

Erfassung des Mikroklimas an der Trierer Konstantinbasilika

In den Jahren 2009 und 2010 wurden in einer Fensternische der Konstantinbasilika mikroklimatische Messungen kontinuierlich mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten durchgeführt. Gemessen wurden die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Oberflächentemperatur der Wand auf der Innenseite, Wind und die auf die Fensterlaibung einfallende solare Strahlung. Zur Einordnung in die Klimatologie im Stadtbereich von Trier sind Messungen des Fachs Umweltmeteorologie in Trier verwendet worden. Im Juni 2009 fanden darüber hinaus Messungen im Innenhof und auf dem Vorplatz der Basilika statt, weiterhin wurde im Juli 2010 die Fassadentemperatur flächenhaft mit Thermalbildern für einen Sommertag erfasst. Es konnte eine Wind- und Temperaturstatistik für das Basilika-Fenster erstellt werden. Demnach treten an der Wand Temperatursprünge von bis zu 10°C innerhalb von nur 30 Minuten in Verbindung mit starken Änderungen der kurzwelligen Strahlung auf. Mit Hilfe der Messdaten wurden sowohl die Übergänge von Hydratationsstufen für Kieserit (Magnesiumsulfat) quantifiziert, als auch mögliche Benetzungsphasen durch Schlagregen abgeschätzt. Schließlich konnte die Umströmung der Basilika und die klimatischen Verhältnisse in ihrer Umgebung mit Hilfe eines dreidimensionalen Mikroklimamodells simuliert werden.

1 Einleitung

Die bemalten römischen Außenputze in den Fensternischen der Konstantinbasilika (Abb. 5-1) wurden Mitte des 19. Jahrhunderts freigelegt und sind seitdem der Verwitterung ausgesetzt. Zur Abschätzung der Verwitterungsbelastung und zur Beurteilung der Schadensprogression ist die Kenntnis der umgebenden stadtklimatischen Verhältnisse von Trier, aber auch die Kenntnis der mikroklimatischen Bedingungen an den bemalten Putzen zwingende Voraussetzung. Im Fokus der klimatischen Untersuchungen des Fachs Umweltmeteorologie der Universität Trier stehen die Faktoren Temperatur und Feuchte im Bereich der Außenputze, Temperatur- und Frostwechsel sowie solare Strahlung, da das Material hierauf besonders empfindlich reagiert. Dazu wurde im Dezember 2008 eine Messinstrumentierung (Abb. 5-2) an einem Fenster der Westseite der Basilika angebracht. Die Ergebnisse der Klimamessungen sollen gemeinsam mit den Ergebnissen der restauratorischen Untersuchungen die Grundlage für die nachhaltige Konservierung der römischen Außenputze liefern.¹

2 Einfluss von klimatischen Faktoren auf Verwitterungsprozesse

Für die Verwitterungsprozesse ist eine Reihe von klimatischen Faktoren verantwortlich, zwischen denen es vielseitige Wechselwirkungen gibt (Abb. 5-3). Im Folgenden werden die unterschiedlichen klimatischen Einflussfaktoren kurz vorgestellt.

2.1 Luft- und Oberflächentemperatur

Die Temperatur hat Einfluss auf eine Vielzahl von Verwitterungsmechanismen. Besonders bedeutsam sind dabei Temperaturschwankungen, da sie zu Expansion bzw. Kontraktion der Baumaterialien führen können. Die Häufigkeit, Zeitskala und Stärke der Temperaturschwankungen sind entscheidend für die Auswirkungen auf das Gebäude. Bei vielen früheren klimatischen Studien wurden nur Messungen der Lufttemperatur durchgeführt, so dass Temperaturwechsel mit einer Zeitskala des Tagesgangs das Hauptsignal darstellten. Berührungsfreie Messungen der Oberflächentemperatur, wie sie auch in der vorliegenden Studie durchgeführt wurden, brachten die Erkenntnis, dass starke Temperaturänderungen auch auf sehr kurzen Zeitskalen stattfinden. Besonders kurzzeitige und starke Temperaturschwankungen werden dabei aufgrund ihres „schockartigen“ Verlaufs auch „thermische Schocks“ genannt.² Die kurzzeitigen Änderungen (15 bis 30 Minuten, mehrere Grad Celsius, z. B. Abschattung durch Wolken) haben starke Auswirkungen auf die obersten Schichten der Fassade (einige mm), und es entwickelt sich innerhalb des Materials ein Temperaturgradient, der zu Zugspannungen innerhalb der oberflächennahen Schichten führt.³ Dabei entstehen initiale Risse zunächst im Bereich von Diskontinuitäten im heterogenen Materialgefüge des Basilikaverputzes, die vor allem an den Kontaktbereichen der enthaltenen Quarz-, Sandstein-, Granit und Ziegelsplittkörner zur Kalkmörtelmatrix zu suchen sind. Die Stärke der thermischen Effekte hängt dabei auch von bauphysikalischen Materialeigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmespeicherkapazität und der Oberflächenalbedo, d. h. dem Reflexionsvermögen solarer Strahlung, ab. Diese Faktoren sind jedoch über die Zeit nicht konstant: So ändern sich die Wärmeleitfähigkeit und -kapazität mit dem Feuchtegehalt, die Albedo kann sich je nach Verschmutzungsgrad verändern.

Die Oberflächentemperatur hat darüber hinaus auch einen Einfluss auf Kondensations- und Evaporationsprozesse. Diese beiden Vorgänge sind wichtig für Verwitterungserscheinungen durch Salze. Ist die Oberflächentemperatur größer als der Taupunkt der Luft, so kann es zur Evaporation kom-



Abb. 5-1: Ansicht der Basilika mit Messbus im Juni 2009. Pfeil: instrumentiertes Basilika-Fenster

men, die Salzausblühungen zur Folge hat. Die damit verbundene Volumenvergrößerung löst im Laufe der Zeit mechanischen Stress auf das Material aus. Frost-Tau-Zyklen haben einen ähnlichen Effekt (Frostsprennung). Dieser Prozess hat für die Verwitterung einer Gebäudefassade in den gemäßigten Breiten zwar eine untergeordnete Bedeutung, da er nur auf den Winter beschränkt ist und das Vorhandensein von Salz zudem den Gefrierpunkt von Wasser herabsetzt. Aber durch seltene Frostsprennung können dennoch Risse im Gestein entstehen, die dann später durch die häufig auftretende Schädigung durch Salze erweitert werden.

2.2 Luft- und Materialfeuchtigkeit, Regen

Der Feuchtigkeitsgehalt des Baumaterials ist insbesondere für chemische Verwitterungsvorgänge von Bedeutung. Das Wasser ist als Reaktionspartner in eine Vielzahl chemischer Prozesse eingebunden. In Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte nehmen beispielsweise die im Putz enthaltenen Salze Wassermoleküle in ihr Kristallgitter auf („Hydratation“), vergrößern dadurch ihr Volumen und üben mechanischen Stress auf ihre Umgebung aus. Ist die Materialoberfläche mit Wasser benetzt, was z. B. nach Niederschlagsereignissen der Fall sein kann, kommt es zur erhöhten Ablagerung von Schadstoffen und Feinstaubpartikeln, die eine Fassade verschmutzen und chemisch beeinträchtigen können. Bei größeren Niederschlagsmengen bilden sich Wassertropfen, die je nach Masse und Materialporosität an der Wand herablaufen. Durch den Oberflächenabfluss können Bestandteile des Baumaterials chemisch gelöst und mechanisch verlagert werden. Eine Benetzung der Materialoberfläche mit Niederschlags- oder Kondenswasser kann zudem zu der Lösung von Salzen führen. Verdunstet das Wasser dann zu einem späteren Zeitpunkt, rekristallisieren Salze an der Oberfläche des Materials (s. auch 2.1).

2.3 Solare Strahlung

Ist ein Gebäude dem Sonnenlicht ausgesetzt, so steigt seine Oberflächentemperatur an. Gemäß der Geometrie eines

Gebäudes ergibt sich dabei durch Abschattung auf einer Fassade eine differenzierte Temperaturverteilung. Diese verändert sich im Tagesverlauf, und es können, je nach Ausrichtung der Fassade, zu bestimmten Tageszeiten erhebliche Temperaturschwankungen auftreten. Neben dem thermisch wirksamen Anteil der solaren Strahlung ist insbesondere die kurzwellige UV-Strahlung ein Risikofaktor für die antiken Relikte. UV-Strahlung ist hochenergetisch und verursacht photochemische Reaktionen, die eine Zersetzung insbesondere der Farbpigmente bewirken.

2.4 Wind und Luftschadstoffe

Ein Haupteinfluss des Windes auf die Verwitterung des antiken Putzes besteht in der mechanischen Herauslösung (Oberflächenreibung) von kleinen Partikeln des Baustoffs aus der Fassade. Ein weiterer mechanischer Faktor ist die Abrasion (Windschliff). Hierbei werden feste Partikel mit dem Wind transportiert und gegen eine Oberfläche getrieben.⁴ Dadurch entstehen zunächst kleinere Schäden, die sich jedoch durch anhaltende Belastung ausdehnen. Weiterhin werden durch Wind Luftschadstoffe transportiert, die Reaktionen mit dem Baumaterial auslösen können. Auch Niederschlagswasser wird durch den Wind an die Wand transportiert (Schlagregen). Der durch die Luftströmungen ausgelöste Staudruck übersteigt dabei die Kapillarkräfte um ein Vielfaches, so dass der Wind den Transport des Regenwassers in das Gemäuer hinein begünstigt. Der Windeinfluss hängt dabei wesentlich von der Umströmung des Gebäudes ab, die wiederum von der Gebäudeform und -ausrichtung sowie von der vorherrschenden Windrichtung beeinflusst wird.

3 Messungen

3.1 Messungen an der Basilika

In einer Fensternische der Basilika (Abb. 5-1) wurden 2009 und 2010 gemäß VDI 3786 (VDI 2006) Lufttemperatur, Luftfeuchte, Oberflächentemperatur der Innenseite, 2D-Wind und die auf die Fensterlaibung einfallende solare Strahlung gemessen (vgl. Abb. 5-2; Tabelle 1). Der Einsatz eines Sonic-Anemometers ist hier von entscheidender Bedeutung, da nur mit diesem Gerät die im Basilika-Fenster auftretenden geringen Windstärken und die schnellen Schwankungen des Windes gemessen werden können.

Tabelle 1: Instrumentierung in der Fensternische

Messgröße	Instrument
Windstärke, Windrichtung	2D-Sonic-Anemometer
Solare Strahlung auf die Wand	Pyranometer (2 x)
Oberflächentemperatur	IR-Thermometer (2 x)
Lufttemperatur und -feuchte	PT100 und kapazitiver Sensor, elektrisch ventiliert

Während einer Intensivmessphase im Juni 2009 fanden zusätzliche Messungen statt. Im Innenhof der Basilika wurde eine automatische Wetterstation (AWS) aufgebaut. Die Größen Wind, Temperatur, Feuchte, Strahlungsbilanz und Oberflächentemperatur konnten erfasst werden. Am Vorplatz der Basilika wurden an zwei Tagen Standmessungen (Wind, Temperatur, Feuchte, solare Strahlung) mit dem Messbus der Umweltmeteorologie durchgeführt (Abb. 5-1). Am 27. 07. 2010 und am 29. 10. 2010 sind die Verteilung der Oberflächentemperatur an der Westfassade der Konstantinbasilika mit einer Wärmebildkamera (Fluke TiR32) gemessen worden. Dadurch wurde die flächenhafte Verteilung der Fassadentemperatur im Tagesverlauf erfasst.

3.2 Messungen im Stadtgebiet

Das Fach Umweltmeteorologie betreibt seit 2001 eine Messstation in Trier-West (Wind, Feuchte und Temperatur) sowie am Trierer Moselstadion (Wind in 10 m Höhe, Temperaturmessungen in 2, 10 und 20 m Höhe). Weitere Messungen des Fachs Umweltmeteorologie finden auf einem Messgelände nahe der Universität statt; von diesen Messungen werden der Niederschlag (Laserdistrometer) und die UV-Strahlung verwendet. Für die Betrachtung der Klimatologie eines längeren Zeitraums werden die Daten der Station Trier-Petrisberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Für die Auswertung stehen geschlossene Zeitreihen von DWD-Tageswerten für den Zeitraum 1991 bis 2011 zur Verfügung. Luftschadstoffe im Stadtgebiet Trier werden an drei Stationen (Trier-Ostallee, Trier-Kaiserstraße und an der Universität) im Rahmen des Zentralen Immissionsmessnetzes (ZIMEN, Land Rheinland-Pfalz) erfasst.

4 Ergebnisse

4.1 Temperaturänderungen der Wandoberfläche

Abbildung 5-4 zeigt die Messungen im Basilika-Fenster für einen typischen Sommertag mit geringer Bewölkung (3. 6. 2009). Luft- und Wandtemperatur (Nordlaibung) zeigen einen ausgeprägten Tagesgang. Die solare Einstrahlung auf die Wand erreicht ein Maximum von 550 W/m² am Nachmittag. Der Temperatursprung der Wandtemperatur am Nachmittag erreicht einen Wert von mehr als 10 °C. Der Vergleich der Temperaturmessungen im Basilika-Fenster mit Trier-West und dem Innenhof der Basilika für den 3. 6. 2009 zeigt, dass insbesondere am Nachmittag die Temperaturen im Fenster deutlich über denen im Innenhof liegen. Während der Nacht weist die Station Trier-West die tiefsten Temperaturen auf, da hier der Wärmeinsel-Effekt der Stadt keine Auswirkungen mehr hat.⁵

Auf Abbildung 5-5 sind die Oberflächentemperaturen von Nord- und Südläubung im Vergleich für die beiden ersten Märzwochen 2011 zu sehen. Es wird deutlich, dass die Tagesschwankungen der Oberflächentemperatur auf der Nordlaibung sehr viel stärker sind. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass das antike Verputzmaterial dort stärker verwittert ist als auf der Südläubung: Die thermischen Schocks erreichen hier eine größere Intensität.

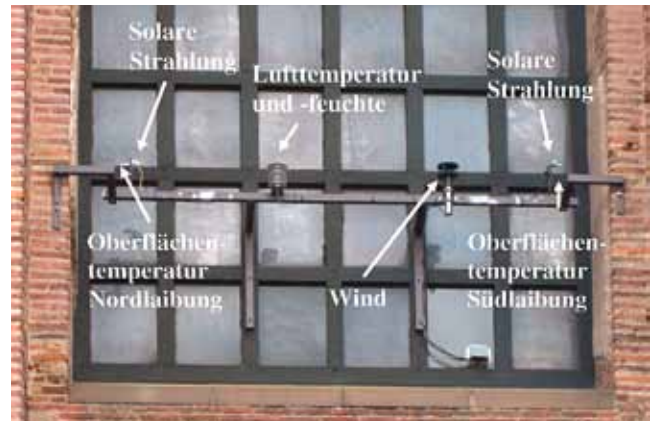


Abb. 5-2: Instrumentierung im Basilika-Fenster, März 2011. Details s. Tab. 1

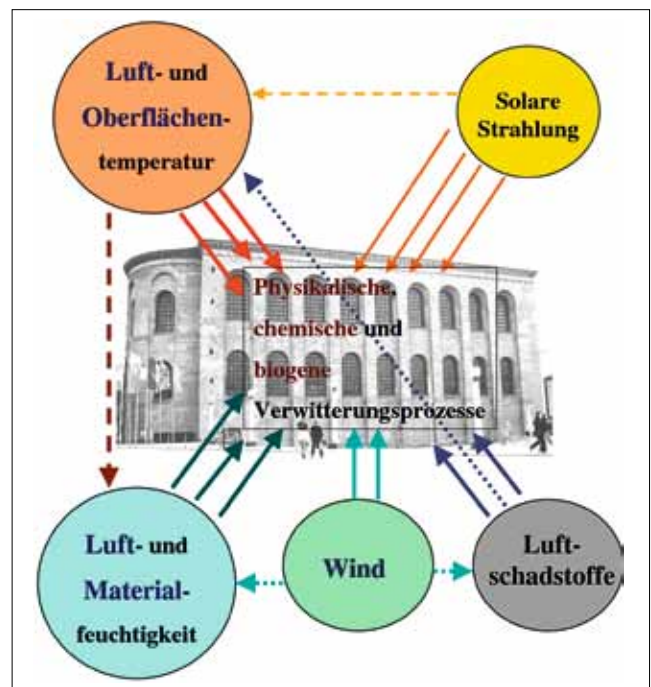


Abb. 5-3: Schema: Einflüsse von Klimafaktoren auf Verwitterungsprozesse

Abb. 5-4: Verlauf von Messgrößen an der Basilika am 3. 6. 2009: kurzweilige Einstrahlung auf die Wand (Nordlaibung, schwarz), Oberflächentemperatur der Wand (blau) und Lufttemperatur (rot)

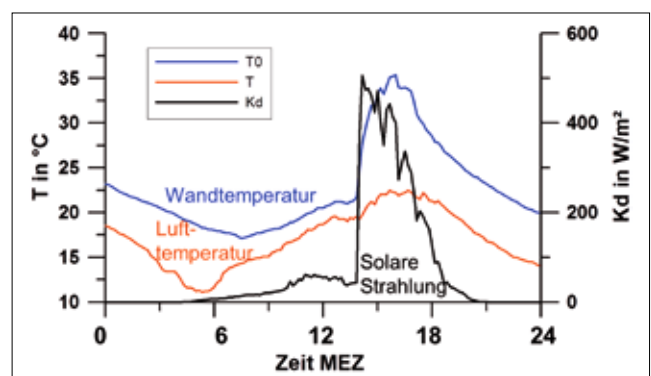


Tabelle 2: Anzahl der Phasenübergänge 2009 und 2010. Die Spalten entsprechen dem jeweiligen Ausgangszustand, während die Zeilen den jeweiligen Folgezustand angeben. Die gleichbleibenden Zustände (Diagonale) sind grau dargestellt.

Von	Eis	Kieserit	Hexahydrat	Epsomit	Lösung
Nach					
Eis	5 413	0	0	72	1
Kieserit	0	6 437	325	3	0
Hexahydrat	0	320	3 189	396	0
Epsomit	71	8	391	84 121	200
Lösung	2	0	0	156	2 900

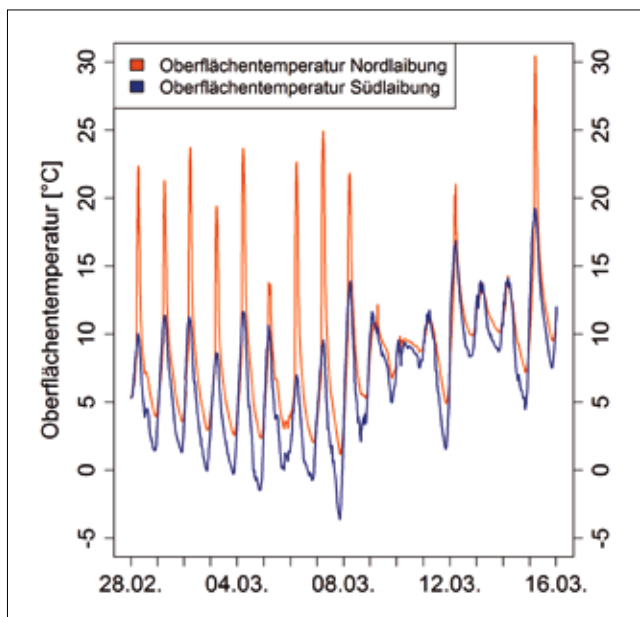
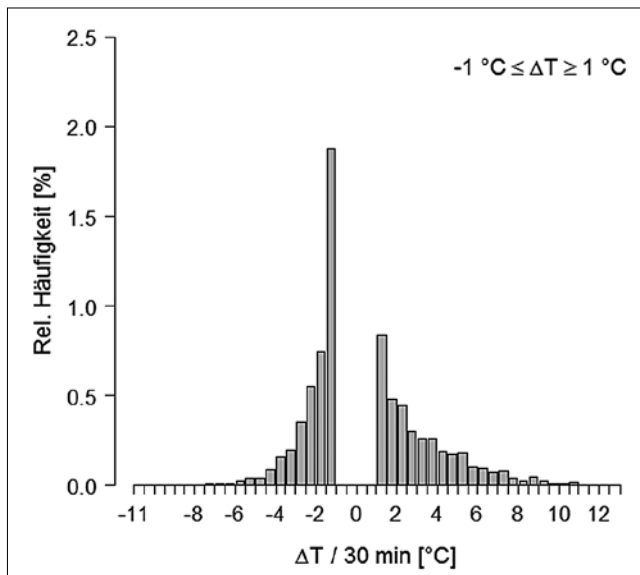


Abb. 5-5: Oberflächentemperatur an der Nordlaibung (rot) und an der Südlaibung (blau) für die ersten beiden März-Wochen 2011

Abb. 5-6: Histogramm der Verteilung der Temperaturänderung größer als 1 K in 30 Minuten in ½ °C-Klassen an der Nordlaibung für 2009 und 2010



Die Statistik der Temperaturverteilung ergibt für die Lufttemperatur im Fenster eine Normalverteilung, während die Wandtemperaturen eine bimodale Verteilung aufweisen, die auf die Bestrahlungseffekte an der Wand zurückzuführen ist. Zur Untersuchung der thermischen Schocks wurden die Temperaturänderungen an der Wand für unterschiedliche Zeiträume ermittelt. Am häufigsten sind geringe Temperaturänderungen, daher wurde ein Schwellenwert von 1 K zur Detektion von relevanten Temperatursprüngen gewählt. Die Häufigkeit der Temperatursprünge innerhalb eines Zeitintervalls von 30 Minuten nimmt mit zunehmender Temperaturänderung ab (Abb. 5-6). Dies geschieht sowohl in positiver als auch in negativer Richtung, die Extrema erreichen mehr als 10 °C. Diese großen Temperatursprünge am Fenster der Basilika lassen sich durch die Änderungen der kurzweiligen Einstrahlung erklären, die bis zu 700 W/m² betragen. In ca. 1 % der Fälle betragen die Änderungen in 30 Minuten mehr als 4 K, d. h. etwa 180 Mal pro Jahr.

Um die räumlichen Unterschiede der Oberflächentemperaturen zu ermitteln, wurden an ausgewählten Tagen halbstündlich Infrarotaufnahmen von der Westfassade der Konstantinbasilika gemacht. Abbildung 5-7 zeigt die Temperaturverteilung an einem fast unbewölkten Sommertag (27. 7. 2010). Während in den abgeschatteten Bereichen die Oberflächentemperatur unter 30 °C liegt, werden in den sonnenbeschienen mehr als 40 °C gemessen. Die maximalen Werte treten mit ca. 45 °C unterhalb der unteren Fensterreihe auf.

4.2 Statistik der Hydratationsstufen von Kieserit und Phasenübergänge

Das Mineral Kieserit im porösen Außenputz der Basilika kann unterschiedliche Zustände annehmen: Kieserit, Hexahydrat, Epsomit und Lösung. Aufgrund der unterschiedlichen Volumina der einzelnen Zustände des Minerals entstehen bei den Übergängen mechanische Kräfte. Auf Änderungen von Temperatur und relativer Feuchte reagiert das Mineral Kieserit (MgSO₄ · H₂O) auf zweierlei Wegen: Entweder ändert es durch Hydratation seine Phase in Hexahydrat (MgSO₄ · 6H₂O) oder Epsomit (MgSO₄ · 7H₂O), oder es findet ein Übergang in Lösung statt – insbesondere bei sehr hohen Werten für die relative Feuchte der Umgebungsluft.⁶ Umgekehrt gibt es die entsprechenden Übergänge bei Dehydratation.

Zur Ermittlung der Anzahl der Übergänge wurde wie folgt verfahren: Zunächst wurde den vier möglichen Kieseritzu-

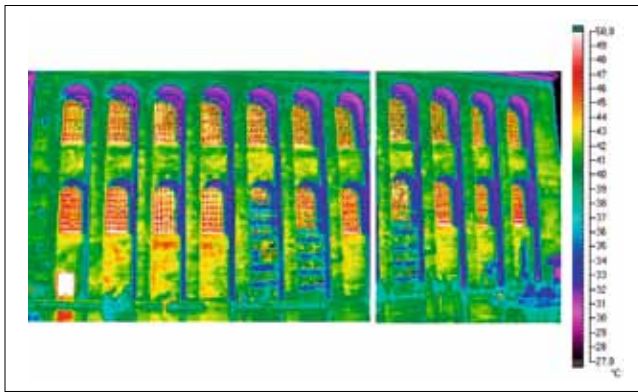


Abb. 5-7: Infrarotaufnahme der Westfassade der Basilika am 27. 7. 2010 um 17:30 Uhr

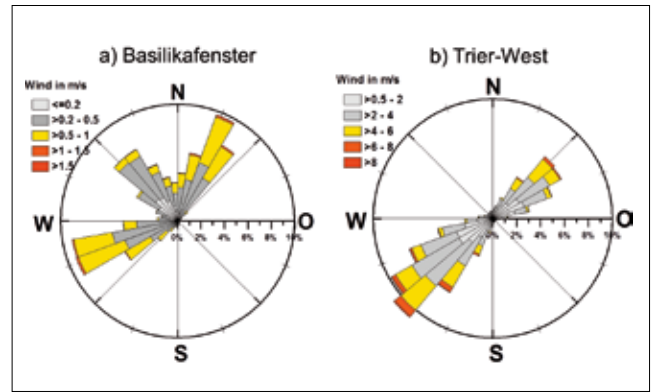


Abb. 5-8: Windrosen für den mittleren 10min-Wind: a) im Basilika-Fenster 2009 und b) als mehrjährige Klimatologie in Trier-West

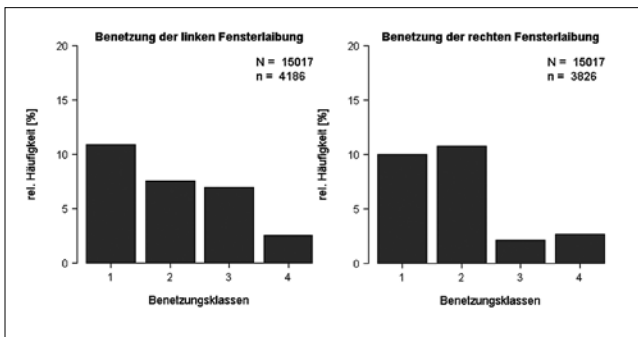


Abb. 5-9: Benetzungshäufigkeit der Fensterlaibungen (Nord = links, Süd = rechts) für Benetzungsklassen (s. Tabelle 3) aus zehnmütigen Niederschlagsterminen im Zeitraum vom 01. 01. 2009 bis zum 29. 07. 2010

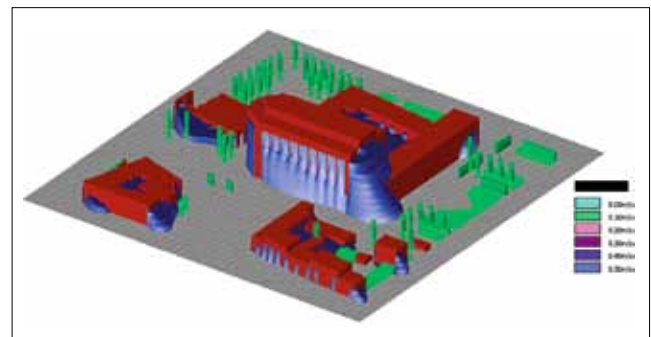


Abb. 5-10: 3D-Darstellung der Strömungssimulation für eine Anströmung aus 50° mit 1.6 m/s. rotbraun: Gebäude, grün: Vegetation, blau bis türkis: Volumina mit niedrigen Windgeschwindigkeiten (unterhalb 0.5 m/s) (in den anderen ist die Windgeschwindigkeit höher)

ständen noch der Phasenübergang zu Eis hinzugefügt, um die Frostsprengung zu quantifizieren. Zur Abschätzung der mechanischen Belastungen wurde die Anzahl der Übergänge ermittelt, d. h. wie oft die Phasengrenzen im Untersuchungszeitraum überschritten wurden. Als Datengrundlage dienten dabei Messungen der Klimastation in der Fensternische. Als Temperatur wurde die gemessene Wandtemperatur verwendet. Direkte Messungen der relativen Feuchte an der Wand bzw. im Porenraum liegen nicht vor. Die relative Feuchte an der Wand wurde daher aus der Wandtemperatur und dem Dampfdruck der Luft berechnet.

Die Gleichgewichtslinien für das Lösungs-Rekristallisationsgleichgewicht (Kieserit, Hexahydrat, Epsomit) und das Hydratations-Dehydratationsgleichgewicht zwischen den einzelnen Phasen wurden gemäß STEIGER et al. (2008) übernommen. Das Unterschreiten der 0 °C-Grenze wurde als alleiniges Kriterium für den Übergang zum Zustand „Eis“ angenommen. Tabelle 2 fasst die Statistik der Übergänge der Hydratationsstufen 2009 und 2010 zusammen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Phase Epsomit ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) an der Basilika der mit Abstand häufigste Zustand des Minerals Kieserit ist. Von dieser Phase gehen entsprechend auch die meisten Änderungen aus, v. a. als Übergang zu Hexahydrat. Der zweithäufigste Zustand

ist Kieserit mit Übergängen überwiegend zu Hexahydrat, das insgesamt die meisten Übergänge in Form von Hydratation/Dehydratation aufweist. Übergänge vom gefrorenen zum ungefrorenen Zustand des Minerals sind deutlich seltener und treten nur im Januar, Februar und Dezember auf.

4.3 Benetzung durch Schlagregen

Abbildung 5-8a zeigt die Windrose für das Basilika-Fenster für 2009. Die Längsseite der Basilika ist nach etwa 16° ausgerichtet, daher treten fast nur Windrichtungen aus einem Sektor von Südwest-Nordost auf. Es lassen sich drei Hauptrichtungen des Windes erkennen, die aus der Beeinflussung der Luftströmung durch die Basilika selbst und die umgebenden Gebäude resultieren. Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind dabei relativ klein und liegen im Bereich von 0 bis 1.5 m/s. Im Gegensatz dazu zeigt die Darstellung der Station Trier-West (Abb. 5-8b) für einen mehrjährigen Zeitraum den Kanalisierungseffekt des Moseltals, das etwa von Südwest nach Nordost verläuft. Die Windgeschwindigkeit ist hier deutlich höher als an der Basilika.

Um den Feuchtigkeitseintrag an den Fensterlaibungen infolge von Schlagregen zu beurteilen, wurden vier Benet-

zungsklassen definiert (Tabelle 3). Bei den Klassen 1 und 2 sind die Grundvoraussetzungen bezüglich der Anströmrichtung des Windes und der Niederschlagsmenge erfüllt, während in den Klassen 3 und 4 zusätzlich die Windgeschwindigkeit in den Fensternischen einen kritischen Wert überschreitet. Dieser Wert wurde für kleine Regentropfen von 0.6 mm Durchmesser berechnet, mit der Bedingung, dass die Tropfen während ihrer Falldauer über die Fensterhöhe in die Fensternischen hineintransportiert werden. Die beiden niedrigeren Benetzungsgrade bedeuten, dass eine weniger intensive Benetzung auftreten kann, wenn im Niederschlag enthaltene kleinere Regentropfen von der schwachen Windströmung an die Laibungen transportiert werden. Die Grade 3 und 4 geben an, dass eine Benetzung der gesamten Nische durch Schlagregen wahrscheinlich ist.

Tabelle 3: Die Benetzungsklassen als Maß für die Schlagregenintensität (ff = Windstärke, rr = Niederschlagsmenge in 10 Minuten)

	$0 \text{ mm} < rr < 0.1 \text{ mm}$	$rr \geq 0.1 \text{ mm}$
$ff < 0.6 \text{ m/s}$	Klasse 1	Klasse 2
$ff \geq 0.6 \text{ m/s}$	Klasse 3	Klasse 4

Durch eine kombinierende Analyse zwischen den an der Konstantinbasilika gemessenen Winddaten und den Messergebnissen des Laserdistrometers (Messung der Niederschlagsmenge) an der Universität Trier konnte ermittelt werden, wie häufig die einzelnen Benetzungsgrade an den verschieden ausgerichteten Fensterseiten erreicht wurden (Abb. 5-9).

4.4 Strömungssimulationen

Es wurden Simulationen der Umströmung der Konstantinbasilika mit dem Modell ENVI-met⁷ bei drei verschiedenen Anströmrichtungen durchgeführt. Abb. 5-10 zeigt Ergebnisse für eine Simulation mit einer Anströmung aus 50° mit 1.6 m/s. Es werden hier nur die Bereiche mit Windstärken kleiner 0.5 m/s dargestellt. Generell herrschen um die Konstantinbasilika niedrigere Windgeschwindigkeiten als in den übrigen Bereichen des Modellgebiets. Vor allem in den Fensternischen und im Leebereich südlich der Basilika gibt es größere Regionen mit sehr geringer Windgeschwindigkeit. Die Luft strömt dabei etwa parallel an der Westfassade der Basilika vorbei. Die Fensternischen wirken als Rauigkeitselemente, die die bremsende Wirkung auf den Wind verstärken.

5 Fazit und Ausblick

Die Hauptbelastung für die Außenputze in den Fensterlaibungen der Basilika kann in den raschen Temperaturwechseln gesehen werden. Diese führen zu direkten thermischen Belastungen, aber auch zu Phasenübergängen. An der Nordlaibung können Übergänge zwischen Kieserit-Hexahydrat-Epsomit ca. 700-mal pro Jahr auftreten. An der Südlaubung werden aufgrund der geringeren solaren Strahlung weniger starke Einflüsse erwartet. Dies wird durch die im März 2011 begonnenen Messungen der Oberflächentemperatur der Südlaubung bestätigt. Die Abschätzung der Häufigkeit von Schlagregen in die Fensternischen ergibt, dass aufgrund der niedrigen Windgeschwindigkeiten meistens nur die äußeren Ränder der Laibungen betroffen sind. Die Benetzung einer gesamten Nischenseite kommt nur selten vor. Auch hier zeigt sich eine höhere Belastung der Nord- gegenüber den Südlaubungen.

Abbildungsnachweise

alle Abbildungen: Universität Trier, Umweltmeteorologie (Günther Heinemann: 1, Kathrin Hüb: 2)

Literatur

- Michael BRUSE, Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen, Bochum 1999 (<http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/BruseMichael/>) (letzter Zugriff: 6. 8. 2012)
- Dario CAMUFFO, Physical weathering of stones, in: The Science of the Total Environment, 167, 1995, S. 1–14
- Brian OFFERLE – C. S. B. GRIMMOND – K. FORTUNIAK – W. PAWLAK, Intraurban differences of surface energy fluxes in a central european city, in: Journal of Climate and Applied Meteorology, 45, 2006, S. 125–136
- Bernard J. SMITH – M. GOMEZ-HERAS – S. MCGABE, Understanding the decay of stone-built cultural heritage, in: Progress in Physical Geography, 32 (4), 2008, S. 439–461
- Michael STEIGER – Kirsten LINNÖW – Herbert JULING – Gerd GÜLKER – Akram EL JARAD – Stefan BRÜGGERHOFF – Dirk KIRCHNER, Hydration of $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and generation of stress in porous materials, in: Crystal Growth & Design, 8, 2008, S. 226–334
- Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie VDI-Blatt 3786, Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen – Messstation, Berlin 2006

¹ S. die Beiträge von RIEDL-FUNKE und RIEDL in dieser Publikation.

² SMITH et al. 2008, S. 444.

³ Ebenda, S. 444 ff.

⁴ CAMUFFO 1995.

⁵ OFFERLE et al. 2006.

⁶ STEIGER et al. 2008, S. 337.

⁷ BRUSE 1999.