

Abstimmung zwischen Innendämmung und Schlagregenschutz am Beispiel der Elbphilharmonie

Mario Stelzmann, HTWK Leipzig, mario.stelzmann@htwk-leipzig.de

Ulrich Möller, HTWK Leipzig, ulrich.moeller@htwk-leipzig.de

Rudolf Plagge, TU Dresden, rudolf.plagge@tu-dresden.de

John Grunewald, TU Dresden, john.grunewald@tu-dresden.de

1 Einleitung

Die zukünftig geforderten Energieeinsparungen im Gebäudebestand erfordern, für den Bereich von Gebäuden mit erhaltenswerten historischen Fassaden, das Anbringen einer Innendämmung. Eine Innendämmung verändert die bauphysikalische Funktionsweise der Außenwandkonstruktion wesentlich. Die Tauwasserebene liegt in der Konstruktion und erhöht die Gefahr einer Auffeuchtung im Bereich hinter der Dämmung. Zusätzlich verringert sich in den Wintermonaten, aufgrund der fehlenden Heizenergie, die Temperatur in der Außenwand. Das hat eine Reduzierung des Trocknungspotenzials zur Folge. Gelangt nun Schlagregen in die innenseitig gedämmte Außenwandkonstruktion, kann diese nur noch unzureichend abtrocknen und die Fassade bleibt länger feucht. Damit steigt die Gefahr von Frostschäden. Aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge besteht eine allgemein erhöhte Anforderung an den Schlagregenschutz für nachträglich innen gedämmte Konstruktionen. Bei verputzten Fassaden ist eine baupraktische Realisierung des Witterungsschutzes mithilfe von modernen Oberflächenbeschichtungssystemen in der Regel unkritisch. Wasserabweisende Farbbeschichtungen reduzieren das kapillare Wasseraufnahmeverhalten der Konstruktion und gewährleisten so deren Schlagregenschutz. Im Gegensatz zu verputzten, sind steinsichtige Fassaden deutlich problematischer. Diese heterogenen Fassadenkonstruktionen bestehen aus verschiedenen Baustoffen wie Klinkern, Fugenmörtel, Hintermauermörtel und Ziegeln. Diese Baustoffe haben je unterschiedliche Quellschwind- oder Temperaturdehnungsverhalten, was zu Flankenabrissen zwischen Klinkern und Fugenmörtel sowie Haarrissen im Fugenmörtel führen kann. In derartige Risse kann auf die Fassade auftreffendes Regenwasser deutlich leichter eindringen. Hinzu kommen herstellungsbedingte qualitative Unterschiede der verbauten historischen Baustoffe, welche den Schlagregenschutz beeinflussen können. Die Bewertung einer Innendämmung ist somit immer auch unter Berücksichtigung des Schlagregenschutzes der Außenwandkonstruktion zu betrachten [19]. Eine nachträgliche Innendämmung kann nur unter Berücksichtigung aller relevanten Größen funktionieren.

2 Normative Nachweisführung des Schlagregenschutzes bei Innendämmungen

Bei Innendämmungen ist es in der Regel erforderlich einen bauphysikalischen Nachweis zu führen. Die DIN 4108 legt wärmeschutz- und feuchtetechnische Anforderungen von Gebäuden und Bauteilen fest. Im zweiten Teil der Norm wird das Kriterium des Mindestwärmeschutzes definiert, wobei die Tauwasserbildung und

damit ein Schimmelpilzbefall auf raumseitigen Bauteiloberflächen unterbunden werden kann. Zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum auf raumseitigen Bauteiloberflächen sollte die relative Feuchte im Monatsmittel unter 80% verbleiben. Um konstruktive Schäden zu vermeiden, muss auch die Bildung von Tauwasser hinter der Dämmung ausgeschlossen werden, was eine Reduzierung der Feuchte in jedem Fall $< 100\%$ r.H. fordert. Im Planungsleitfaden der WTA zur Innendämmung wird als Grenzkriterium für die Feuchte hinter der Dämmung 95% ausgewiesen. Bei diesem Feuchtegehalt wird einerseits freies Tauwasser vermieden sofern die Temperaturen oberhalb von -5°C , so dass Schäden durch Frostwirkungen verhindert werden können. Ferner erfüllt der Grenzwert von 95% r.H. die Anforderungen aus dem Holzschutzbereich, wonach holzzerstörende Pilze bei Bedingungen $> 95\%$ r.H. aktiviert werden können.

Teil drei der DIN 4108 definiert die feuchteschutz-relevanten physikalischen Größen und beinhaltet Festlegungen für Grenzwerte des Schlagregenschutzes. In der Norm wird der konstruktive Schlagregenschutz von Putzen und Beschichtungen mit folgenden Baustoffkennwerten beschrieben: Wasseraufnahmekoeffizienten (A_w in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})]$), wasserdampfdiffusionsäquivalenter Luftschichtdicke (s_d in $[\text{m}]$) und dem Produkt der beiden Kennwerte. Je nach Schlagregenbeanspruchung, resultierend aus der geographischen Lage, werden in der Norm keine Anforderungen bzw. ein wasserabweisender Schlagregenschutz mit ($A_w \leq 0,008 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$) empfohlen.

Speziell für den Nachweis des Schlagregenschutzes bei Innendämmung bietet das WTA-Merkblatt 6-5. Es beschreibt die Durchführung einer hygrothermischen Simulationsberechnung für den Nachweis einer Innendämmung. Für die Bewertung des vorhandenen Schlagregenschutzes bietet das WTA-Merkblatt einen allgemeinen Grenzwert von $A_w \leq 0,003 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$ an, bei dem ein allgemein ausreichender Schlagregenschutz sichergestellt ist. Gegenüber der DIN 4108-3 sind die allgemeinen Anforderungen an den Schlagregenschutz somit nochmals verschärft.

Bei der praktischen Bemessung von Innendämmungen in Baukonstruktionen zeigt sich jedoch, dass eine getrennte Betrachtung zum Feuchteeintrag aus Tauwasserbildung und Schlagregen nicht immer zielführend ist. Vielmehr sind dabei verschiedene objektspezifische Einflüsse aus dem geplanten Innendämmsystem und vorhandenem Schlagregenschutz im Zusammenhang zu betrachten. Bei der Anwendung von hygrothermischen Simulationsprogrammen ist es prinzipiell nicht notwendig normierte Grenzwerte für die Bewertung des Schlagregenschutzes einzuhalten. Hier können - im Gegensatz zur DIN 4108-3 bzw. dem WTA-Merkblatt 6-5 - experimentell bestimmte Materialkennwerte der originalen Bausubstanz direkt in den Berechnungsalgorithmus einfließen. Weiterhin können Simulationswerkzeuge objektspezifische Sanierungslösungen definieren, die eine ideale Abstimmung zwischen Wärmeschutz, Feuchtequellen und Austrocknungspotentialen ermöglichen. Mithilfe einer solchen hygrothermischen Bewertung von Konstruktionen ist es möglich, Feuchteschäden a priori zu vermeiden. Zur Bemessung einer Innendämmung, insbesondere für eine Abstimmung zwischen Innendämmung und Schlagregenschutz, ist daher der Einsatz von hygrothermischen Simulationsverfahren gefordert.

3 Der Wasseraufnahmekoeffizient als Kriterium für die Bewertung des Schlagregenschutzes

Der Schlagregenschutz von verputzten oder steinsichtigen Fassaden definiert sich über bauphysikalische Eigenschaften deren verbauten Fassadenbaustoffe. Ein geringer Wasseraufnahmekoeffizient (A_w -Wert) reduziert die Menge an in die Konstruktion eindringenden und in tiefere Schichten weiterleitenden flüssigen Wassers, das bei Schlagregenereignissen auf die Fassade auftrifft. Er beschreibt den Transport von flüssigem Wasser in porösen Stoffen und ist damit speziell für die Bewertung von historischen Bestandsfassaden als Kriterium der Qualität des Schlagregenschutzes von besonderer Bedeutung. Der standardisierte Laborversuch zur Bestimmung des A_w -Wertes wird in der EN ISO 15148 beschrieben [21]. Der Kennwert definiert sich aus dem linearen Anstieg der aufgenommenen Wassermenge, einer definierten Prüffläche über die Wurzel der Prüfdauer. Der A_w -Wert bzw. W_w -Wert wird in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})]$ bzw. $[\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})]$ angegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit lässt sich der Kennwert in vier verschiedene Bereiche untergliedern: wassersaugend ($A_w \geq 0,033 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$), wasserhemmend ($0,008 < A_w < 0,033 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$), wasserabweisend ($A_w \leq 0,008 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$) und schlagregensicher nach WTA Merkblatt 6-5 ($A_w \leq 0,003 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$). In Abbildung 1 sind diese Bereiche in einem Diagramm der kapillaren Wasseraufnahme aufgetragen über die Wurzel der Zeit dargestellt. Je flacher die Neigung der Kurve, umso geringer ist der Wasseraufnahmekoeffizient.

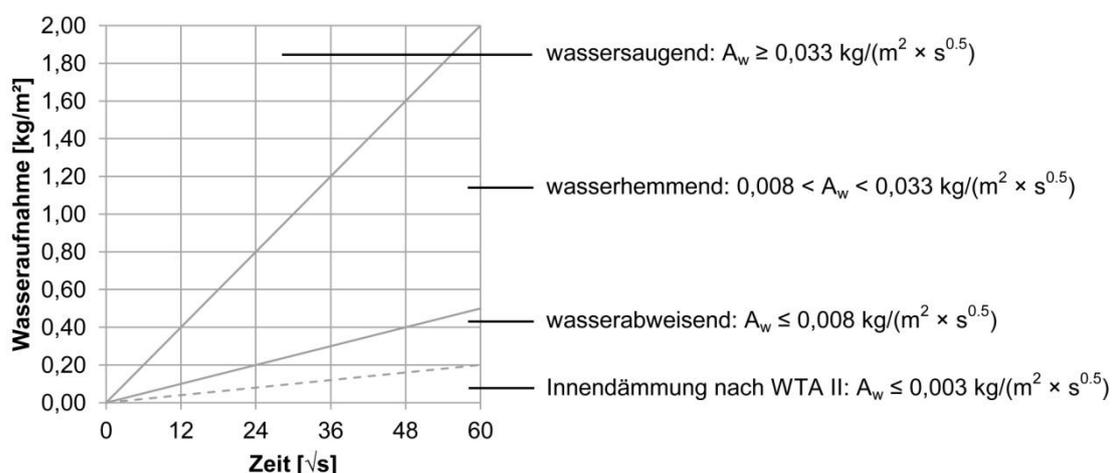


Abbildung 1: Diagramm der kapillaren Wasseraufnahme aufgetragen über die Wurzel der Zeit mit insgesamt vier Bereichen zur qualitativen Bewertung des Schlagregenschutzes von Fassaden.

Weiterhin ist das Austrocknungsverhalten von Relevanz für Schlagregenschutz. Der Wasserdampfdiffusionskoeffizient (μ -Wert) beschreibt das Trocknungspotential von Fassadenbaustoffen. Speziell beim Beschichten von historischen Baustoffen ist darauf zu achten, dass das vorhandene Trocknungspotential nicht zu stark eingeschränkt wird.

4 Bauphysikalische Untersuchungen am Beispiel Kaispeicher Elbphilharmonie

Der Kaispeicher A ist ein ehemaliges Lagerhaus in der Hamburger HafenCity. Er steht in besonderer Lage auf der Spitze des Kaiserhöfts, einer Kaizunge in der Elbe. Das etwa 35 m hohe Gebäude wurde im Jahr 1963 errichtet. Seit 2005 wird die historische Sichtmauerwerkfassade in den Bau der Elbphilharmonie integriert. Dafür wurde das Gebäude entkernt und bis auf die Außenwände zurückgebaut. Im Jahr 2007 erfolgte im Rahmen der Bauarbeiten, der Abbruch der Dachkonstruktion mit anschließendem Abtragen der Stahlbetonskelettbau-Konstruktion im Inneren des Gebäudes. Die Außenwandkonstruktion war somit zu Beginn der Bauphase auch von der Innenseite frei der Witterung ausgesetzt. Die besonders exponierte Lage des Gebäudes in einem Gebiet mit hohen Niederschlagsmengen resultiert in einer allgemein hohen Schlagregenbeanspruchung der Fassade [1, 2, 3, 20]. Die frühere Nutzung des Speichers als Lager für Handelsgüter bedeutete in hygrothermischer Hinsicht eine nur geringe Feuchteproduktion im Gebäudeinneren. Zur damaligen Zeit bestanden praktisch keine Anforderungen an den Wärmeschutz. Die Außenwände konnten während des Winters auch zum Innenraum hin austrocknen. Der Bauzustand der Bestandsaußenwände ist folglich durch einen hohen Wassereintrag gekennzeichnet.

4.1 Ausgangsfeuchte im Mauerwerk

Für eine Abschätzung des Feuchtezustandes während der Bauphase wurde eine entsprechende Analyse am Gebäude durchgeführt. Die Messungen zur Durchfeuchtung der Außenwandkonstruktion ergaben ein heterogenes Bild. Daraus geht hervor, dass in vielen Bereichen der Konstruktion eine erhebliche Feuchtebelastung vorliegt. Viele gemessene Wassergehalte zeigen eine nahezu vollständige Durchfeuchtung der Ziegel. Andere Messpositionen sind wiederum relativ trocken. Der Schlagregeneinfluss macht sich durch hohe Wassergehalte in den Ziegeln der West-, Nord- und Ost- exponierten Fassaden kenntlich. Die südliche Exposition weist im Mittel den geringsten Feuchtegehalt auf. Eine typische Feuchteverteilung von Nord-West orientierten Wänden ist in Abbildung 1 zu sehen.

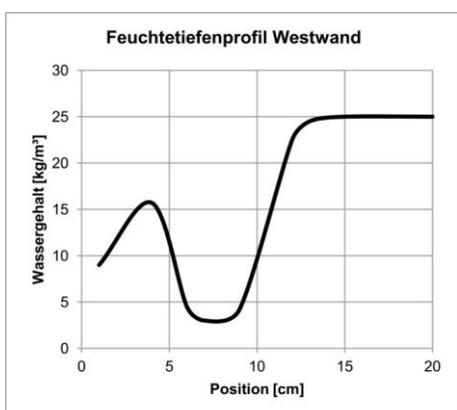


Abbildung 2: Typisches Tiefenprofil des Wassergehaltes der nach Westen orientierten Wand.

Die Feuchteverteilung im Wandaufbau zeigt an, dass die Feuchte sowohl von außen infolge Schlagregen, als auch von innen aufgrund der Baufeuchte in den Wandaufbau eingedrungen ist. Im Mittel weist die Gesamtkonstruktion einen Durchfeuchtungsgrad von über 10 Vol% auf. Bei einer Porosität des Ziegels von ~28% sind rund 40% aller Poren mit Wasser gefüllt. Damit sind im Fassadenmauerwerk der Elbphilharmonie rund 176 m³ Wasser eingetragen.

4.2 Untersuchungen zum Schlagregenschutz der Bestandsfassade

Die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen zeigen einen erheblichen Feuchteeintrag. Um die notwendigen Sanierungsmaßnahmen der Fassade bestimmen zu können, wurde zunächst die Ausgangssituation des vorhandenen Schlagregenschutzes bestimmt.

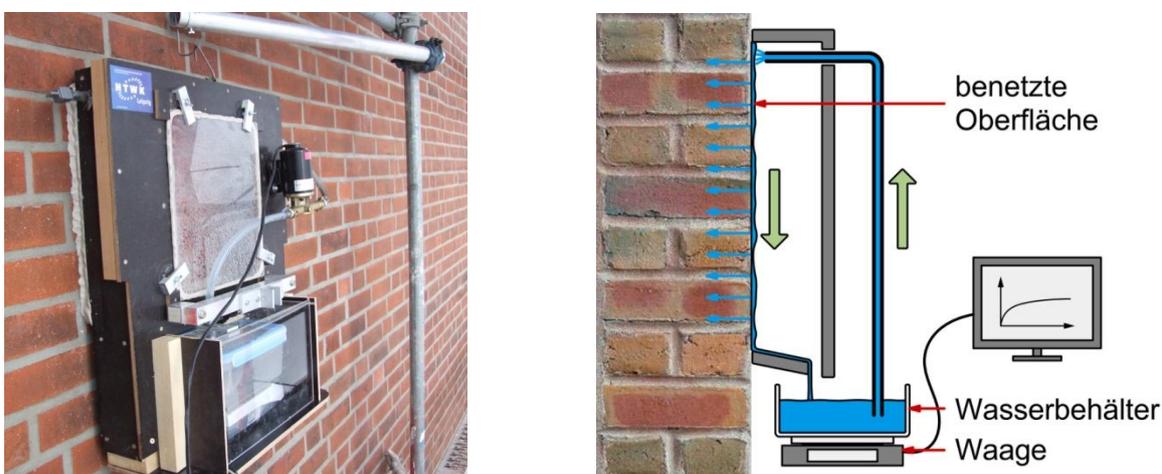


Abbildung 3: Messgerät zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten Bild (links) und Prinzipskizze (rechts).

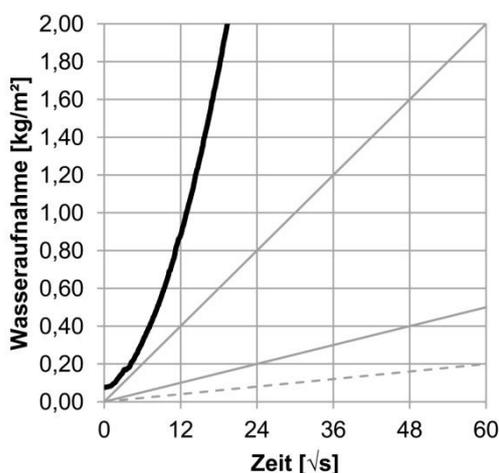


Abbildung 4: Messdaten zur kapillaren Wasseraufnahme der unsanierten Sichtmauerwerkfassade des Kaispeichers, aufgetragen über die Wurzel der Zeit.

Dafür erfolgte die Untersuchung des kapillaren Wasseraufnahmeverhaltens der Fassadenoberfläche mithilfe der zerstörungsfreien Technologie des Wasseraufnahmemessgerätes nach [4]. Der zerstörungsfreie Aufbau sowie die prinzipielle

Funktionsweise der Apparatur kann Abbildung 3 entnommen werden. In Abbildung 4 sind originale Messdaten dieser Untersuchungen dargestellt. Im Ergebnis muss die Fassade als stark wassersaugend mit einem Wasseraufnahmekoeffizient von $A_w = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$ klassifiziert werden. Die Untersuchung bestätigt den Verdacht der vorgeschalteten Feuchtetiefenprofil-Messungen, dass die Bestandsfassade der Elbphilharmonie einen unzureichenden Schlagregenschutz aufweist.

4.3 Definition der Anforderungen an die Sanierung des Schlagregenschutzes

Aus obigen Messungen wird ersichtlich, dass eine Ertüchtigung des Schlagregenschutzes erforderlich ist. Für das Erreichen der Schlagregendichtheit von Sichtmauerwerkfassaden kommen unterschiedliche Imprägniersysteme zum Einsatz. Sie stellen die einzige Möglichkeit dar, das kapillare Wasseraufnahmeverhalten zu reduzieren und gleichzeitig die Fassadenoptik beizubehalten. Die Hydrophobierung einer Sichtmauerwerkfassade muss jedoch sorgfältig geplant und ausgeführt werden, um Folgeschäden zu vermeiden [5, 6, 18]. Der Erfolg einer nachträglichen Hydrophobierung ist an folgende Kriterien geknüpft:

- möglichst lange Funktionsdauer des Schlagregenschutzes,
- homogenes Eindringen der Hydrophobierung bis in eine Tiefe von $>7\text{mm}$ zur Verhinderung des Schlagregeneintrages über Haarrisse,
- Einsatz einer Emulsionscreme, die aufgrund ihres anfänglich hydrophilen Charakters sich auch auf feuchteren Untergründen einsetzen lässt,
- das Trocknungspotential der Außenwand sollte nicht verschlechtert werden, um eine Feuchteakkumulation hinter der Imprägnierung zu verhindern,
- unveränderter optischer Eindruck der Ziegel nach der Maßnahme.

4.4 Laboruntersuchungen von unbehandelten Bestandsziegeln des Kaispeichers

Das obige Anforderungsprofil an eine hydrophobe Imprägnierung macht deutlich, dass alle einzelnen Punkte auf das Mauerwerk des Kaispeichers abzustimmen sind. In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Hydrophobierungssysteme geprüft und gemäß oben beschriebener Anforderungen adaptiert. Dabei wurden qualitativ hochwertige Produkte ausgewählt, die technologisch das Prinzip einer adaptiven hydrophoben Imprägnierung unterstützen. Geprüft wurden zwei klassische Hydrophobierungen sowie sechs hydrophobe Imprägnierungsemulsionen mit unterschiedlichen Anteilen des Wirkstoffs.

Zur Bewertung der hydrophoben Wirkung der Maßnahme wurden Ziegelproben aus der Konstruktion entnommen und daraus geeignete Probekörper im Labor hergestellt. Die vorkonditionierten Proben wurden sukzessive in den hygrothermischen Messablauf des IBK-Labors eingeschleust und verschiedene relevante Materialkennwerte gemessen [7].

In einem ersten Schritt wurden die unbehandelten Materialproben gemessen. Danach wurden die Proben randomisiert in Probenkollektive unterteilt und so den jeweiligen Hydrophobierungen zugewiesen. An diesen Materialproben wurden im zweiten Schritt die verschiedenen Imprägnierungssysteme gemäß Herstellerangaben appliziert und anschließend wiederum die entsprechenden Materialkennwerte

gemessen. Somit liegen für jede Imprägnierungsvariante sowohl die Referenzmessungen der unbehandelten wie auch der applizierten Proben vor. Damit können die Effekte einer Hydrophobierung eindeutig interpretiert werden, da der Einfluss der Materialvariabilität auf das Ergebnis keinen Einfluss nimmt.

Ein zentrales Laborexperiment zur Bewertung der Funktionsfähigkeit einer hydrophoben Imprägnierung ist das Wasseraufnahmeexperiment [6, 7, 21]. Bei hohen Wassergehalten erfolgt der gesamte Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt vor, wenn ein Baustoff in Wasser getaucht oder durch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der daraus resultierende Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Baustoffeigenschaft flüssiges Wasser aufzusaugen und über dessen System von Kapillaren in tiefere Baustoffschichten zu transportieren. Die unbehandelten Ziegel besitzen bei der Wasseraufnahme durch die Ziegeloberfläche einen Wasseraufnahmekoeffizienten von $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$. Die Laboruntersuchungen zeigen somit ein ähnliches Bild, wie die Ergebnisse der Voruntersuchungen zum kapillaren Wasseraufnahmeverhalten der Bestandsfassade.

Während des Wasseraufnahmeexperimentes durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in einer Probe ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt [m^3/m^3] bezeichnet wird. Der kapillare Wassergehalt der beprobten Steine beträgt im Mittel 18,6 Vol% mit einer Streubreite von $\pm 2 \text{ Vol}\%$.

Neben der kapillaren Feuchteaufnahme ist besonders die Abtrocknung des in die Konstruktion gelangten Wassers relevant. Nach einer hydrophoben Imprägnierung sollte in der Konstruktion befindliches Wasser bzw. über Fugen oder Risse in den Ziegel gelangte Feuchte problemlos wieder abtrocknen können. Bei geringen relativen Luftfeuchten erfolgt der Feuchtetransport dominant über die Wasserdampfdiffusion. Mit Hilfe des sogenannten „Dry-Cup-Verfahrens“ kann dieser Wasserdampftransport gemessen werden [7].

Für die μ -Wert Messungen wurden insgesamt 25 Probekörper erstellt. Auch hier wird darauf geachtet, dass der Ziegel eine natürliche, unbehandelte Oberfläche ohne Abplatzungen und größere Risse aufweist. Im Mittel beträgt der μ -Wert durch die Ziegeloberfläche 24,7, die Standardabweichung beträgt dabei ca. 5. Zur Überprüfung der Trocknung werden zusätzlich Trocknungsexperimente durchgeführt [7, 8]. Sie dienen der Verifizierung der Austrocknung.

4.5 Laboruntersuchungen von behandelten Bestandsziegeln des Kaispeichers

Für eine hygrische Bewertung der applizierten Hydrophobierungen sind der Wasseraufnahmekoeffizient und der Wasserdampfdiffusionskoeffizient der behandelten Proben von Bedeutung. Durch die Applikation der Hydrophobierungen wird die kapillare Aufnahme je nach Wirkstoff, Applikationstyp und Wirkstoffkonzentration reduziert. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

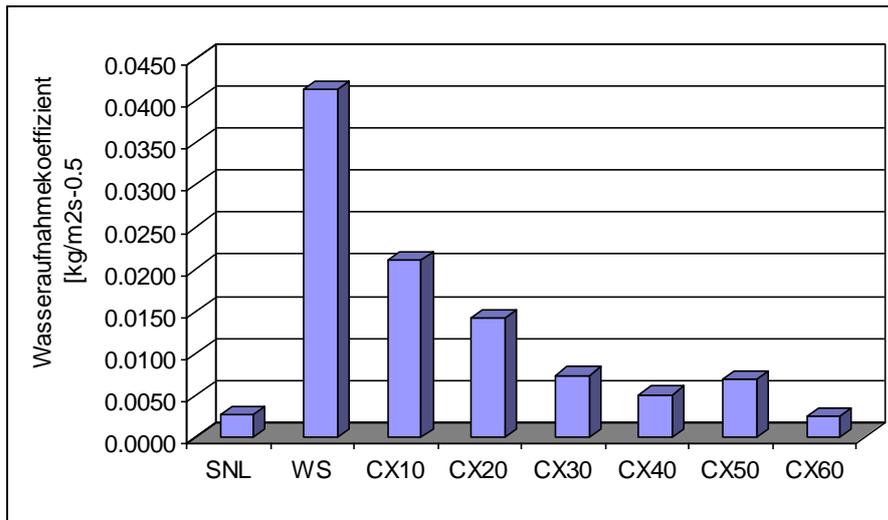


Abbildung 5: Vergleichende Ergebnisse: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient bei unterschiedlichen Hydrophobierungssystemen.

Bei Einsatz der schwach wirksamen Hydrophobierung Fungosil WS verringert sich beispielsweise die Wasseraufnahme um den Faktor 5. Die mit unterschiedlichen Wirkstoffmengen eingestellten Imprägnierungscremes lassen sich optimal adaptieren und reduzieren die Wasseraufnahme um die Faktoren 10 bis hin zu 75. Die Systeme SNL und die Creme CX60 liefern die geringsten Wasseraufnahmeraten.

Zur Bewertung des Austrocknungspotentials wurde der Wasserdampfdiffusionskoeffizient herangezogen. Die Ergebnisse belegen, dass durch den Einsatz des Hydrophobierungssystems das Trocknungspotential prinzipiell erhalten bleibt. Mehr Informationen zum Austrocknungsverhalten liefern die Trocknungskurven. Aus ihnen geht hervor, dass mit zunehmender Wirkstoffmenge die kapillare Austrocknung gedrosselt wird. Daraus ergibt sich die Forderung, die hydrophobe Imprägnierung nicht zu stark zu wählen [5].

4.6 Randbedingungen an die hygrothermischen Simulationsberechnungen

Um den dauerhaften Erfolg einer energetischen Gebäudesanierung zu gewährleisten, muss der Feuchteschutz bei der Planung berücksichtigt werden. Dabei sind unter anderem die Tauwasserbildung, Schlagregenbelastung und eingebrachte Baufeuchte besonders zu beachten. Für die rechnerische Untersuchung der steinsichtigen Außenwandkonstruktion der Elbphilharmonie ist eine Reihe von Besonderheiten zu berücksichtigen.

Feuchtemessungen an der Außenwand haben gezeigt, dass die Konstruktion stark durchfeuchtet ist. Mit dem Einbau einer Innendämmung wird das Trocknungspotential der Außenwände beeinflusst. Infolge der Dämmung gelangt nur wenig Wärme an die Außenwand. Die Wand wird kälter und kann in der Konsequenz weniger Wasser verdunsten und die Fassade feuchtet stärker auf. Es besteht die Gefahr einer Frostschädigung, Veralgung, etc. Wieviel und wie schnell Wasser abtrocknen kann, wird vom verwendeten Innendämmsystem bestimmt. So fordern relativ sperrende Systeme, z.B. Gipskartonvorsatzschale mit Folie und Mineralwolle, einen niedrigen Ausgangsfeuchtezustand in der Bauphase. Bleibt

die Außenwand nachhaltig feucht, können u.a. Schimmelschäden nicht ausgeschlossen werden. Ein diffusionsoffenes, kapillaraktives Innendämmsystem auf Calciumsilikat Basis kann dabei wesentlich positiver eingeschätzt werden. Aufgrund von Kapillarkräften wird Feuchte auch aus dem Mauerwerk nach Innen abgetrocknet. Für die Berücksichtigung der Austrocknungsmöglichkeiten des Mauerwerkes wurde jeweils ein Innendämmsystem mit der Calciumsilikat Klimaplatte und mit Mineralwolle, Folie und Gipskarton rechnerisch untersucht. Beide Systeme wurden unterschiedlichen Klimabedingungen auf der Innenseite und verschiedenen Durchfeuchtungsgraden der Außenwandkonstruktion ausgesetzt.

Der Standort des Gebäudes ist durch eine exponierte Lage gekennzeichnet. Das ist besonders für die abzuschätzende Schlagregenbelastung von Bedeutung. Über die große Glasfassade wird ein nicht unerheblicher Regenanteil auf die Ziegelfassade geleitet. Zum Erhalt einer höheren Sicherheit wurde bei den Simulationen das etwas extremere Schlagregenlima aus Bremerhaven verwendet. Für die Auswahl eines optimalen Schlagregenschutzes wurden unterschiedliche Sanierungsvarianten mit Hilfe der Simulationen abgebildet. Parameter sind die hygrischen Materialeigenschaften der im Labor untersuchten Ziegel mit den unterschiedlichen Hydrophobierungen.

4.7 Simulationsergebnisse

Zur rechnerischen Bewertung des Verhaltens der unterschiedlichen Dämmsysteme in der Konstruktion des ehemaligen Kaispeichers mit Imprägnierung kommt das Simulationswerkzeug DELPHIN zum Einsatz [9]. Das Programm DELPHIN ist ein numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport von Baukonstruktionen unter Einbeziehung natürlicher Klima- und Nutzungsbedingungen. Die für die Simulation erforderlichen Materialdaten wurden – wie zuvor beschrieben – experimentell im IBK Labor gemessen [7] und über spezielle Experimente verifiziert [10]. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Besonderheiten wurde eine entsprechende Simulationsstudie durchgeführt.

Die Berechnungen beinhalteten die Simulation des Trocknungsverhaltens eines mittleren Wandaufbaus, bei unterschiedlichen Ausgangsfeuchten. Bereits bei einem 5%-igem Durchfeuchtungsgrad der Mauerwerkswand nimmt beispielsweise die Austrocknung einen langen Zeitraum in Anspruch. Dies erfordert entweder eine aufwendige und lang anhaltende Trocknung oder eine feuchteresistente Innendämmung. Ferner kann festgestellt werden, dass die kapillaraktive Innendämmung ein wesentlich schnelleres Austrocknungspotential besitzt. Bereits nach 150 Tagen hat die Calciumsilikatdämmung den eingeschwungenen Zustand erreicht. Das Mineralwolle-Folie-Gipskartonsystem benötigt noch eine erhebliche Trocknungsdauer. Mit steigender Ausgangsfeuchte verlängert sich die Dauer des Austrocknungsvorgangs, wobei die Calciumsilikatdämmung gegenüber einem Mineralwolle-Folie-Gipskartonsystem stets ein höheres Trocknungspotential aufweist.

Für die Planung und Bewertung des Schlagregenschutzes wurden Simulationsberechnungen auf Grundlage der im Labor getesteten Hydrophobierungssysteme durchgeführt. Eine Maßgabe war es, die hydrophobe Imprägnierung nicht zu stark

zu wählen, um das Trocknungspotential der Fassade zu erhalten. Gleichzeitig sollte der Feuchteeintrag aus Schlagregen in die Konstruktion auf ein Minimum reduziert werden. Auf der Basis einer komplexen Analyse konnte eine optimierte Lösung für die hydrophobe Imprägnierung unter den Klimabedingungen und für den Ziegel des Kaispeichers gefunden werden. Da die Dauerhaftigkeit auch von der Funktionsfähigkeit der Fuge beeinflusst wird, ist eine Prüfung an der Fassade notwendig. Der Unterhaltungsaufwand beinhaltet Funktionsprüfungen sowie die zyklische Auffrischungen der ausgewählten Hydrophobierung. Entscheidungskriterium ist dabei der Wasseraufnahmekoeffizient. Bei A_w -Werten $< 0,017 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$ ist eine Maßnahme noch nicht notwendig.

4.8 Überprüfung Schlagregenschutz

Die denkmalgeschützte Sichtmauerwerkfassade, wurde im Zuge der Arbeiten saniert. Das Fugenmaterial wurde ca. 2 cm tief ausgeräumt und im Kellenverfahren neu verputzt. Anschließend wurde die Fassade nach den Vorgaben der Simulationsberechnungen hydrophobiert. Neben der Wahl eines geeigneten Hydrophobierungssystems ist besonders auch die Qualität der Ausführung von hoher Bedeutung für den Erfolg der Maßnahme. Entsprechend wurde eine Reihe von Funktionsprüfungen an der Fassade durchgeführt.

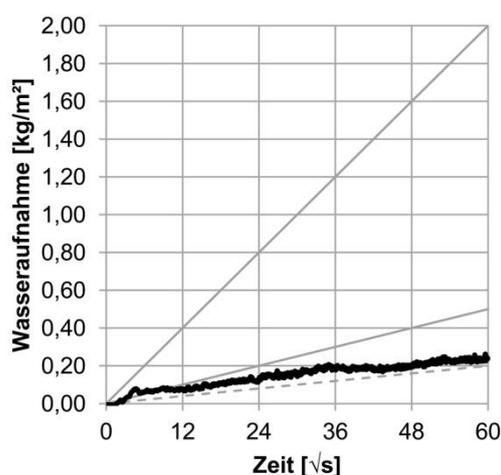


Abbildung 6: Messdaten zur kapillaren Wasseraufnahme der sanierten Sichtmauerwerkfassade des Kaispeichers, aufgetragen über die Wurzel der Zeit.

Dabei gilt der A_w -Wert der hydrophobierten Fassade als Bewertungskriterium. Für die Prüfungen wurde die zerstörungsfreie Technologie des Wasseraufnahmemessgerätes genutzt. Im Ergebnis wurde ein mittlerer Wasseraufnahmekoeffizient der sanierten Fassade von $A_w = 0,003 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$ bestimmt. Damit erfüllt der sanierte Schlagregenschutz die in den Simulationsberechnungen definierten Anforderungen.

5 Zusammenfassung

Für eine erfolgreiche Innendämmmaßnahme ist es erforderlich das Dämmsystem auf der Innenseite mit dem Schlagregenschutz auf der Außenseite abzustimmen.

Für diese Untersuchungen eignen sich entsprechende hygrothermische Simulationsprogramme. Bei Kenntnis der Materialeigenschaften lassen sich damit Vorhersagen über das feuchtetechnische Verhalten von beliebigen Konstruktionsaufbauten treffen. In diesem Aufsatz wurde die dabei notwendige Vorgehensweise am Beispiel der Sichtmauerwerkfassade der Elbphilharmonie in Hamburg beschrieben. Die Ausgangslage war eine hohe Ausgangsfeuchte sowie eine allgemein hohe Schlagregenbeanspruchung der Außenwände. Mithilfe von verschiedenen Labor- und Feldexperimenten wurden Materialeigenschaften der verbauten Klinker bestimmt. In einer hygrothermischen Simulationsstudie konnte dann das optimale Innendämmsystem bestimmt und die Anforderungen an den Schlagregenschutz definiert werden. Für die Sanierung des Schlagregenschutzes der Sichtmauerwerkfassade kam eine Hydrophobierung zum Einsatz. Nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen erfolgte eine Qualitätsprüfung der ausgeführten Hydrophobierungsmaßnahme.

Literatur

- [1] Cziesielski, E. & M. Bonk 1996: *Einschaliges Ziegel-Verblendmauerwerk. Durchfeuchtungen infolge von unzureichendem Schlagregenschutz*. In: *Bauschäden Sammlung. Sachverhalt-Ursache-Sanierung*. Band 8, Hrsg.: G. Zimmermann, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, IRB Verlag, Stuttgart, 1996.
- [2] Jäger, W. & Burkert, T.: Außenhülle Kaispeicher A, Bestandsuntersuchungen, Abschlussbericht. Jäger Ingenieure GmbH, Büro für Tragwerksplanung; im Auftrag von: Hochtief Construction AG, Niederlassung Hamburg, Bramfelder Chaussee 45, 2177 Hamburg; Radebeul, 30.08.2007.
- [3] Jäger, W. & Burkert, T.: Außenhülle Kaispeicher A, Risikoabschätzung Fassadenmauerwerk. Jäger Ingenieure GmbH, Büro für Tragwerksplanung; im Auftrag von: Hochtief Construction AG, Niederlassung Hamburg, Bramfelder Chaussee 45, 2177 Hamburg; Radebeul, 25.04.2008.
- [4] Möller, U. & Stelzmann, M.: In-Situ-Messgerät für die zerstörungsfreie Messung der Wasseraufnahme, in: 2. Internationaler Innendämmkongress vom 12. bis 13. April 2013 in Dresden, Tagungsunterlagen, Grunewald, J., Plagge, R. (Hrsg.), Dresden: TU-Dresden, Institut für Bauklimatik, 2013, S. 188-197..
- [5] Heinze, P., Plagge, R. & Engel, J.: Adaptive hydrophobe Imprägnierung schlagregenbelasteter Ziegelfassaden, Ed. H. Venzmer, Europäischer Sanierungskalender 2010.
- [6] Plagge, R., H. Sonntag, G. Gärtner, U. Ruisinger, H. Fechner, F. Meißner, P. Heinze & J. Zhao 2009: *Entwicklung von raumklimaabhängigen Innendämmkonzepten unter Berücksichtigung der bestehenden Außenwandkonstruktion des Kaispeichers A bei deren Einbindung in die neue Elbphilharmonie Hamburg*. Projektbericht EPH 2009, Proj.-Nr. 408 41, 228 Seiten.
- [7] Plagge, R.: *Hygrothermal Characterization of Building Materials*. In: *Study of moisture movement in building material and its simulation analysis*, Seminar Book of Kyoto University, Katsura Campus, Japan 2005, S. 20-41.

- [8] Scheffler, G. & R. Plagge 2005: *Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Bauphysik 27 (2005), Heft 6, S. 324-330.
- [9] Nicolai A., J. Grunewald, R. Plagge & G. Scheffler 2010: Development of a Combined Heat, Moisture, and Salt Transport Model for Unsaturated Porous Building Materials. In Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G Deckelmann & R. Espinosa-Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, S. 67-84.
- [10] Scheffler, G. & R. Plagge 2009: *A whole range hygric material model: Modeling liquid and vapour transport properties in porous media*. Int. J. Heat Mass Transfer (2009), doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2009.09.030.
- [11] DIN 4108-2: *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Februar 2013.
- [12] DIN 4108-3: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz*. November 2014.
- [13] DIN EN 15026: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Juli 2007.
- [14] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: *Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen*. Mai 2002.
- [15] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Mai 2002.
- [16] WTA-Merkblatt 6-4-09/D: *Innendämmung nach WTA I*. Mai 2009.
- [17] WTA-Merkblatt 6-5-14/D: *Innendämmung nach WTA I*. April 2014.
- [18] Plagge, R. 2014: Innendämmung und hydrophobe Imprägnierung. In: Gebäudeinstandsetzung, ISBN 978-3-940117-11-3, Heft 14, S. 192-213.
- [19] Plagge, R. 2013: Innendämmung von Altbaukonstruktionen – Bauphysikalische Bewertung mittels hygrothermischer Simulation anhand von Praxisbeispielen. In: 12. Internationale Sachverständigen- und Baufachtagung 2013, ISBN 978-3-940117-10-6.
- [20] Plagge, R. 2011: Abstimmung zwischen Feuchtezustand, Schlagregenschutz, Abtrocknung und Dämmkonzept am Beispiel der Elbphilharmonie Hamburg. In: Bauforschung und Baupraxis. ISBN 978-3-86780-216-1, 313-322.
- [21] Plagge, R., G. Scheffler & J. Grunewald 2005: Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 315-323.