterung erwarteten Erkenntnisse wurden darüber hinaus Arbeitsproben in zwei weiteren Kalkmörtelsystemen angelegt. Die Arbeitsproben befinden sich an den Pfeilervorlagen, die den südlichen Anbau der Schloßkirche von den Seitenschiffen abgrenzen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit den Fassaden wurden die Arbeitsproben in Nord- Süd- und Westausrichtung angebracht und mit einem gezogenen Gesims versehen. Dabei wurden folgende Putzaufbauten hergestellt:

System 1

1. Lage: ca. 15mm Rajasil Brandenburger Putz grob (4mm Größtkorn)
2. Lage: ca. 10mm Rajasil Brandenburger Putz mittel (2mm Größtkorn)
3. Lage: ca. 7mm Rajasil Brandenburger Putz fein (1mm Größtkorn)

System 2

1. Lage: voll deckend Rajasil Luftkalkputz grob (ca. 3,5mm Größtkorn)
2. Lage: ca. 15mm Rajasil Luftkalkputz grob
3. Lage: ca. 10mm Rajasil Luftkalkputz fein (ca. 1,5mm Größtkorn)

Die Putzarbeiten waren im November 2005 im wesentlichen abgeschlossen.

Anstrich

Zur Wahrung der Gewährleistungsansprüche des Auftraggebers war ein Anstrich der Fassaden nach Abschluß der Carbonatisierung der Putzergänzungen erforderlich. Aufgrund des Abschlusses der Putzarbeiten im Spätherbst und der zu diesem Zeitpunkt noch ungenügenden Carbonatisierung des Putzes wurden die Anstricharbeiten erst im Frühjahr 2006 aufgenommen.

Bei der Auswahl des Anstrichsystems mußte auf den bereits in Dispersionssilikatfarbe gestrichenen Obergaden das Hauptschiffes Rücksicht genommen werden. Um einer optischen Differenzierung der einzelnen Gebäudeteile infolge unterschiedlichen

Verwitterungsverhaltens vorzubeugen, wurde zunächst die Verwendung vergüteter Kalkanstriche ausgeschlossen. Hinsichtlich der klimatischen Anforderungen an das Anstrichsystem war zwischen wasserabweisenden Systemen zum Schutz des Putzes vor Schlagregen und kapillaraktiven Systemen zur Vermeidung von mikrobieller Besiedelung der Oberflächen durch Tauwasserbildung abzuwägen [Künzel 2006]. Aufgrund der Ergebnisse eines vorangegangenen Klimamonitorings an der ca. 15Km entfernten Marienkirche in Bergen [Weiß 2006] war zu vermuten, daß die Kondensatbelastung der Oberflächen die Schlagregenbelastung übersteigt. Deshalb fiel die Entscheidung für ein silikatgebundenes System. Verbliebene Altputze mit Anstrichresten erforderten nach Herstellervorschrift die Anwendung eines Dispersionssilikat-Systems.

Klimamonitoring

Grundlagen

Die klimatischen Wechselwirkungen an der Oberfläche von Außenbauteilen werden u.a. durch die Klimawerte der Luft im Nahfeld, die Sonneneinstrahlung, die Schlagregen- und Windbelastung, sowie die Temperatur und die Feuchte der Bauteiloberfläche bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich an der Bauteiloberfläche ein Mikroklima ausbildet, welches durch zahlreiche spezifische Gebäudeparameter bestimmt wird (Aufbau, Material, Ausrichtung und Neigung des Bauteils; Neigung, Bebauung, Topographie bzw. Vegetation des Umfeldes etc.). Dieses Mikroklima kann in einzelnen Werten entscheidend vom lokalen bzw. regionalen Klima abweichen. Deshalb sind für die Beurteilung der klimatischen Wechselwirkungen an Bauteiloberflächen Messungen der relevanten Klimaparameter am Bauteil erforderlich.

Datenerfassung und Auswertung

Für die Erfassung relevanter Klimawerte wurde ein elektronisches Meßnetz mit jeweils identischer Sensorkonfiguration an Ost-, Süd- und Westfassade installiert (Abb. A 18 bis 21). Die Installation erfolgte nach Abschluß der Malerarbeiten, um eine Verfälschung der Messung durch die Einflüsse des Baugerüsts auf das Mikroklima an den Fassaden auszuschließen. Bei der Auswahl der Meßstellen wurden folgende Parameter in Rangfolge der Aufzählung berücksichtigt:

- Messung im Bereich von Putzergänzungen;
- Vergleichbare Witterungsexposition (Regenverschattung durch Gesimse/ Überstände, Verschattung durch Bäume);
- Gleiche Höhe am Gebäude.

An den Meßstellen wurden jeweils folgende Meßwerte registriert:

Datenpunkte	Sensoren/ Meßaufbauten
Relative Feuchte und Temperatur der Luft im Nahfeld	Kombinierter Klimasensor in mechanisch belüfteter Wetterhütte mit Strahlungsschutz, relative Feuchte kapazitiv, Temperatur mit Thermistor.
Relative Feuchte und Temperatur an der Putzoberfläche	Kombinierter Klimasensor in Meßkammer auf der Oberfläche mit 22mm Durchmesser. Die gegen direkte Erwärmung durch Sonneneinstrahlung abgeschirmte Meßkammer wurde mit Gummilippen an der Oberfläche angedichtet um einen direkten Austausch mit der Umgebungsluft, sowie das Eindringen von Regenwasser zu verhindern. Um dem Aufbau von „Feuchtedepots“ entgegenzuwirken, wurden die Meßkammern auf der dem Sensor abgewandten Seite geringfügig geöffnet.
Schlagregendauer an der Putzoberfläche	Digitaler Regensensor
Relative Materialfeuchte im Putz bis ca. 2,5cm Tiefe	Kapazitive Messung über die Dielektrizitätskonstante des Wassers

Tabelle 1 Meßgrößen und eingesetzte Sensoren

An der Westseite wurde zusätzlich die Schlagregenmenge registriert. Dazu wurde ein Ombrometer nach Hellmann mit elektronischer Zählleinrichtung mit einem vertikalen Auffangpaneel umgerüstet.

Zur Erfassung der jahreszeitlichen Schwankungen des Klimas wurden die Messungen über einen Jahreszyklus durchgeführt. Speicherintervalle von 10 Minuten sicherten dabei die Erfassung kurzzeitiger Schwankungen, die zwar den durchschnittlichen Klimaverlauf kaum beeinflussen, aufgrund der schnellen Reaktion löslicher Salze jedoch extrem gefährlich werden können.

Aus den Werten der Meßpunkte wurden weitere, für die Beurteilung der klimatischen Belastung der Fassaden erforderliche Datenpunkte berechnet. Das klimatische Gefahrenpotential wird durch die Schwankungsbreite (Magnituden), die Frequenz von Klimaschwankungen sowie die statistische Verteilung der absoluten Werte determiniert. Für die Klimawerte, die das hygrothermische Verhalten von Bauteiloberflächen direkt beeinflussen, wurden deshalb nicht nur die jahreszeitlichen bzw. saisonalen Schwankungen, sondern auch die tägliche Schwankungsbreite betrachtet. Dazu wurde jeweils die gleitende Änderung innerhalb der letzten 12 Stunden berechnet. Ein Überblick über sämtliche Datenpunkte, sowie die Ableitung der Rechenwerte ist Abb. 1 zu entnehmen.

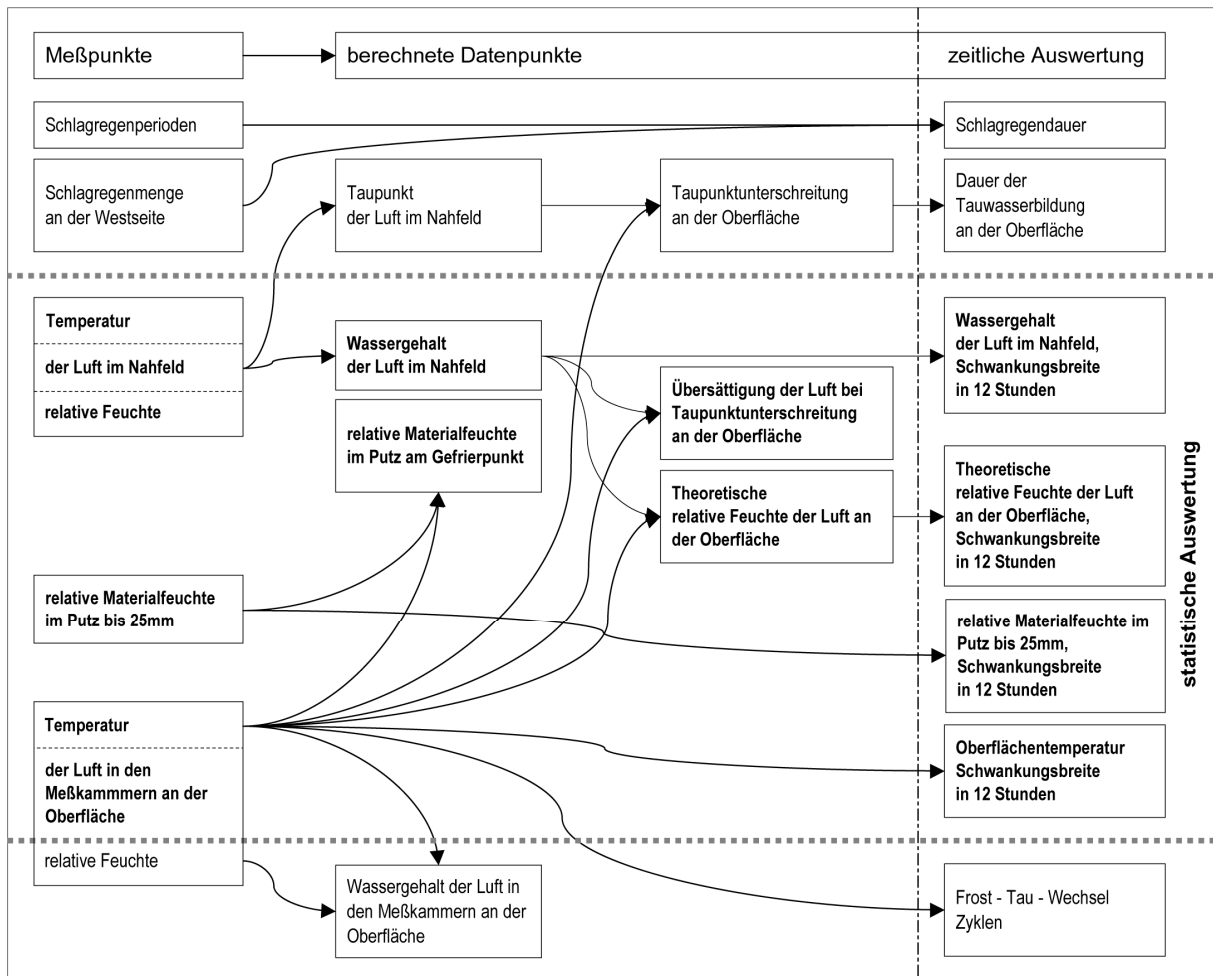


Abb. 1 Schema der Datenermittlung und Datenauswertung²

Die statistische Verteilung der Meßwerte wurde nach dem Schema in Tabelle 2 ermittelt und in sogenannten Boxplot Diagrammen dargestellt:

² Der Wassergehalt kann als absolute Feuchte in g/m^3 oder als Mischung in g/kg angegeben werden. Da die absolute Feuchte (das Gewicht des in einem Volumen feuchter Luft enthaltenen Wasserdampfes) vom Luftdruck abhängig ist, wird zur Vereinfachung der Messung die Mischung (das Massenverhältnis zwischen trockener Luft und des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes) erfaßt.

	Meßwerte	Stunden	Meßwerte	Meßwerte
Maximum	ca. 500	ca. 83		
99% Fraktile	ca. 4.500	ca. 750		
90% Fraktile	ca. 7.500	ca. 1.250		
oberes Quartil	ca. 12.500	ca. 2083	ca. 25.000	ca. 40.000
Median				
unteres Quartil				
10% Fraktile	ca. 25.000	ca. 4167		
1% Fraktile				
Minimum				
Gesamt	ca. 50.000	ca. 8.333		

Tabelle 2 Datenverteilung in den Boxplots

Zwischen der 1% Fraktile und dem Minimum bzw. der 99% Fraktile und dem Maximum liegen bei einer Datengrundlage von ca. 50.000 Meßwerten pro Datenpunkt also immer noch 500 Meßwerte entsprechend ca. 83 Stunden. Insofern sind auch diese Extremwerte nicht vernachlässigbar, zumal sie auch bei kurzzeitigem Erreichen ein enormes Schadenspotential haben können.

Beurteilung der Verträglichkeit von Putz- und Klimaparametern

Erkenntnisse über erforderliche Optimierungen technologischer Mörtelparameter zu deren Anpassung an die klimatische Belastung in der Region können aus materialkundlichen Untersuchungen und Bewitterungsversuchen gewonnen werden. Die Folgen der natürlichen Bewitterung der Fassaden und Arbeitsproben vor Ort werden erst nach mehreren Jahren auswertbar sein. Auf die künstliche Bewitterung von Arbeits- und Materialproben, sowie weitergehende materialkundliche Untersuchungen wurde unter dem Gebot der sparsamen Mittelverwendung verzichtet, da im Rahmen eines parallel laufenden Forschungsprojekts über das Langzeitverhalten von Kalkmörteln am Bremer Rathaus diese Untersuchungen auch an den in Putbus verwendeten Mörteln bereits vorgenommen wurden [MPA Bremen 2007].

Die Ergebnisse des Bremer Projektes wurden jedoch nicht, wie vorgesehen, im Putbusser Projektzeitraum veröffentlicht, so daß eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen des Klimamonitorings und eine Ableitung eventuell erforderlicher Optimierungen und flankierender Maßnahmen zur Verbesserung der Standzeit des Putzes zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen müssen.

Ergebnisse

Charakteristik des Klimas am Standort Putbus im Meßzeitraum

Die hier vorgestellten Ergebnisse repräsentieren zunächst das Klima im Projektzeitraum. Während der Jahresgang und die durchschnittliche relative Feuchte etwa den Messungen des Verfassers in Bergen 2005/2006 und Mellenthin/ Usedom 2002/ 2003 entsprechen, liegt die mittlere Jahrestemperatur mehr als 3K über dem langjährigen Mittel. Auch Frost- und Eistage entsprechen nur etwa einem Drittel des langjährigen Durchschnitts [Wetter online 2007]. Weiterführend somit ist eine vergleichende Bewertung des Klimas im Projektzeitraum anhand historischer Klimadaten sinnvoll. Dies war im Rahmen des Projektes nicht zu leisten da zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit mit den für Putbus ab 1854 vorliegenden historischen Klimadaten (u.a. [van Bebbber], [Rentel 2007]) umfangreiche Umrechnungen erforderlich sind.

Das aufgezeichnete Klima ist mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 12,5°C, 23 Frost- und 3 Eistagen verhältnismäßig mild, aber mit einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 89,7 %rF extrem feucht. Selbst die Monatsmittel unterschreiten nur von April bis Juli die 80%-Grenze. Der hohe Feuchte widerspiegelt auch ein durchschnittlicher Wassergehalt der Luft von 7,4 g/Kg. Dabei fallen Maximum und Minimum der Montasmittel mit den entsprechenden Temperaturwerten im August und im Februar zusammen. Bemerkenswert ist ein Anhalten des niedrigen Wassergehaltes bis in den April, was bei den zu diesem Zeitpunkt schon deutlich gestiegenen Temperaturen zu dem tiefsten Monatsmittel der relativen Feuchte führt. Auch die niedrigsten gemessenen Einzelwerte fallen in diesen Zeitraum³.

Während der Abstand zwischen dem jährlichen Temperaturminimum und –maximum mit 38,2K moderat ausfällt, sind jährliche Feuchteschwankungen von über 82%rF enorm. Sie werden durch den Wechsel von maritim und kontinental beeinflussten Klimaperioden verursacht. Infolge regelmäßig durchziehender atlantischer Tiefausläufer sind jedoch auch die täglichen Feuchteschwankungen sehr hoch.

Klimatische Belastung von Putzoberflächen

Frost–Tau–Wechsel Belastung

Im Meßzeitraum wurden von Anfang November bis Ende März zwischen 23 und 26 Frost-Tau-Wechsel Zyklen registriert⁴. Diese Zahlen liegen zwar im Rahmen der Frosttage, jedoch sind insbesondere an der Süd- und Westfassade häufig mehrere Frost-Tau-Wechsel an einem Tag zu verzeichnen⁵.

³ (Abb. A 17, Seite 48)

⁴ (Abb. A 6; A17, S. 22, 30, 34 bis 39, 42)

⁵ (Abb. A 17, S. 22, 34, 36, 38)

Der Feuchtegehalt der Putze beim Erreichen des Gefrierpunktes liegt im Mittel mit 2,7 bis 4,3 Volumenprozent im Bereich der Jahresmittel der Materialfeuchten insgesamt. Selbst die Höchstwerte liegen mit 3,9 bis 8,6 Volumenprozent⁶ deutlich unter den Maxima der Materialfeuchten im gesamten Meßzeitraum von 9,7 bis 19 Volumenprozent⁷. Feuchtegehalte über 3,1 bis 5,3 Volumenprozent bei Erreichen des Gefrierpunktes sind aufgrund der geringen Gesamtzahl der Frost – Tau – Wechsel Zyklen als Einzelereignisse zu werten, die nicht verallgemeinert werden können. Sie traten vor allem nach vorangegangenen Regenereignissen⁸ bzw. durch Vereisung der Oberfläche⁹ auf, vereinzelt jedoch auch durch Sorption bzw. Betauung¹⁰.

Die Frost-Tau-Wechsel Belastung ist aufgrund höherer Ausgangsfeuchten auf der Ostseite am größten¹¹. Insgesamt ist sie aber als gering einzustufen.

Schlagregen und Tauwasseranfall

Die Dauer der Schlagregen- und Tauwasserbelastung ist an den einzelnen Fassaden sehr unterschiedlich¹². Während die Jahressummen mit 87 Stunden Schlagregen und 2928 Stunden Tauwasserbildung für die Ostwand am höchsten ausfallen, wird das Maximum der monatlichen Schlagregendauer auf der Westwand mit 23,5 Stunden im Januar erreicht. In den Monaten April und Juli wurde dagegen auf der Ost- und Südfassade überhaupt kein Schlagregen registriert¹³. Auf diesen Monate entfallen auch die kürzesten Betauungszeiten, das Minimum wurde mit im April mit 0,7 Stunden auf der Südwand registriert. Die höchsten monatlichen Betauungszeiten entfallen auf November und Dezember, das Maximum wurde im Dezember mit 477 Stunden auf der Ostseite erreicht.

Die Südwand hat sowohl in den Jahressummen von 16 Stunden Schlagregen und 1782 Stunden Tauwasserbildung, als auch in fast allen Monatswerten die niedrigste Feuchtebelastung.

Die an der Westwand gemessenen Schlagregenmengen korrelieren im wesentlichen mit der Schlagregendauer. Die Jahresmenge beträgt 54,4l, die mit Abstand größte monatliche Menge von 19,4l wurde im Januar registriert¹⁴.

Während zeitlich gesehen, die Schlagregenperioden nur etwa 2,3% der Tauwasserperioden entsprechen, ist eine Aussage über die jeweils vom Putz aufgenommenen Wassermengen sehr viel schwieriger. Schlagregenereignisse spiegeln sich in sprunghaften Erhöhungen der Materialfeuchte wieder, die in der Regel jedoch innerhalb eines Tages auf den Ausgangswert

⁶ (Abb. A 7)

⁷ (Abb. A 15)

⁸ (Abb. A 17, Seiten 34 und 38)

⁹ (vgl. Abschnitt „Materialfeuchte“ unter „Fehlerbetrachtung zu den Klimamessungen“, sowie Abb. A 17, Seite 34)

¹⁰ (beispielsweise a 28.2.07, Abb. A 17, S. 39)

¹¹ (Abb. A 7)

¹² (Abb. A 8, Tabelle A1)

¹³ (vgl. Abschnitt „Schlagregendauer“ unter „Fehlerbetrachtung zu den Klimamessungen“ im Anhang)

zurückfällt. Das Regenwasser wird also vom Putz aufgenommen, jedoch relativ schnell wieder verdunstet bzw. an das Mauerwerk abgegeben. Folgt auf ein Schlagregenereignis eine Betauungsperiode, wird zumindest die Abtrocknung des Putzes verzögert¹⁵. Auch unabhängig von Schlagregenereignissen korrelieren Betauungsperioden mit Anstiegen der Materialfeuchte. Diese können jedoch sowohl durch die kapillare Aufnahme von Oberflächenkondensat, als auch durch sorptive Feuchtaufnahme verursacht worden sein. Eindeutige Hinweise für die Aufnahme von Oberflächenkondensat liefern jedoch Anstiege der Materialfeuchtekurven während andauernder Betauungsperioden, die mit dem Grad der Übersättigung der Luft an der Oberfläche korrespondieren¹⁶. Während die höchsten Monatsmittel der Materialfeuchte an der Westwand mit den höchsten Schlagregenmengen im Januar übereinstimmen, folgen die Monatsmittel der Materialfeuchte auf der Ostseite den monatlichen Betauungsperioden¹⁷. Dabei könnte es sich jedoch auch um die Abbildung der sorptiven Feuchtaufnahme handeln.

Auch wenn die größten monatlichen Summen der Betauungsperioden in die kalten Monate November, Dezember und Februar fallen, besteht in der Region für hydrophobierte bzw. kapillar inaktive Fassadenbeschichtungen auch auf Massivmauerwerken¹⁸ ein hohes Risiko für mikrobielle Besiedlungen: bereits im Oktober werden Summen von bis zu 330 Stunden bzw. 14 Tagen Betauung erreicht.

Hygrothermische Belastung

Die Beurteilung der hygrothermischen Belastung erfolgt auf der Basis der Temperaturen an der Putzoberfläche. Diese zeigen aufgrund der Einflüsse von Sonneneinstrahlung an Tag und langwelliger Abstrahlung in der Nacht deutlich größere Schwankungen, als die Lufttemperatur im Nahfeld¹⁹.

Datenpunkt	Süden		Osten		Westen	
	12 Std.	gesamt	12 Std.	gesamt	12 Std.	gesamt
	90,23	0,1	90,24	10,1	90,25	20,1
Quartile	5,39	12,02	4,68	11,50	5,05	12,15
90% - 10%	10,58	19,67	8,14	18,57	12,46	20,37
99% - 1%	17,20	35,28	14,82	32,90	20,87	38,56
Maximum - Minimum	22,72	44,40	19,49	43,66	26,91	48,19

Tabelle 3 Temperatur an der Putzoberfläche, Vergleich der Interquantilabstände der Schwankungsbreiten in 12 Stunden mit den Interquantilabständen des gesamten Meßzeitraums in Kelvin.

¹⁴ (Abb. A 10)

¹⁵ (Abb. A 17, S. 9, 11 bis 14, 18, 20, 21, 25, 29, 37, 39, 52)

¹⁶ (Abb. A 17, S. 18, 32)

¹⁷ (Abb. A 1)

¹⁸ (Obwohl die Meßstelle an der Ostfassade in einem beheizten Gebäudebereich lag, war hier Tauwasserbelastung am größten. Offenbar ist der Wärmegewinn von Innen aufgrund der Mauerstärken von 85cm zu vernachlässigen)

¹⁹ (vgl. Abb. A 3, A 13 und A 14)

Aus den Temperaturunterschieden an der Oberfläche ergeben sich auch Abweichungen in der relativen Feuchte der Luft an der Grenzschicht zur Oberfläche, durch die das Sorptionsverhalten poröser Baustoffe, sowie das Kristallisationsverhalten von Salzen im Porenraum bestimmt wird. Auch hier sind somit die Schwankungen und die Magnituden größer, als im Nahfeld²⁰. An der Ostseite wird eine jährliche Schwankungsbreite von über 90 %rF erreicht und auch an den anderen Seiten liegen die Extremwerte noch unter 15 %rF. Die täglichen Schwankungen liegen bei 50% aller Werte im Bereich von maximal 26% rF. An 104 Tagen (entsprechend 30% der Werte) liegen die täglichen Schwankungen jedoch bereits zwischen 25%rF und über 48%rF. Extreme tägliche Schwankungen von 57%rF bis 83% rF wurden immer noch für 7 Tage festgestellt.

Datenpunkt	Süden		Osten		Westen	
	12 Std.	gesamt	12 Std.	gesamt	12 Std.	gesamt
		90,79	90,67	90,80	90,71	90,81
Quartile	25,67	25,37	24,70	26,83	25,21	25,10
90% - 10%	42,94	47,53	40,56	44,96	48,48	47,73
99% - 1%	59,64	71,33	56,57	66,20	68,65	76,55
Maximum - Minimum	74,88	87,75	79,34	90,19	83,16	85,61

Tabelle 4 Theoretische relative Feuchte an der Putzoberfläche, Vergleich der Interquantilabstände der Schwankungsbreiten in 12 Stunden mit den Interquantilabständen des gesamten Meßzeitraums in %rF.

Die Belastung der Putze durch Feuchteschwankungen ist somit sehr hoch. Insbesondere im Falle einer Belastung mit löslichen Salzen ist die Überlebensdauer eines Luftkalkmörtels entscheidend von seinem Luftporenanteil und der Porenradienverteilung abhängig. Während im Jahresverlauf an der Ostseite die extremsten Werte erreicht werden, ist die Belastung durch tägliche Schwankungen an der Westseite am größten und an der Ostseite am geringsten. Selbst in der Periode der größten Trockenheit Ende April/ Anfang Mai gibt es nächtliche Tauwasserbildung²¹

Weitere Erkenntnisse zum Feuchtehaushalt des Putzes

Änderungen der Materialfeuchte werden abgesehen von Schlagregenereignissen, nachweislichen Kondensateinträgen²² wesentlichen durch das Sorptionsgleichgewicht mit der Umgebungsluft bestimmt. Auch in Perioden ohne direkte Sonneneinstrahlung zeigt die Materialfeuchte eine klare Affinität zur theoretischen relativen Feuchte an der Oberfläche²³.

²⁰ (vgl. Abb. A 3, A 11 und A 12)

²¹ (Abb. A 17, S. 47 bis 49)

²² (siehe Abschnitt „Schlagregen und Tauwasseranfall“)

²³ (vgl. Abb. A 17, S. 25/26: Ostseite von 23. bis 27.11.06, sowie S. 27: Am 4.12.06 wird das Temperaturmaximum an der Ostseite gegen 13:00 erreicht, die Erwärmung ist somit eindeutig nicht durch direkte Sonneneinstrahlung hervorgerufen worden.)

Die Erwärmung der Oberflächen durch direkte Sonneneinstrahlung verursacht unmittelbar ein Absinken der Materialfeuchte durch Verdunstung. Auslöser ist jedoch auch dabei die plötzlich absinkende relative Feuchte an der Oberfläche. Mit der Abkühlung der Oberfläche nach dem Sonnendurchgang erfolgt eine Erhöhung der Materialfeuchte durch sorptive Feuchteaufnahme.

Die täglichen Schwankungen der Materialfeuchte liegen im Mittel zwischen 0,2 Volumenprozent auf der Süd- und Westseite und 0,4 Volumenprozent auf der Ostseite²⁴. größere Schwankungen bis über 15 Volumenprozent werden in der Regel durch Schlagregen bzw. Meßfehler aufgrund oberflächlicher Vereisung hervorgerufen²⁵. Die höheren Schwankungen auf der Ostseite korrelieren mit einem deutlich über den Werten der anderen Fassaden liegenden Jahresmittel von 4 Volumenprozent Materialfeuchte. Das niedrigste Jahresmittel wurde mit 2,7 Volumenprozent an der Südwand bestimmt.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die für die Instandsetzung der Fassaden gewählte Kombination von Putz- und Anstrichsystem auf die enorme Feuchtebelastung mit einem ausgeglichenen Feuchtehaushalt reagiert.

Öffentlichkeitsarbeit

Der vorliegende Abschlußbericht wird über die Online-Datenbank hericare des Hornemann – Instituts des Fachbereichs Konservierung und Restaurierung der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen öffentlich zugänglich gemacht. Weitere Publikationen von Projektergebnissen, sowie deren Verbreitung auf Fachvorträgen sind vorgesehen. Der Verfasser wird im Rahmen seiner Tätigkeit im Baltic Sea Region Network on Indoor Climate in Churches Denkmalpflegeexperten aus dem Ostseeraum über die Projektergebnisse informieren. Der Verfasser wird überdies die erarbeiteten Ergebnisse zur klimatischen Belastung von Kalkputzen in der Region im Rahmen seiner Tätigkeiten im Technischen Komitee „Erhaltung des kulturellen Erbes“ bei der Europäischen Normungsorganisation, sowie in der WTA Arbeitsgruppe 6.12 „Klima und Klimastabilität in historischen Räumen“ bei der Erarbeitung von nationalen und Europäischen Standards berücksichtigen.

Auf die im Rahmen des Projektes gewonnene Datengrundlage über das Klima der südlichen Ostseeküste kann bei zukünftigen materialkundlichen Untersuchungen zurückgegriffen werden. Insbesondere liegen somit Parameter zur Simulation von Klimabedingungen bei Prüfungen zur Beständigkeit von Materialien in der Region vor.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung bilden eine Grundlage für die Abschätzung von Klimawirkungen bei der Planung präventiver Konservierungsmaßnahmen.

Eine erste Beurteilung der Verträglichkeit technologischer Parameter der verwendeten Mörtel mit den vor Ort ermittelten Klimadaten erfolgt nach Vorliegen der Ergebnisse des

²⁴ (vgl. Abb. A 16)

Forschungsprojekts „Verarbeitungs- und Eigenschaftsanalyse der verwendeten Mörtel-Materialien bei der jüngsten Restaurierung des Bremer Rathauses“. Die Folgen der freien Bewitterung der Arbeitsproben vor Ort werden langfristig beobachtet. Ggf. erforderliche Optimierungen des Putzes bzw. flankierende Schutzmaßnahmen können abgeleitet werden, sofern diese Untersuchungen Schwachpunkte bzw. Unverträglichkeiten offenbaren.

²⁵ (vgl. Abschnitt „Materialfeuchte“ unter „Fehlerbetrachtung zu den Klimamessungen“ im Anhang)

Quellenangaben

- Dehio 1968 Dehio, G.. Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler. Neubearbeitung durch die Arbeitsstelle für Kunstgeschichte bei der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Die Bezirke Neubrandenburg, Rostock, Schwerin. Berlin 1968, S. 290 ff.
- MPA Bremen 2007 Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen. Forschungsprojekt. Verarbeitungs- und Eigenschaftsanalyse der verwendeten Mörtel-Materialien bei der jüngsten Restaurierung des Bremer Rathauses. Online im Internet unter <http://www.mpa-bremen.de/forsch/for0053.php> 23.02.2007
- Künzel 2006 Künzel, H. M., Fitz, C.. Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen. In: Gänßmantel, J. (Hrsg.). Ganzheitliche Bausanierung und Bauwerkserhaltung nach WTA, Sonderheft zum Hindelanger Baufachkongress. München 2006. S. 67 ff.
- Rajasil 1 Rajasil Bausanierung. Technisches Merkblatt 04.07 Rajasil Brandenburger Putz. Marktredwitz
- Rajasil 2 Rajasil Bausanierung. Technisches Merkblatt 04.07 Rajasil Luftkalkputz. Marktredwitz
- Rentel 2007 Rentel, W.. Historische Wetterdaten. Online im Internet unter http://www.klima-owl.de/historische_wetterdaten.pdf am 18.10.2007
- Schlütter 2000 F. Schlütter, H. Juling, G. Hilbert. Mikroskopische Untersuchungsmethoden in der Analytik historischer Putze und Mörtel. In: Boué, A. (Hrsg.). Historische Fassadenputze - Erhaltung und Rekonstruktion. Stuttgart 2001, S. 45-68 (2001)
- Schlütter 2004 Schlütter , F.. Untersuchungsbericht M 6008-04. Mikroskopische Untersuchungen des Fassadenputzes der Kirche Putbus. Typoscript Bremen 2004
- Solubel 2003 SOLUBEL HISTORISCHE PUTZE UND LUFTKALKPRODUKTE VERTRIEBS GMBH. SOLUBEL PAT. – Luftkalkmörtel (Technisches Merkblatt, Stand 12/03) Lauf – Neunhof 2003
- UdschuB 2007 Landkreis Rügen, Untere Denkmalschutzbehörde, mündliche Auskunft durch Herrn Wittkamp im September 2007.

- van Bebbber van Bebbber, H.. Die Feuchtigkeitsverhältnisse von Putbus auf Rügen (1854-1903). In: XII. Jahresbericht der Geographischen Gesellschaft Greifswald. Greifswald (undatierte Kopie, nach 1907)
- Winnefeld 1996 Winnefeld, F.; Böttger, K.G.; Knöfel, D. (1996): Eigenschaften von Baukalken mit unterschiedlich hohen hydraulischen Anteilen - eine kritische Betrachtung hinsichtlich des Einsatzes für die Denkmalpflege. Tagungsband des 4. Int. Kolloquiums Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Techn. Akademie Esslingen, 17.-19.12.1996 zitiert nach: [Schlütter 2000]
- Weiß 2006 Weiß, A.. Comparing indoor climate problems of two mediaeval island churches in the southern baltic. Unvoröffentliches Vortragsmanuscript. Helsinki 21.4.2006
- Wetter-online 2007 Wetter-Online GmbH. Klimarechner: Putbus/ Rügen. Online im Internet unter <http://www-de-5.wetteronline.de> am 30.10.2007.

Anhang

Abbildungen, Diagramme und Tabellen

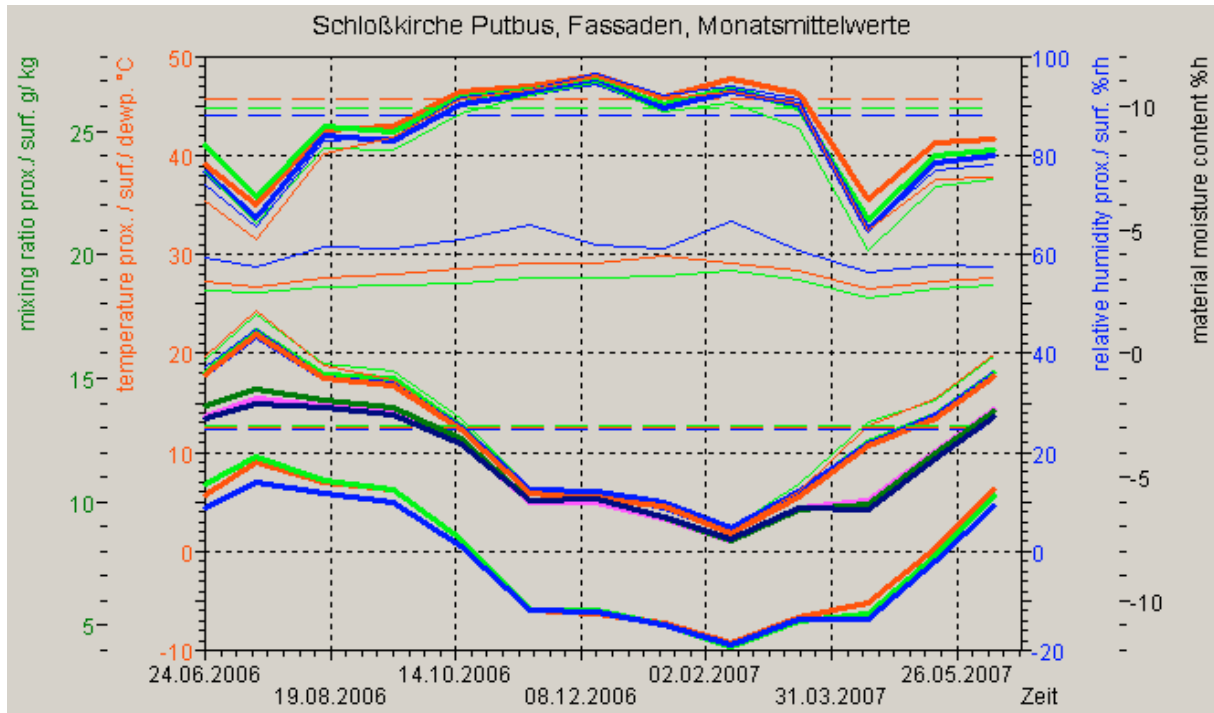


Abb. A1 Jahresverlauf des Klimas im Nahfeld und an den Oberflächen, Darstellung der Monatsmittelwerte. Oben - relative Feuchte, Mitte oben - Materialfeuchte; Mitte unten - Temperatur/ Taupunkttemperatur; unten - Wassergehalt (Mischung) der Luft im Nahfeld. Blau = Ostseite, grün = Südseite; rot = Westseite. Fett = Luft im Nahfeld, schmal = Putzoberfläche. Gestrichelt sind die Mediane der relativen Luftfeuchte und der Temperatur um Nahfeld eingetragen.

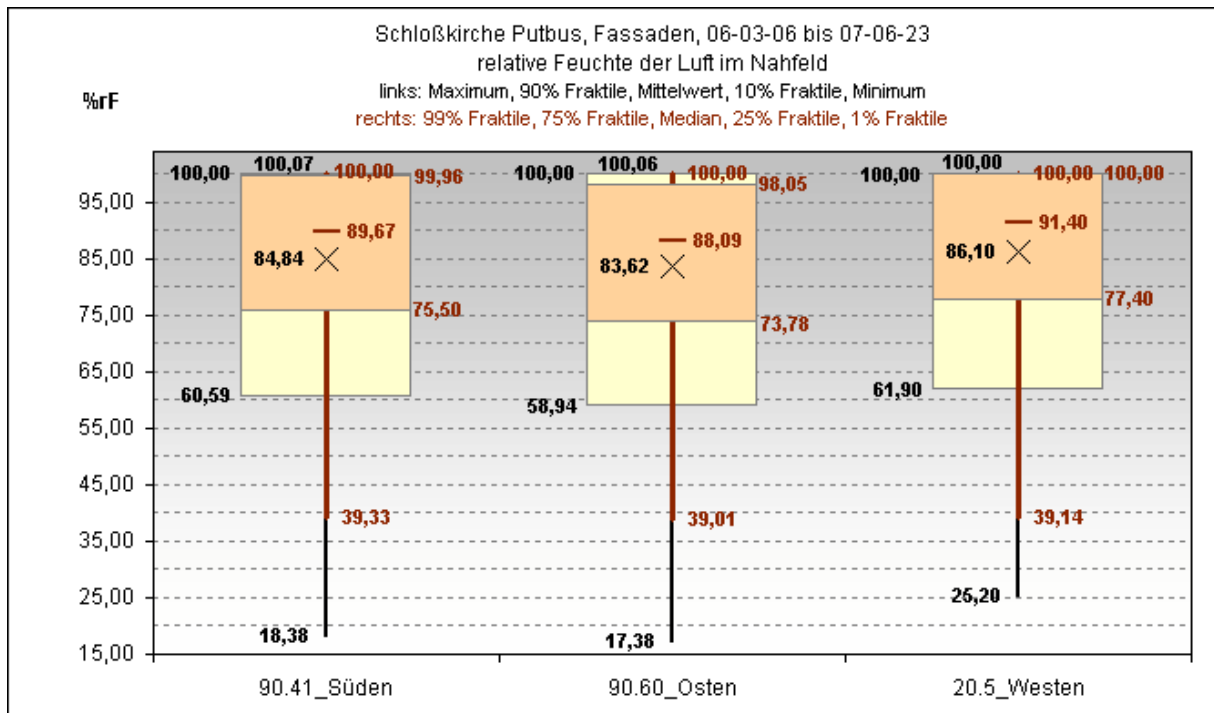


Abb. A 2 Relative Feuchte der Luft im Nahfeld, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum.

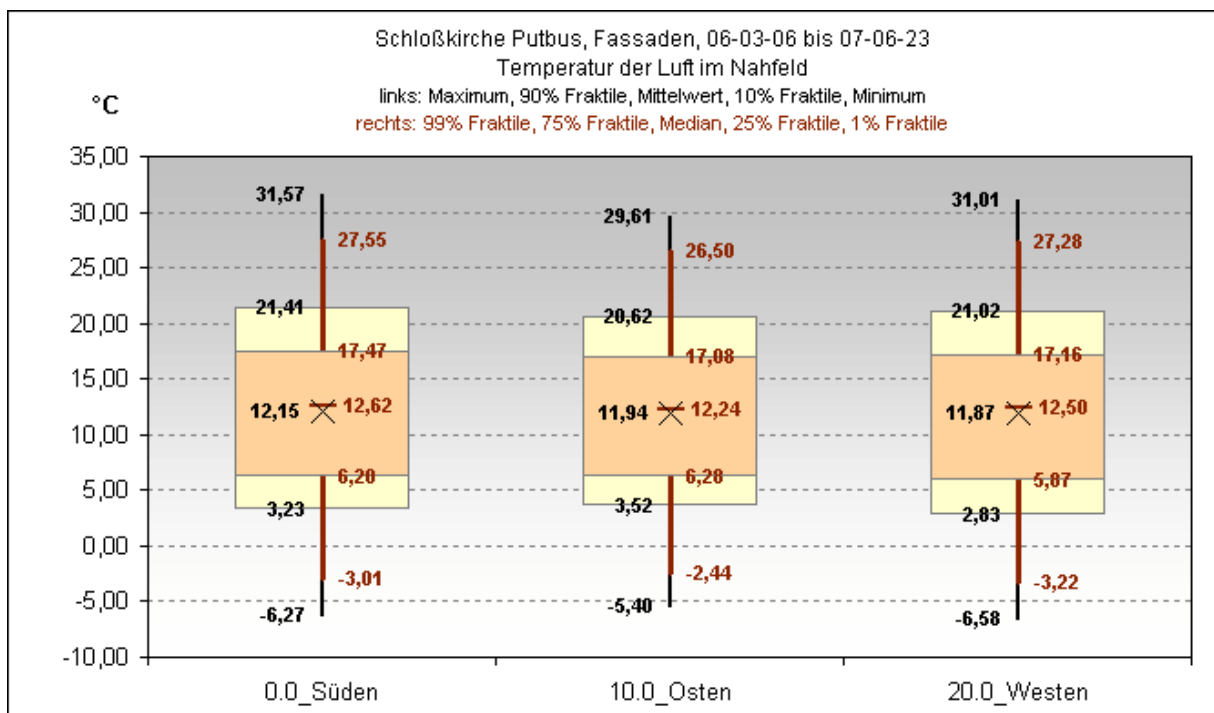


Abb. A 3 Temperatur der Luft im Nahfeld, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum.

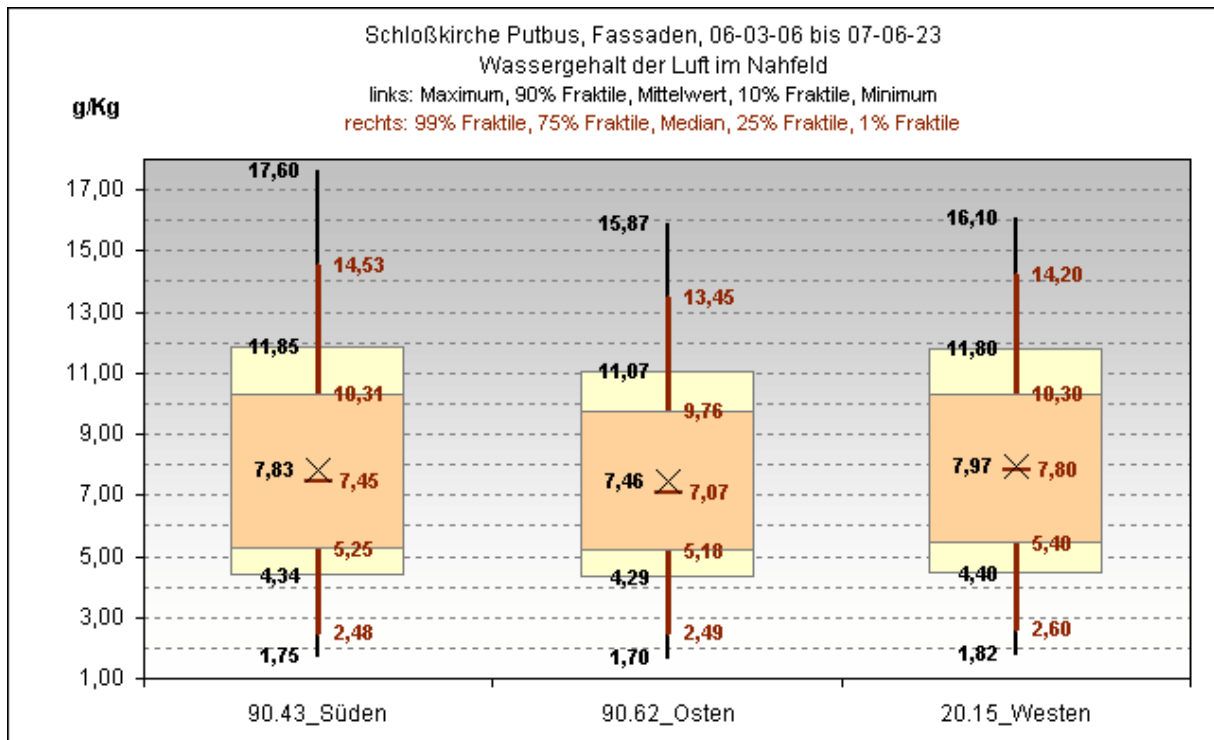


Abb. A 4 Tatsächlicher Wassergehalt (Mischung) der Luft, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum

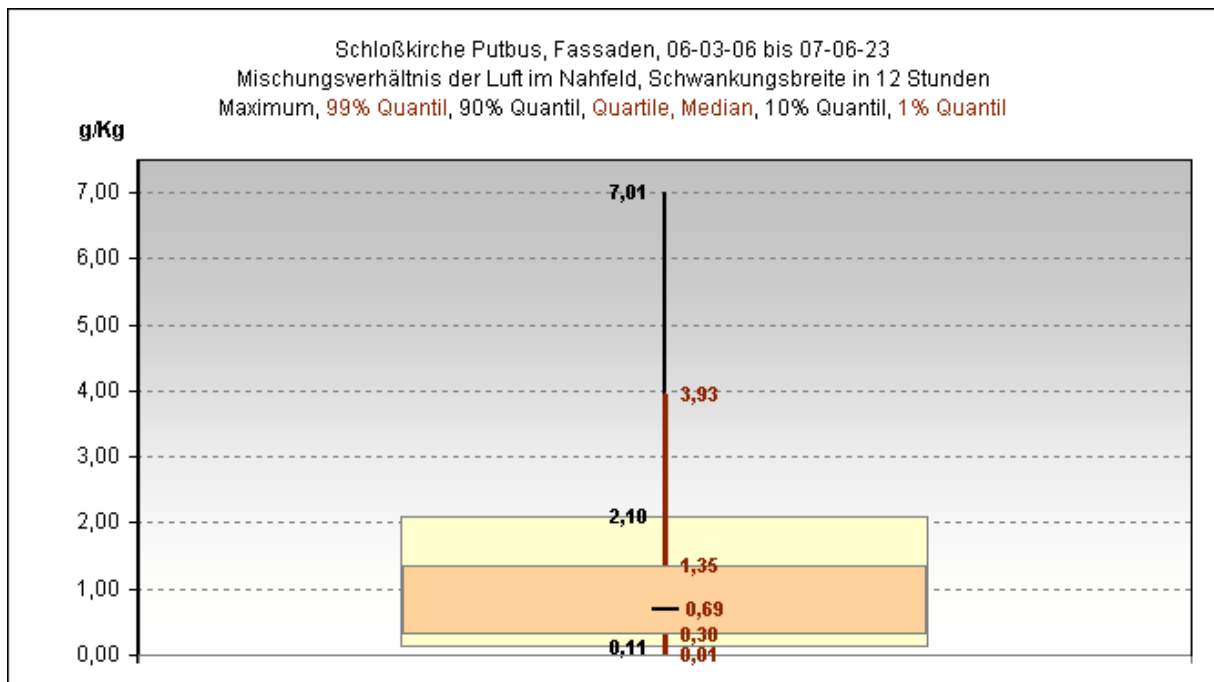


Abb. A 5 Tatsächlicher Wassergehalt der Luft, Schwankungsbreite in 12 Stunden, Boxplots der statistischen Verteilung der Werte im Meßzeitraum. Aufgrund vernachlässigbarer Abweichungen wurden die Werte der einzelnen Meßstellen (Ost- Süd- und Westseite) wurden arithmetisch gemittelt.

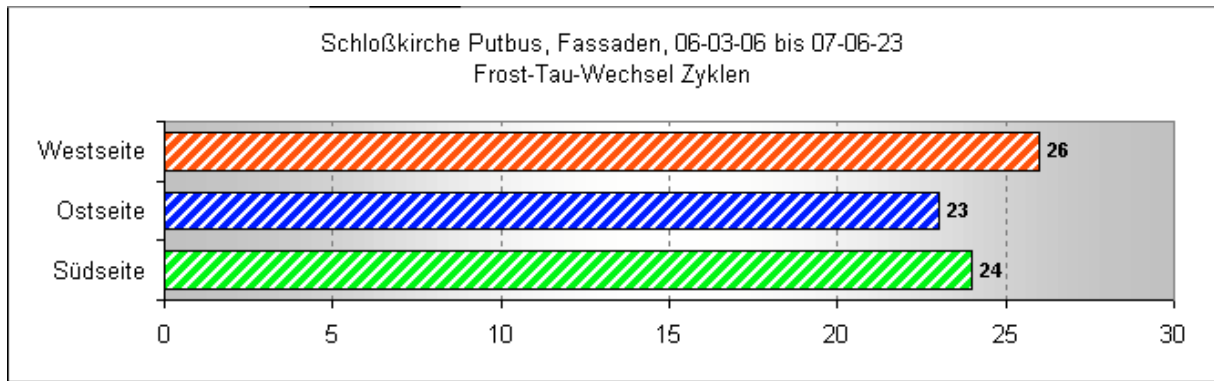


Abb. A 6 Frost – Tau – Wechsel Zyklen an der Putzoberfläche zwischen Anfang November und Ende März. Aufgrund eines Ausfalls der Meßanlage in der 45. Und 46. KW 2006 können die tatsächlichen Werte geringfügig höher liegen.

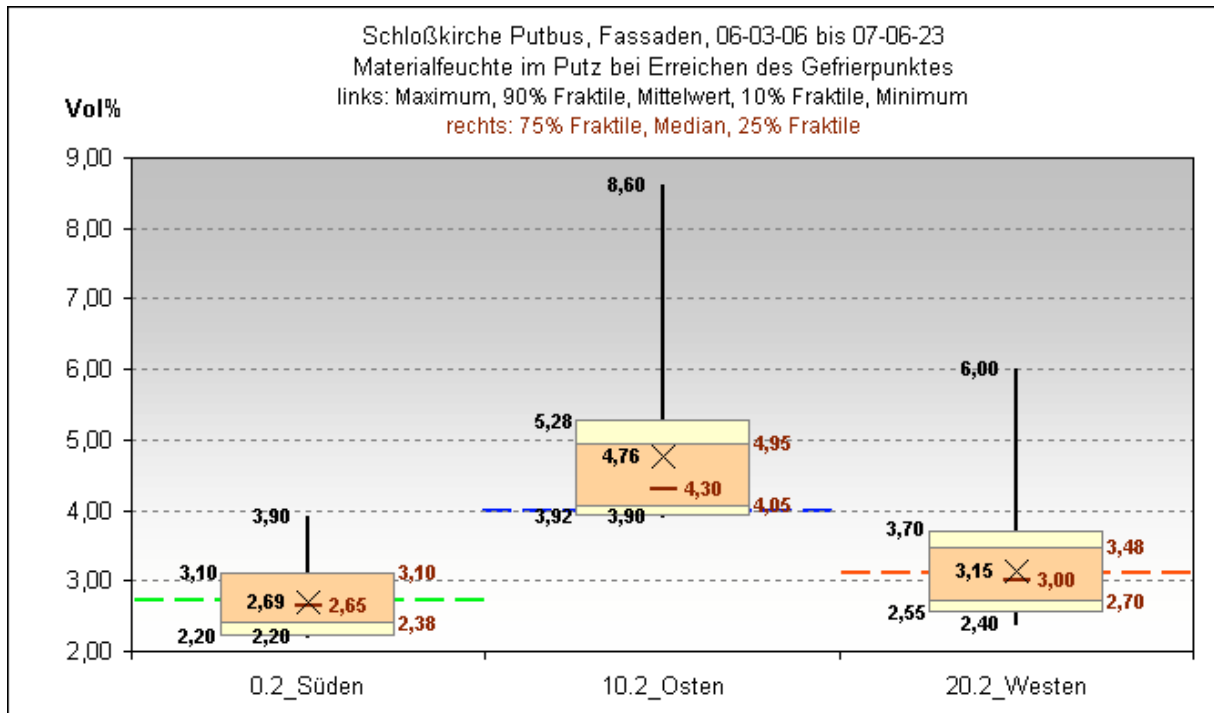


Abb. A 7 Materialfeuchte im Putz bei Erreichen des Gefrierpunktes, Boxplots der statistischen Verteilung der Werte im Meßzeitraum. Die farbigen Strichlinien markieren jeweils den Median aller Materialfeuchtwerte im Meßzeitraum .

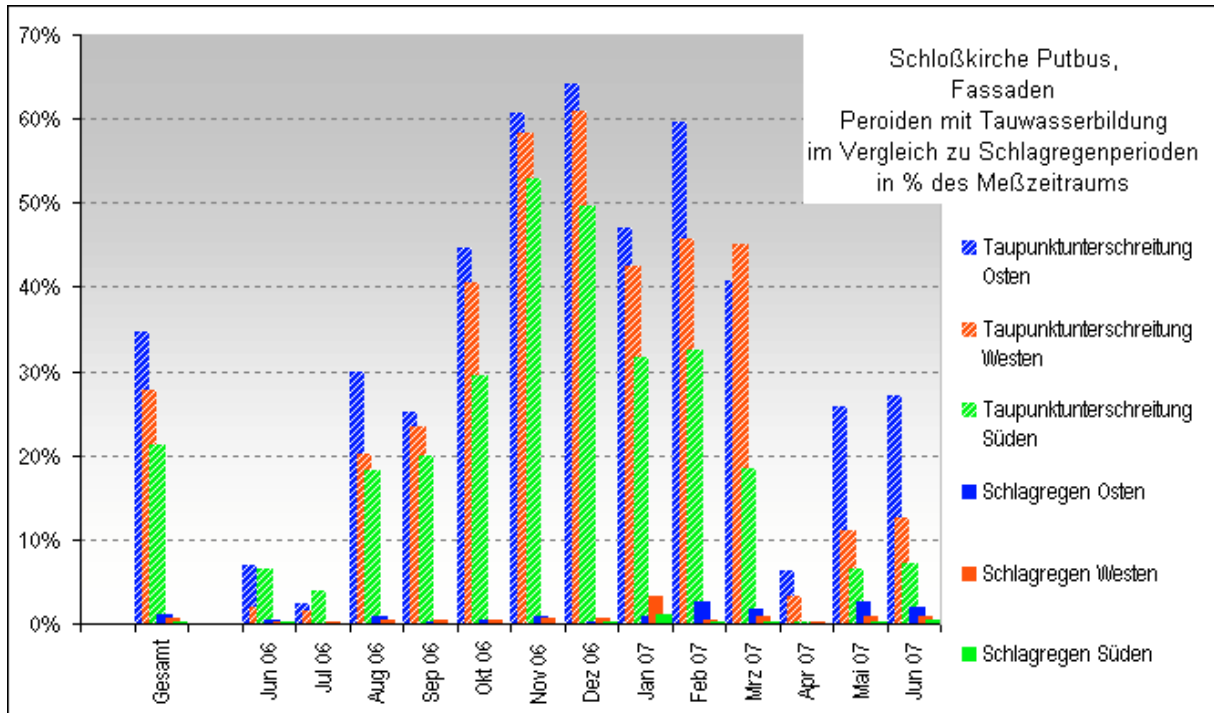


Abb. A 8 Dauer der Tauwasserbildung im Vergleich zur Schlagregendauer. Da die Meßzeiträume der einzelnen Meßpunkte geringfügige Differenzen aufweisen, wurden die Perioden der Taupunktunterschreitung und der Schlagregenbelastung jeweils im Verhältnis zur Meßdauer angegeben. Unter Berücksichtigung der Sensortoleranzen wurde der Beginn der Tauwasserbildung bei einer theoretischen relativen Luftfeuchte an der Oberfläche von 97,2 %rF angenommen. Bis zum 20.11.2006 wurden Schlagregenereignisse unter 20min Dauer nur an der Westfassade zuverlässig registriert, jedoch mit einer Erfassungsgrenze von 0,2mm/ 10min.

	Schlagregenperioden			Perioden mit Taupunktunterschreitung			Meßperioden anteilig von 8419,3 Stunden Gesamtmeßzeit					
	Süden	Osten	Westen	Süden	Osten	Westen	Schlagregen			Taupunktunterschreitung		
							Süden	Osten	Westen	Süden	Osten	Westen
Gesamt	0,19%	1,04%	0,73%	21,17%	34,78%	27,73%	98,7%	98,7%	98,2%	98,7%	100,0%	98,2%
Jun 06	0,15%	0,54%	0,26%	6,58%	6,98%	1,86%	4,1%	4,1%	7,7%	4,1%	4,1%	7,7%
Jul 06	0,00%	0,00%	0,13%	3,97%	2,28%	1,46%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%
Aug 06	0,00%	0,96%	0,38%	18,26%	29,91%	20,06%	8,7%	8,7%	8,8%	8,7%	8,8%	8,8%
Sep 06	0,05%	0,12%	0,39%	19,91%	25,16%	23,40%	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%	8,6%
Okt 06	0,07%	0,52%	0,45%	29,38%	44,54%	40,43%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%
Nov 06	0,05%	0,82%	0,75%	52,92%	60,67%	58,26%	3,6%	3,6%	4,0%	3,6%	4,8%	4,0%
Dez 06	0,20%	0,20%	0,58%	49,58%	64,21%	60,95%	8,8%	8,8%	8,2%	8,8%	8,8%	8,2%
Jan 07	1,05%	0,83%	3,16%	31,54%	47,09%	42,59%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%
Feb 07	0,19%	2,66%	0,36%	32,47%	59,58%	45,81%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%
Mrz 07	0,14%	1,83%	0,81%	18,36%	40,70%	45,00%	8,5%	8,5%	6,4%	8,5%	8,5%	6,4%
Apr 07	0,00%	0,00%	0,24%	0,12%	6,20%	3,35%	6,4%	6,4%	4,9%	6,4%	6,4%	4,9%
Mai 07	0,11%	2,67%	0,92%	6,61%	25,83%	11,09%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%	8,8%
Jun 07	0,34%	2,04%	0,78%	7,20%	27,00%	12,50%	6,4%	6,4%	6,1%	6,4%	6,4%	6,1%

Tabelle A 1 Datengrundlage für Diagramm A 8. Folgende Werte sind aufgrund des eingeschränkten Meßzeitraumes nur bedingt repräsentativ: Juni 2006 – Werte der Süd- und Ostseite; November 2006 – Werte aller Meßpunkte; April 2007 – Werte der Westseite.

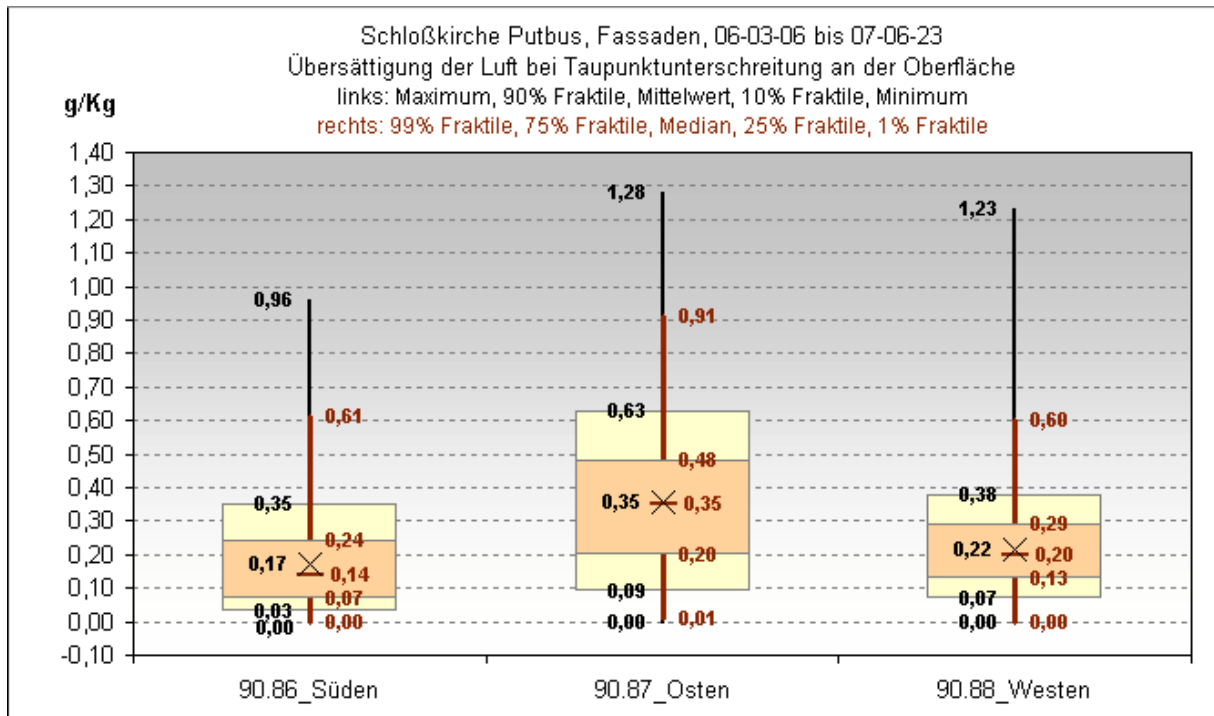


Abb. A 9 Übersättigung der Luft an der Oberfläche in Perioden mit Taupunktunterschreitung, Boxplots der statistischen Verteilung der Werte im Meßzeitraum. Die Werte entsprechen der Differenz des tatsächlichen Wassergehaltes der Luft und des berechneten Wassergehaltes der Luft an der Oberfläche bei Erreichen der Sättigungsfeuchte. Zur Kompensation der Sensortoleranzen wurde dies auf 97,2 % rF festgelegt.

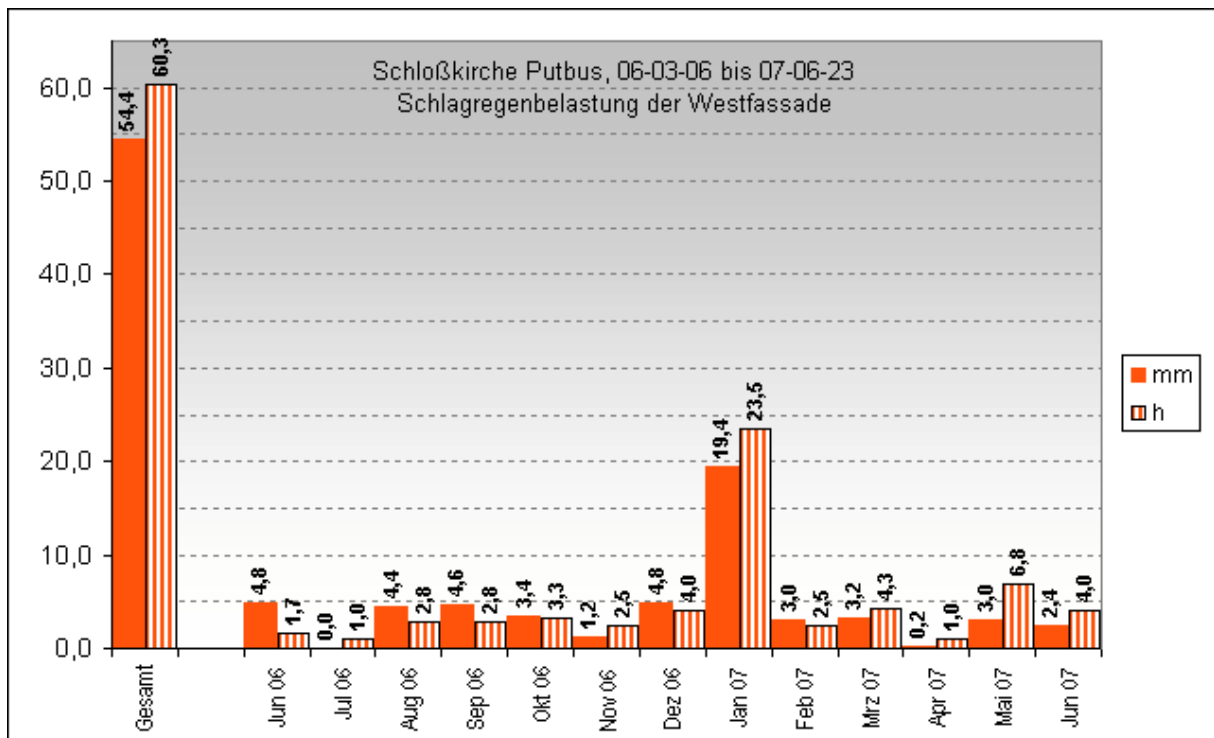


Abb. A 10 Schlagregenbelastung der Westfassade, Vergleich der monatlichen Summen von Schlagregenmenge und Schlagregendauer

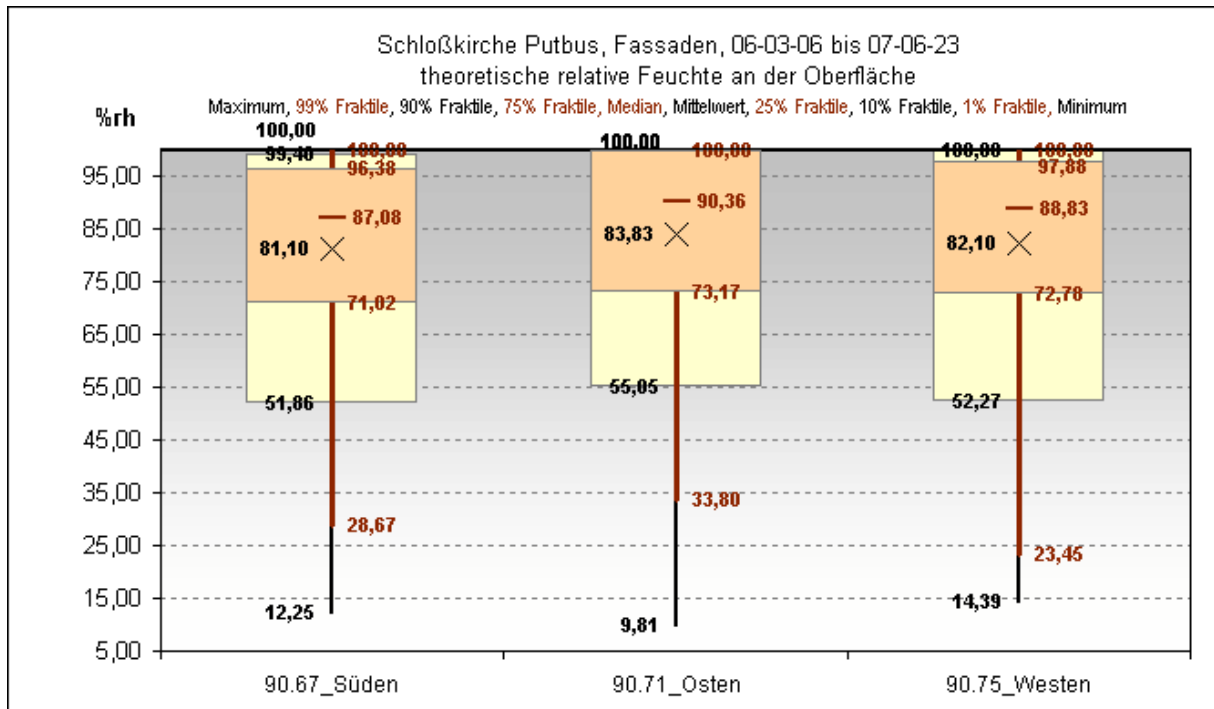


Abb. A 11 Theoretische relative Feuchte der Luft an der Putzoberfläche, Boxplots der statistischen Verteilung der Werte im Meßzeitraum

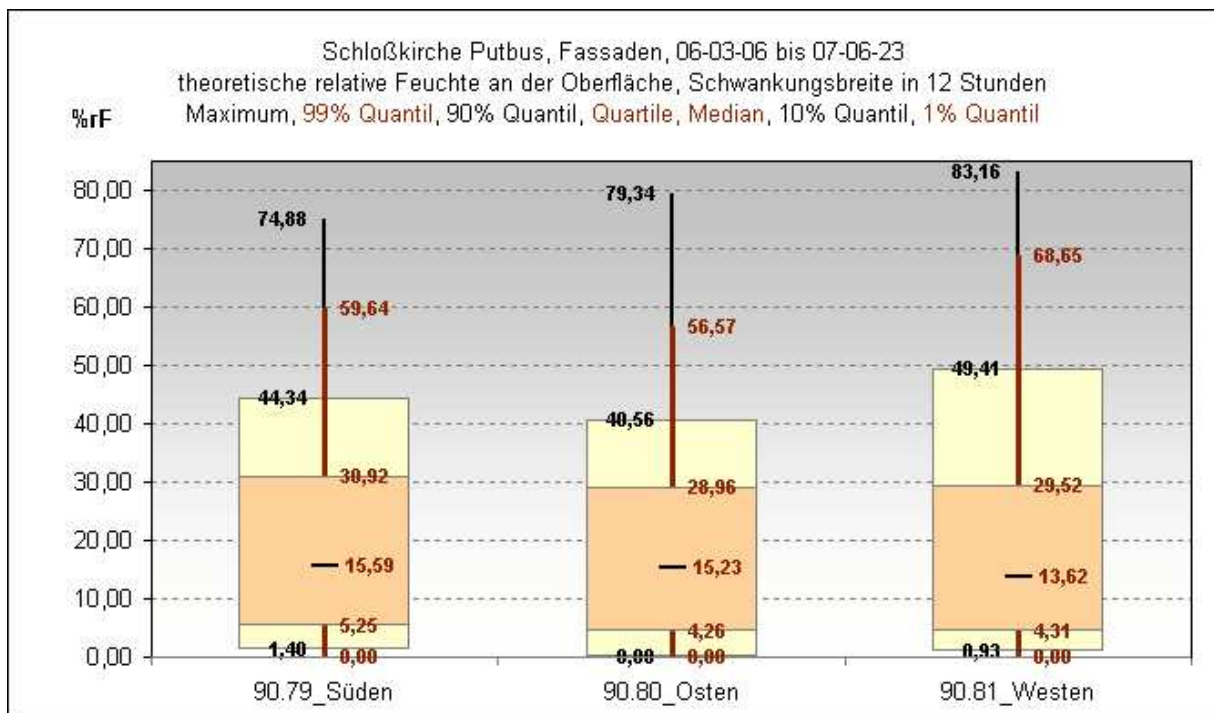


Abb. A 12 Theoretische relative Feuchte der Luft an der Putzoberfläche, Schwankungsbreite in 12 Stunden, Boxplots der statistischen Verteilung der Werte im Meßzeitraum

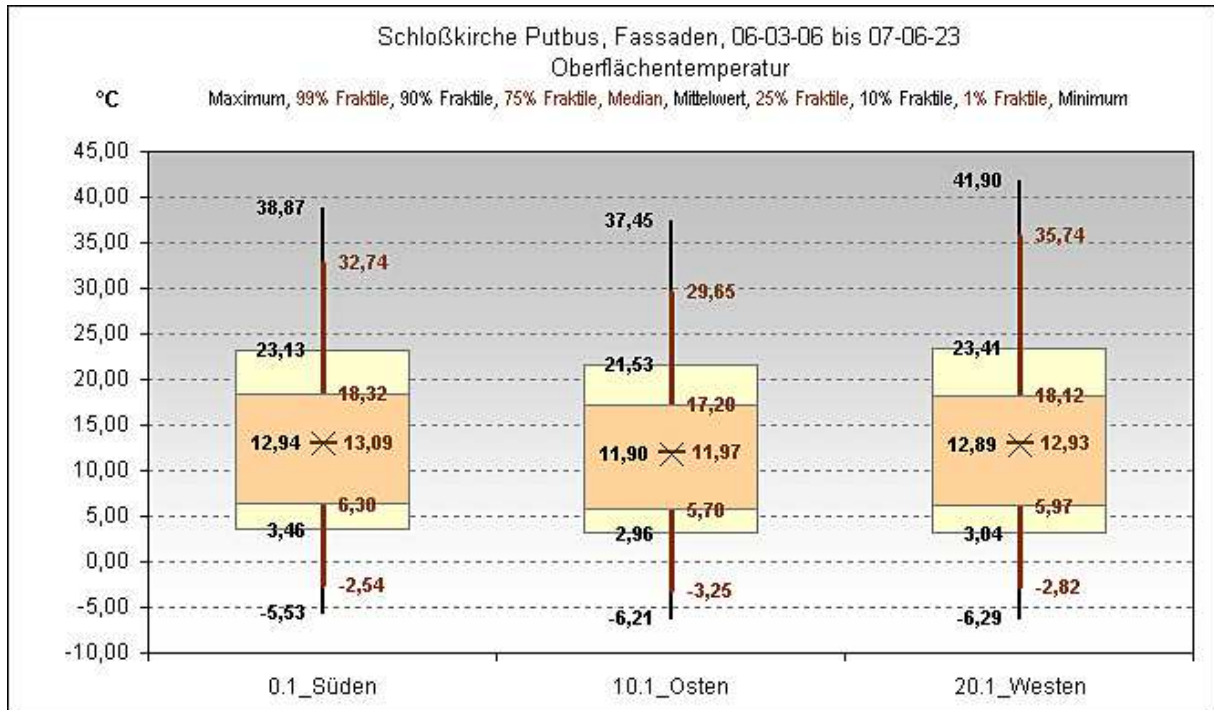


Abb. A 13 Temperatur der Putzoberflächen, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum

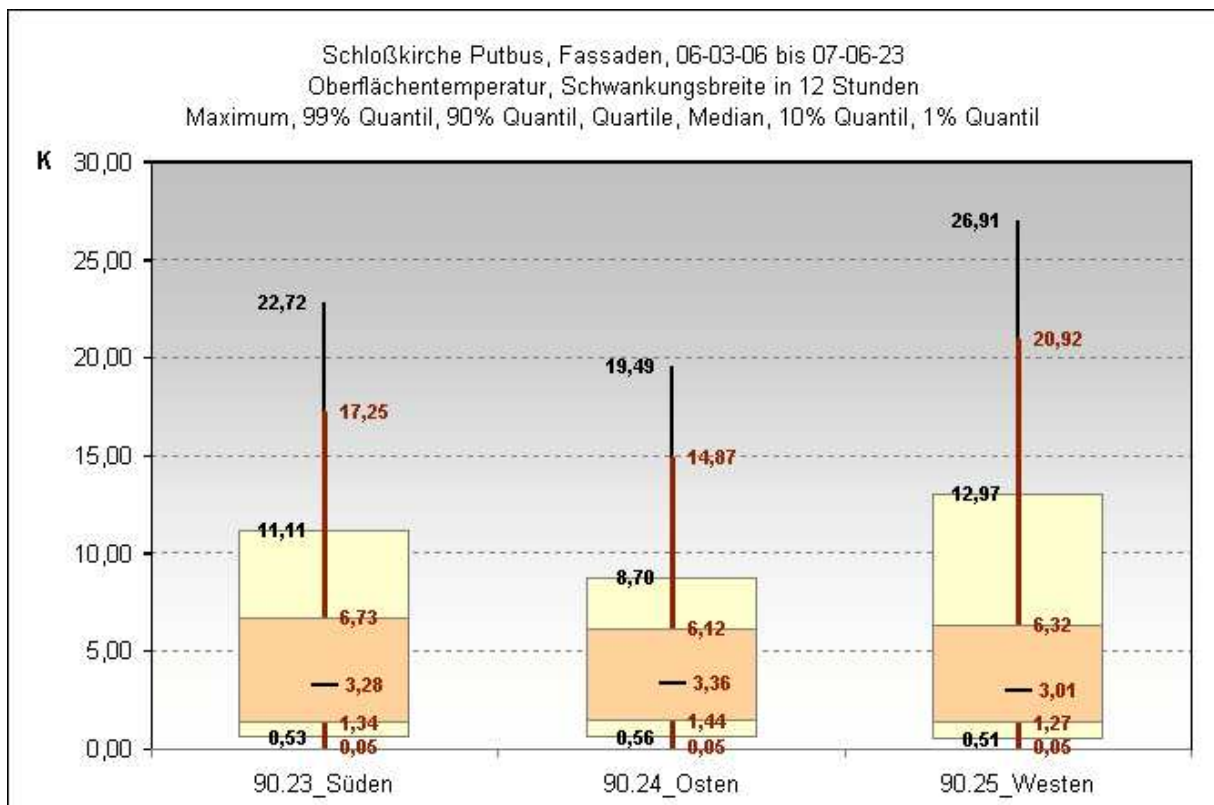


Abb. A 14 Temperatur der Putzoberflächen, Schwankungsbreite in 12 Stunden, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum

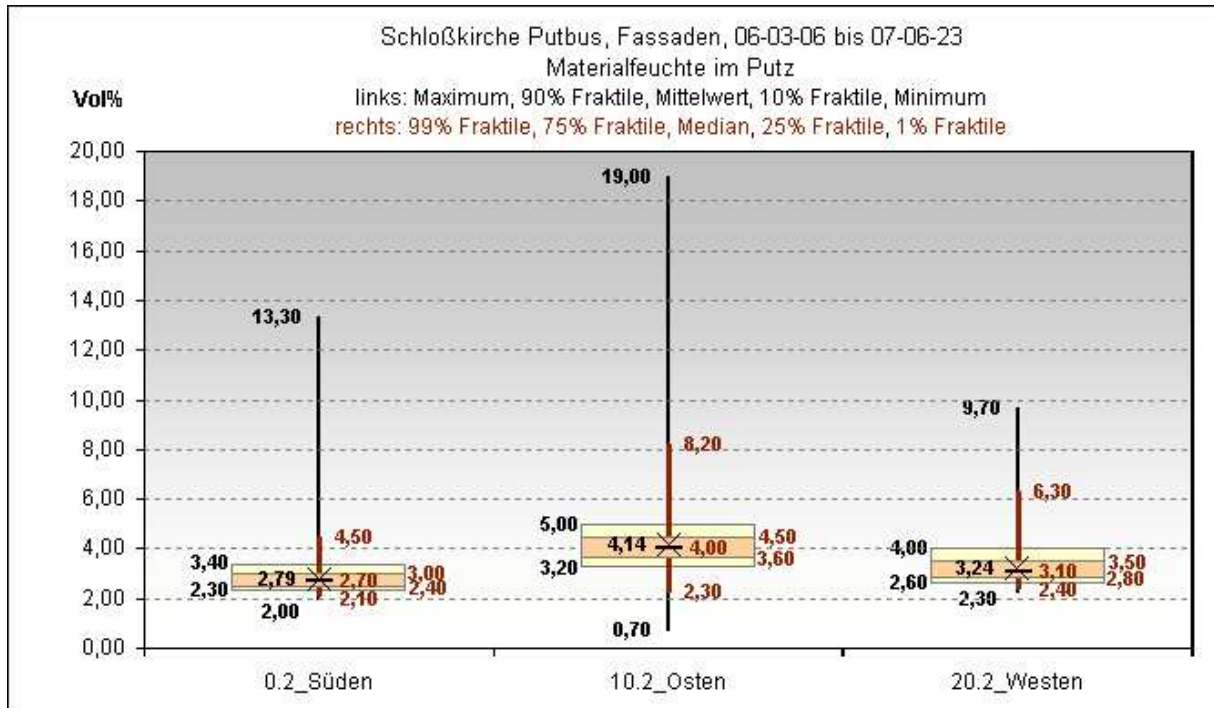


Abb. A 15 Relative Materialfeuchte im Putz, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum

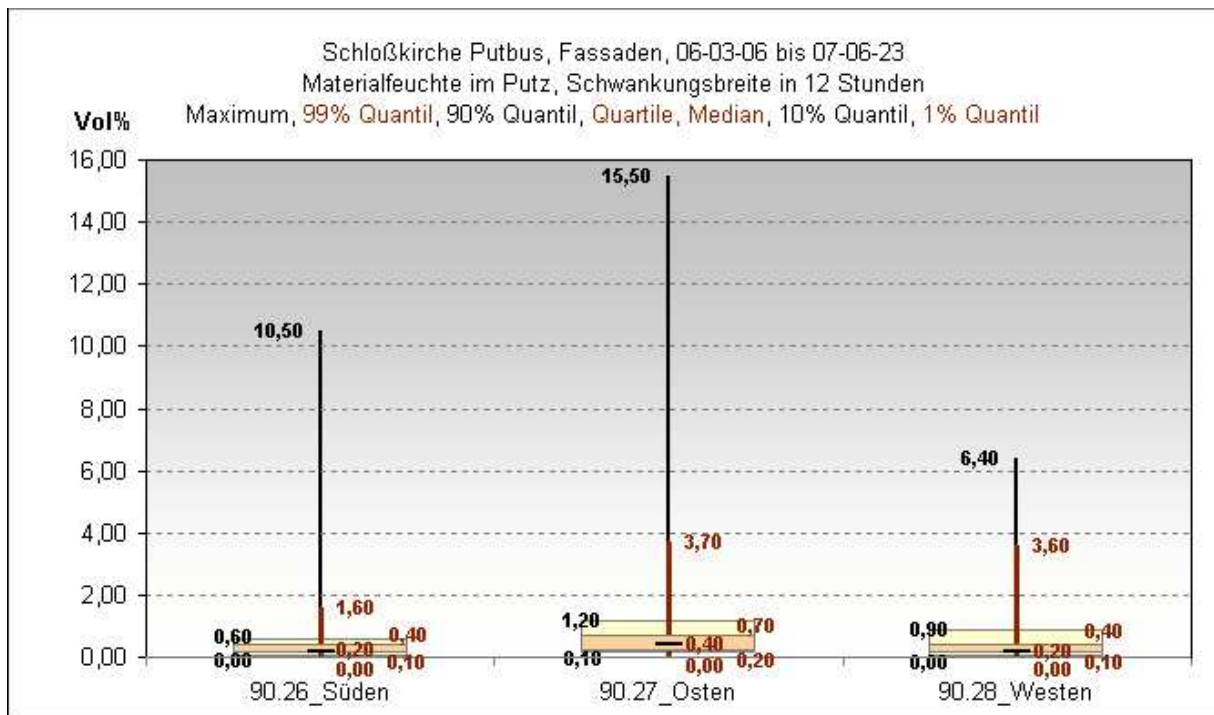


Abb. A 16 Relative Materialfeuchte im Putz, Schwankungsbreite in 12 Stunden, Boxplots der statistischen Verteilung der Meßwerte im Meßzeitraum

Gruppe	Meß- bzw. Rechengröße	Datenpunkte			Einheit	Zugeordnete Skale		
1	Frost-Tau-Wechsel	90.17 90.18 90.19	— — —	Südseite Ostseite Westseite	ja/ nein	Keine, ja oben, nein unten		
2	Perioden mit Taupunktunterschreitung an den Putzoberflächen	90.76 90.77 90.78	— — —	Südseite Ostseite Westseite	ja/ nein	Keine, ja unten, nein oben		
		Übersättigung der Luft an der Putzoberfläche während der Taupunktunterschreitung	90.86 90.87 90.88	— — —	Südseite Ostseite Westseite	g/Kg	Schwarz, Nullpunkt verschoben auf -18, d.h. -17= 1	
	3	Wassergehalt der Luft (Mischung)	90.43 90.62 20.15	— — —	Südseite Ostseite Westseite	Nahfeld	g/Kg	Grün
90.10 90.5 90.22			— — —	Südseite Ostseite Westseite	Meßkammer an der Oberfläche			
0.0 10.0 20.0			— — —	Südseite Ostseite Westseite	Nahfeld	°C		
4	Temperatur	0.1 10.1 20.1	— — —	Südseite Ostseite Westseite	Meßkammer an der Oberfläche			
		Taupunkttemperatur	90.44 90.63 90.6	— — —	Südseite Ostseite Westseite	Nahfeld		
5	Schlagregenperioden bzw. Schlagregendauer	90.31 90.32 90.33	— — —	Südseite Ostseite Westseite	ja/ nein	Schwarz, nein = oben (0), ja = unten		
		Schlagregenmenge/ 10min	20.3	—	Westseite		mm	Schwarz
		Schlagregenmenge/ Stunde	90.0	—	Westseite			
6	Materialfeuchte im Putz	0.2 10.2 20.2	— — —	Südseite Ostseite Westseite	Vol%	Schwarz		
		Median der Materialfeuchte im Putz	90.45 90.46 90.47	— — —			Südseite Ostseite Westseite	
			7	Relative Feuchte der Luft			90.41 90.60 20.5	— — —
0.6 10.6 90.20	— — —				Südseite Ostseite Westseite	Meßkammer an der Oberfläche		
Theoretische relative Feuchte	90.44 90.63 90.6	— — —			Südseite Ostseite Westseite	Freie Oberfläche		

Tabelle A 2 Legende zu den Klimadiagrammen Abb. A 17 Jeweils gleichartige Daten wurden zu Gruppen zusammengefaßt, Zählung von unten nach oben.

Abb. A 17, Seite 1 bis 55 Klimakurven des gesamten Meßzeitraums. Die Klimadiagramme enthalten sämtliche relevanten Daten über den gesamten Meßzeitraum mit einer Auflösung von einer Woche pro Druckseite. Aufgrund des Umfanges von 55 Druckseiten liegen sie den gedruckten Exemplaren des Berichtes nur digital als pdf-Datei bei.

Fehlerbetrachtung zu den Klimamessungen

Materialfeuchte

Die Messung der Materialfeuchte erfolgt auf der Basis der Dielektrizitätskonstante des Wassers. Die Genauigkeit der Meßfühler ist mit +/- 2 Volumenprozent angegeben. Die Messung wird durch das chemisch gebundene Wasser von Salzen im Porenraum verfälscht. Darüber hinaus ist die Beeinflussung der Meßergebnisse durch Unterschiede in der Porenverteilung des Putzes zwischen den Meßstellen vorstellbar.

Verfälschungen der Meßwerte durch Schwankung der Versorgungsspannung der Meßfühler können ausgeschlossen werden, da die Spannung überwacht wurde und über den betrachteten Meßzeitraum bis in den Millivoltbereich konstant gehalten werden konnte.

Bei den Meßwerten zur Materialfeuchte gibt es sowohl in den Jahresmitteln, als auch in den Magnituden der saisonalen und täglichen Schwankungen häufig auffällige Differenzen zwischen der Ostseite und den beiden übrigen Meßpunkten.

Dabei kann es sich theoretisch um Meßfehler aufgrund der o.a. Ursachen handeln.

Allerdings korreliert das deutlich höhere Jahresmittel der Materialfeuchte an der Ostseite (Abb. A 1 und A 15) mit den längsten Btauungs- und Schlagregenperioden (Abb. A 8), der höchsten Übersättigung der Luft bei Taupunktunterschreitung, sowie den höchsten Durchschnittswerten der relativen Luftfeuchte an der Oberfläche (Abb. A 11).

Die saisonalen Schwankungen der Materialfeuchte zeigen jedoch nur an der Ostseite klare Affinitäten zum Verlauf der relativen Feuchte an der Oberfläche (Abb. A 11), sowie den monatlichen Btauungsperioden (Abb. A 8). Bei den Kurven der Süd- und Westseite ist dies weit weniger eindeutig, hier lassen sich lediglich die Maxima der Materialfeuchte im Januar mit der höchsten monatlichen Schlagregendauer in Verbindung bringen.

Die deutlichen Abweichungen der täglichen Schwankungen der Materialfeuchte sind umgekehrt proportional zu dem Wassergehalt der Luft in den Meßkammern an der Oberfläche (Abb. A 17, u.a. Seiten 50 bis 55). Offenbar sind also die unterschiedlichen Magnituden der täglichen Schwankungen der Materialfeuchte eher in Unterschieden des Sorptionsverhalten des Putzes zwischen den Meßstellen, als in unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Meßfühler begründet. Dafür sprechen auch parallele Kurvenverläufe in Btauungsperioden mit deutlicher Übersättigung der Luft an der Oberfläche, beispielsweise am 26.01.07 (Abb. A 17, Seite 34)

Oberflächentemperatur

Da die Temperaturfühler ohne direkten Kontakt zur Oberfläche in den gegen Wärmestrahlung aus der Atmosphäre abgeschirmten Meßkammern angeordnet waren, sind folgende Meßfehler möglich:

- 1) Verzögerte Ansprache auf Temperaturschwankungen. Vergleiche mit den Temperaturkurven aus dem Nahfeld zeigen, daß derartige Verzögerungen den Bereich

des Meßintervalls von 10 Minuten nicht überschreiten. Dies gilt sowohl für Temperaturanstiege, als auch für Temperaturabfälle.

2) Dämpfung von kurzzeitigen Magnituden.

Frost-Tau-Wechsel Zyklen

Die 23 bis 26 Frost-Tau-Wechsel Zyklen wurden zwischen dem 1.11.2006 und dem 27.3.2006 registriert. Aufgrund eines Ausfalls der Meßanlage in der 45. und 46. Kalenderwoche 2006 können die tatsächlichen Werte geringfügig höher liegen. Da die Oberflächentemperaturen während der Frost-Tau-Wechsel Perioden häufig nur im Bereich von 1K um den Gefrierpunkt pendeln, können auch geringfügige Kalibrierfehler, sowie eine leicht verzögerte Reaktion der Temperaturfühler aufgrund der Anordnung in der Meßkammer das Ergebnis beeinflussen.

Schlagregendauer

Ein Vergleich der Schlagregenmengen (Meßpunkt 20.3) und der Schlagregendauer (Meßpunkt 90.33) auf der Westseite zeigt vereinzelt Diskrepanzen in beide Richtungen. Während fehlende Ausschläge am Meßpunkt Schlagregenmengen während der Registrierung von Schlagregenperioden aufgrund der geringeren Empfindlichkeit des Ombrometers gegenüber dem Regensensor nachvollziehbar sind, deutet der umgekehrte Fall auf Meßfehler hin. Die Regensensoren wurden im Zeitraum Juni bis November 2006 insgesamt 6x überprüft. Dabei konnte keine Fehlfunktion festgestellt werden. Die Sensoren lösten jeweils bei leichter Benetzung aus (vgl. Abb. A 22). Eine mögliche Ursache für fehlende Signale der Regensensoren kann die Differenz der Speicherintervalle sein: Während der Ombrometer die Schlagregenmengen in 0,2mm Schritten als Impulse über das Speicherintervall aufsummiert ausgibt, wurde die Schlagregendauer zunächst nur als ja/nein Signal im Speicherintervall der Datenlogger von 10 min aufgezeichnet. Dabei wurden kürzere Schlagregenereignisse nicht erfaßt, sofern sie zwischen den Speicherintervallen lagen. Zum 20.11.2006 wurden daraufhin die Regensensoren mit Impulszählern nachgerüstet. Trotzdem wurden durch den Ombrometer weiterhin Schlagregenereignisse registriert, die von dem Regensensor auf der Westseite nicht erfaßt wurden. Dies belegt zumindest für die Westseite eine Unzuverlässigkeit bei der Aufzeichnung der Schlagregendauer, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. Bei Berechnung der monatlichen Schlagregendauer (Abb. A 8 und A 10) wurden deshalb an der Westseite die Signale beider Sensoren berücksichtigt. Ein sicherer Nachweis der Zuverlässigkeit der Regensensoren an Ost- und Südseite kann nicht erbracht werden. Jedoch sind dort über den gesamten Meßzeitraum mit 6 Ausnahmen²⁶ alle signifikanten Erhöhungen der Materialfeuchte im Putz durch registrierte Schlagregenereignisse unterlegt.

²⁶ Am 4.11.2006 und 9.1.2007 traten signifikante Materialfeuchteanstiege in Perioden mit Tauwasserbildung auf der Oberfläche bei Übersättigungswerten der Luft an der Oberfläche jenseits der 99% Fraktile auf (vgl. Abb. A. 8, Abb. A 17, Seiten 22 und 32). Die Anstiege der Materialfeuchte können hier auch durch Kondensat bzw. Sorption verursacht worden sein. Am 24.

Tauwasserbildung

Unter Berücksichtigung der Sensortoleranzen wurde der Beginn der Tauwasserbildung bei einer theoretischen relativen Luftfeuchte an der Oberfläche von 97,2 %rF angenommen. Dadurch kann die errechnete Betaungsdauer prinzipiell auch zu lang ausfallen. Zwar korrelieren die errechneten Betaungsperioden mit den Änderungen der Materialfeuchte, diese können jedoch auch durch Sorption unmittelbar vor Erreichen des Taupunktes verursacht worden sein.

Die mögliche Dämpfung der Magnituden bei der Messung der Oberflächentemperatur kann eine Unterbewertung der Dauer der Tauwasserbildung nach sich ziehen.

Verdunstung

Die in den Meßkammern auf der Oberfläche gemessene relative Luftfeuchte folgt der an der freien Oberfläche gemessenen Materialfeuchte. Da die Luft in der Meßkammer wesentlich stärker durch den Feuchtehaushalt der Oberfläche, als durch Austausch mit der Umgebungsluft beeinflusst wird, ist die Änderung der relativen Luftfeuchte in der Kammer eine Gleichgewichtsreaktion infolge von Änderungen der Materialfeuchte. Die als Anstieg des Wassergehaltes der Luft in der Meßkammer registrierte Verdunstung aus dem Putz spiegelt somit nicht direkt die Verhältnisse an der freien Oberfläche wieder. Da hier die berechnete relative Feuchte im Verdunstungsfall unter der in der Kammer gemessenen relativen Feuchte liegt, dürfte die tatsächliche Verdunstungsrate noch höher sein. Die in der Meßkammer auf der Oberfläche der Südseite ermittelte relative Feuchte der Luft liegt ab März 2007 auffallend häufig in der Nähe der für die freie Oberfläche kalkulierten relativen Feuchte (theoretische relative Feuchte). Dies deutet auf ein Dichtungsversagen, bzw. einen direkten Luftaustausch mit der Umgebung hin. Als Folge werden in der Meßkammer die Anstiege des Wassergehaltes während der Temperaturerhöhung durch Sonneneinstrahlung nicht mehr zuverlässig erfaßt. Gleichwohl belegt ein Abfall der Materialfeuchte, daß Wasser an die Umgebung abgegeben wird²⁷.

und 26.1., sowie am 9. und 12.2.2007 handelt es sich vermutlich Meßfehler der Materialfeuchtesensoren infolge einer Vereisung bzw. Bereifung der Oberfläche (vgl. Abb. A. 17, Seiten 34, 36 und 37).

²⁷ (vgl. Abb. A. 17, Seite 41).

Meßeinrichtung

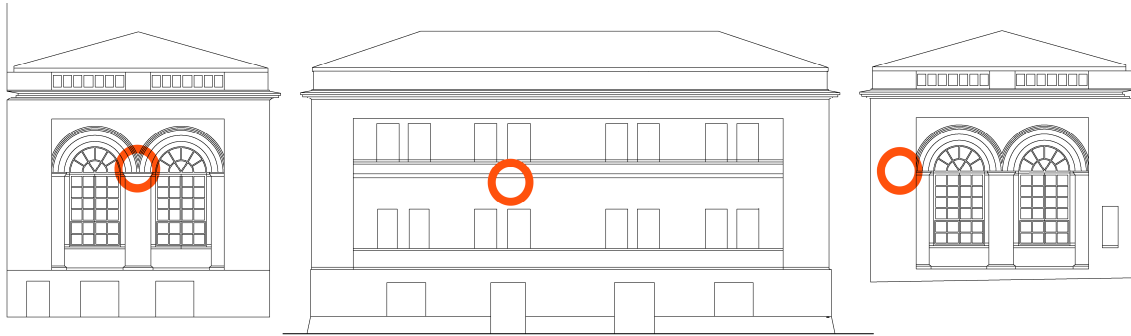


Abb. A 18 Anordnung der Meßstellen an den Fassaden, von links nach rechts: Westfassade, Südfassade, Ostfassade



Abb. A 19 Meßbrücke an der Westfassade, von links nach rechts: Ombrometer nach Hellmann, umgerüstet mit vertikalem Auffangpaneel zur Erfassung der Schlagregenmenge; Meßkammer mit Kombisensor Temperatur/ relative Luftfeuchte zur Erfassung der Oberflächentemperatur und der Verdunstung aus dem Putz; Regensensor zur Erfassung der Schlagregenperioden, montiert auf eine ventilierte, strahlungsabgeschirmte Wetterhütte mit Kombisensor zur Erfassung von Temperatur und Feuchte der Luft im Nahfeld; witterungsgeschützter Materialfeuchtesensor. Im Bereich der Oberflächensensoren wurden auf der Meßbrücke Spritzwasserschürzen angebracht.

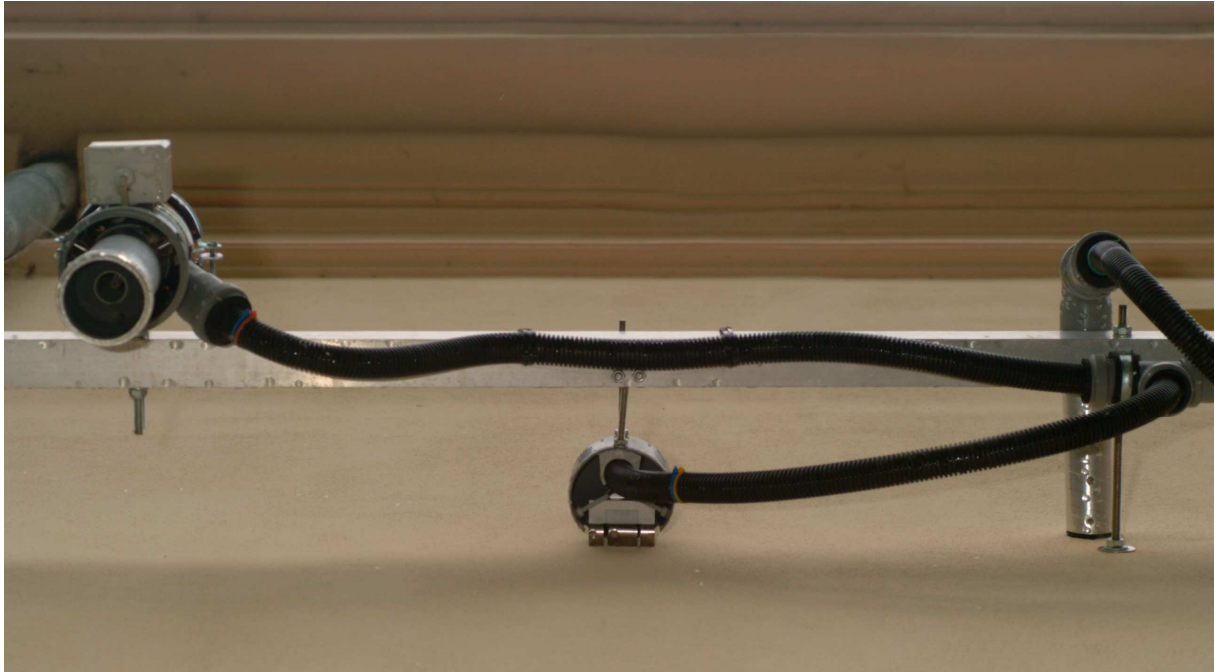


Abb. A 20 Meßbrücke an der Ostfassade von links nach rechts: Kombifühler zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte der Luft im Nahfeld in strahlungsabgeschirmter ventilierter Wetterhütte, an der Vorderseite der Wetterhütte ist ein Regensensor zur Erfassung der Schlagregendauer montiert; kapazitiver Materialfeuchtesensor, Meßkammer mit Kombisensor Temperatur/ relative Luftfeuchte zur Messung der Oberflächentemperatur und der Verdunstung aus dem Putz.

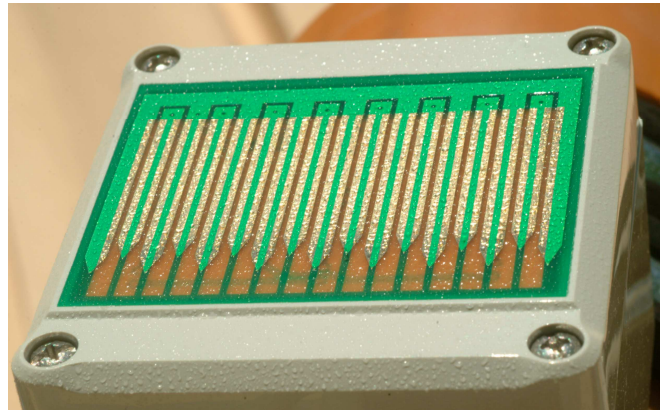


Abb. A 21 (links) Meßbrücke an der Südseite mit identischer Sensorkonfiguration, lediglich in umgekehrter Reihenfolge

Abb. A 22 (rechts) Meßfeld der Sensoren zur Erfassung der Schlagregendauer. Die Auslöseempfindlichkeit wurde auf den abgebildeten Benetzungsgrad eingestellt .

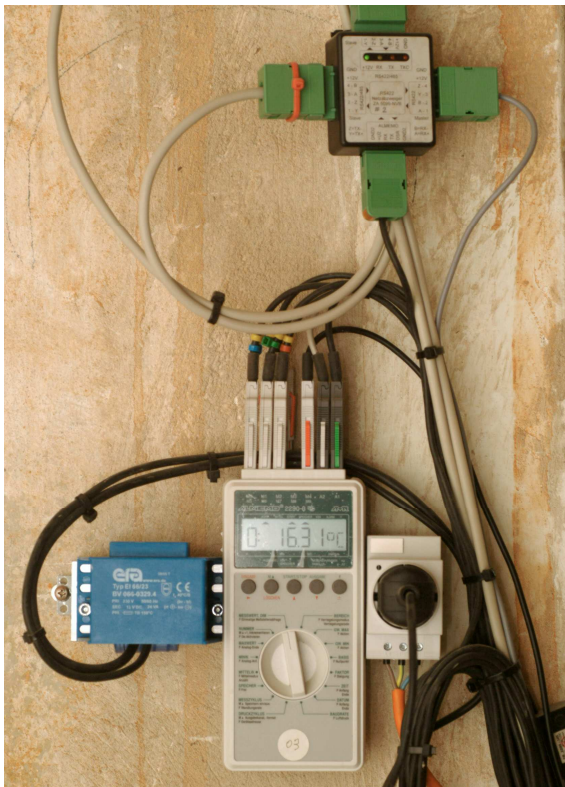
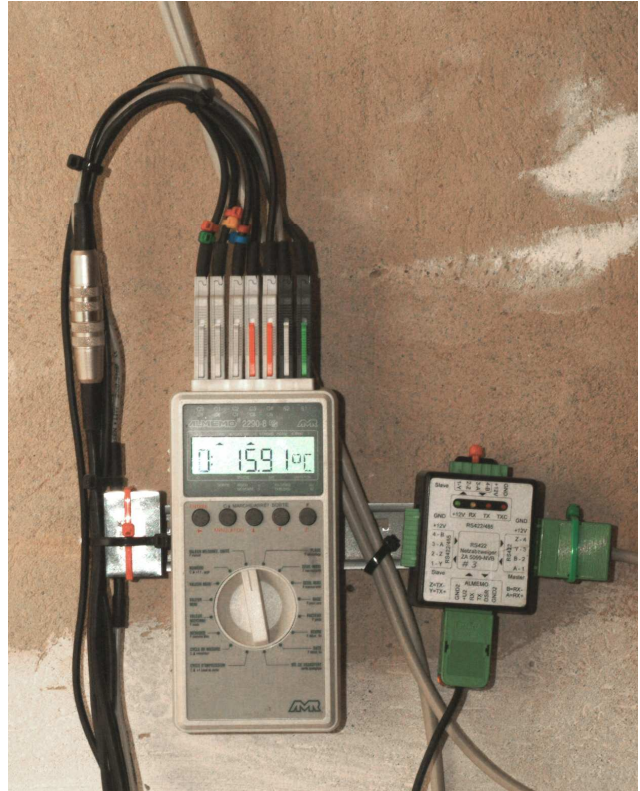
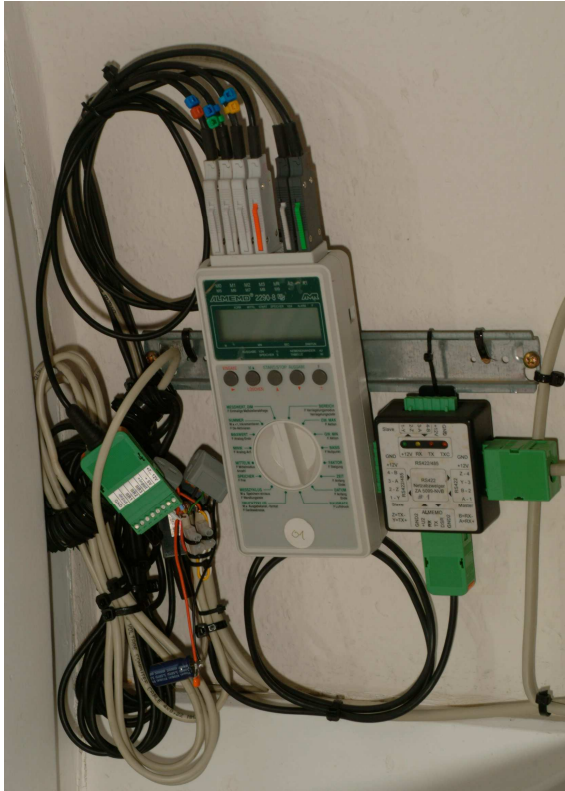


Abb. A 23-25 Datenlogger und Netzverteilerknoten der einzelnen Meßbrücken