

# **Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - hygrothermische Modellierung -**

**M. Krus, D. Rösler, K. Sedlbauer  
Holzkirchen**

## **Zusammenfassung**

Mit neuen hygrothermischen Berechnungsmodellen, die die langwelligen Strahlungseffekte beinhalten, kann für Wärmedämmverbundsysteme die durch nächtliche Abstrahlung hervorgerufene Absenkung der Außenoberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur und die damit verbundene Tauwassermenge berechnet werden. Die wesentlichste Voraussetzung für mikrobielles Wachstum (Algen und Pilze) ist das Vorhandensein einer ausreichenden Menge an Feuchtigkeit. Für die Mikroorganismen ist aber nicht der Wassergehalt im Außenputz entscheidend, da nach derzeitigem Kenntnisstand nur die auf der Oberfläche vorliegende Feuchte für einen Anfangsbewuchs verfügbar ist. Eine Möglichkeit das Risiko eines mikrobiellen Bewuchses zu reduzieren besteht deshalb in der Optimierung der hygrischen Materialeigenschaften des Außenputzes. Dabei muss geklärt werden, ob eine hydrophobe Außenbeschichtung, die zu einer geringeren Wasseraufnahme des Putzes führt, in Bezug auf das Bewuchsrisiko von Vorteil ist. Eine derartige Beschichtung beeinflusst nämlich nicht die anfallende Tauwassermenge, die kleinen Tauwassertropfen verbleiben aber deutlich länger auf der Oberfläche. Bei einem kapillaraktiven Putz kann das Tauwasser dagegen in tiefere Schichten transportiert werden und damit für die Organismen nicht mehr verfügbar sein. Nach Sonnenaufgang wird der Putz dann durch die Einstrahlung wieder austrocknen.

Aktuelle hygrothermische Berechnungsmodelle können den instationären Wassergehalt innerhalb der Materialien unter realen Randbedingungen korrekt berechnen, nicht aber den Feuchtegehalt auf der Außenoberfläche. Es wurde deshalb das vorhandene Berechnungsprogramm entsprechend erweitert und mithilfe von Laboruntersuchungen und Freilandtests eine Validierung durchgeführt. Damit ergibt sich nun die Möglichkeit für eine Optimierung der hygrothermischen Eigenschaften zur Vermeidung unerwünschten mikrobiellen Bewuchses.

## **1 Hintergrund**

Mikrobieller Bewuchs auf hochgedämmten, der Witterung ausgesetzten Außenbauteilen ist – neben der Substratwirkung der Oberflächenschicht – eine Folge erhöhter Feuchtebelastungen an der Oberfläche und dadurch begünstigter Wachstumsbedingungen .[1-3] Bei Außenwänden sind insbesondere Konstruktionen mit Wärmedämmverbundsystemen (WDV-Systemen) betroffen, bei denen die außen liegende Wärmedämmschicht nur durch eine dünne Putzschicht abgedeckt wird. Die relativ dünne Außenschicht ist durch die dahinter liegende Dämmung von der restlichen Baukonstruktion gewissermaßen thermisch abgekoppelt. Sie besitzt selbst nur eine geringe Wärmespeicherkapazität und unterliegt instationär größeren Temperaturschwankungen. Insbesondere können sich daher in klaren Nächten infolge Wärmeabstrahlung rasch Temperaturen unterhalb der Außenlufttemperatur einstellen, wodurch Oberflächentauwasser entsteht. Dies bedeutet eine zur Beregnung zusätzliche Feuchtezufuhr und damit günstigere Wachstumsbedingungen.

Als zentrales Einflusskriterium gilt der Feuchtezustand der Oberfläche, welcher durch das Klima und bauphysikalische Parameter bedingt wird. Neben Oberflächenorientierung, Wärmedämmung, Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils sind insbesondere die physikalischen Oberflächeneigenschaften von Bedeutung. Da offensichtlich bereits geringe Unterschiede im mittleren bzw. längerfristigen Feuchteniveau der Oberfläche deutliche Wachstumsunterschiede bewirken, könnte eine Einstellung der hygrischen Oberflächenparametern eine weitreichende Reduzierung biologischer Besiedelungen erbringen. Dabei ist z.B. die Frage zu klären, inwieweit eine Hydrophobie der Oberfläche, die für eine geringe Wasseraufnahme des Außenputzes sorgt, den allgemein erwarteten positiven Effekt einer verminderten Verschmutzung und des mikrobiellen Bewuchses ergibt. Auch denkbar ist, dass eine gewisse Saugfähigkeit des Untergrundes mikrobiellen Bewuchs verhindern hilft, indem das anfallende Tauwasser von der Oberfläche in größere Bauteiltiefen abgeleitet wird und damit Mikroorganismen nicht mehr zur Verfügung steht.

## **2 Entwicklung des Modells**

Die Grundlage des zu entwickelnden Prognoseverfahrens bildet das bewährte und vielfach validierte instationäre Wärme- und Feuchtetransportberechnungsverfahren WUFI® .[4 - 6] Es wurde entwickelt, um den Feuchtehaushalt innerhalb eines Bauteils zu berechnen. Für die Gefahr eines mikrobiellen Bewuchses der Außenoberfläche sind aber vor allem die hygrothermischen Oberflächenbedingungen relevant. Für die rechnerische Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen in Bezug auf die Verminderung der Taupunkttemperaturunterschreitungen wurde das Programm deshalb in zweierlei Hinsicht den neuen Anforderungen angepasst. In der bis-

herigen Version von WUFI® wurde der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Fassadenoberfläche und der Umgebung mit einem festen Mittelwert in den Wärmeübergangskoeffizient hinein gerechnet. Dieser Ansatz war ausreichend für die Anwendungen von WUFI® zur Ermittlung des Wärme- und Feuchtehaushalts von Fassaden und Dächern. Für die Bewertung eines mikrobiellen Bewuchses der Außenoberfläche sind aber vor allem die hygrothermischen Oberflächenbedingungen relevant. Um die genauen Oberflächentemperaturen und Feuchteverhältnisse berechnen zu können, musste das Berechnungsprogramm WUFI® so modifiziert werden, dass der Strahlungsaustausch über die langwellige Strahlungsemissions- und die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl explizit berechnet wird. Eine genauere Beschreibung der durchgeführten Modifikationen ist in [7] zu finden. Damit wird, wie Untersuchungsergebnisse belegen, eine gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem nächtlichem Oberflächentemperaturverlauf erreicht. Geht man davon aus, dass die Betauung der Oberfläche einen wesentlichen Einfluss auf den mikrobiellen Bewuchs hat (die meisten Beobachtungen bestätigen dies), so lassen sich mit Hilfe dieses Berechnungstools bereits gute Abschätzungen des Einflusses unterschiedlicher Maßnahmen auf das Bewuchsrisko durchführen.

Um das auf der Außenoberfläche befindliche Wasser berechenbar zu machen, wird das Modell um eine Oberflächenfeuchtespeicherschicht erweitert. Diese Speicherschicht muss dabei folgende Eigenschaften aufweisen:

- Sie kann gerade soviel Feuchtigkeit aufnehmen, wie maximal an der Oberfläche haften kann, bevor das Wasser als Tropfen abläuft,
- sie besitzt eine extrem hohe Wasseraufnahmegeschwindigkeit,
- sie ist mit keinem Diffusionswiderstand verbunden.

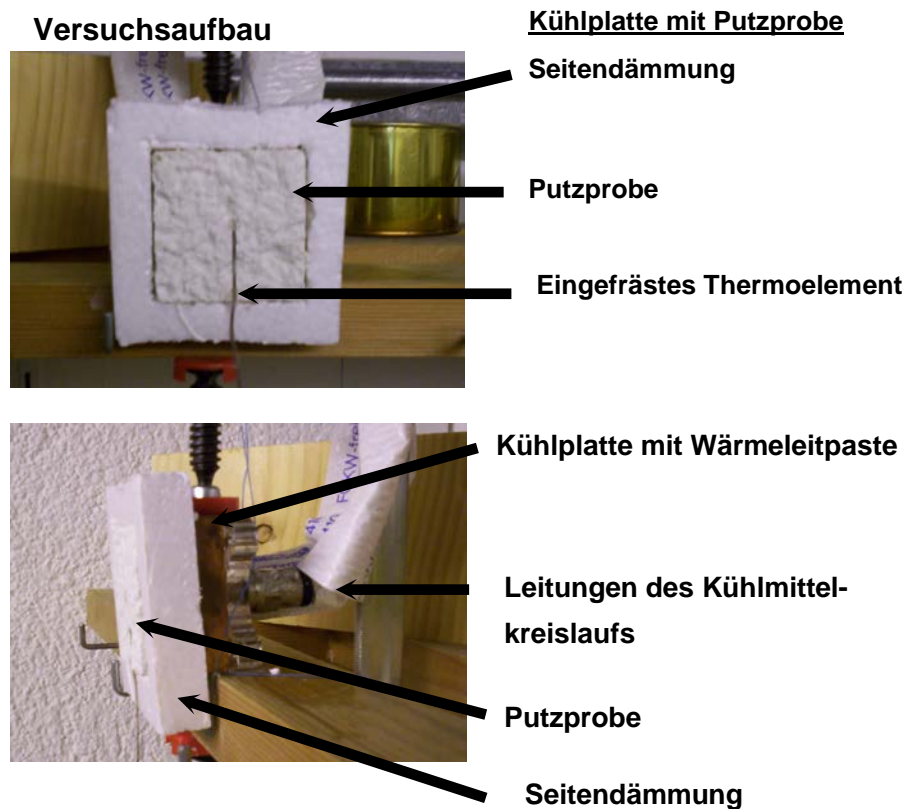
Die „Materialkennwerte“ dieser Oberflächenfeuchtespeicherschicht müssen so angepasst werden, dass für unterschiedliche Randbedingungen und Untergründe eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten Oberflächenfeuchte mit der messtechnisch bestimmten gegeben ist. Für diesen Zweck wurden sowohl Untersuchungen an einer dafür entwickelten und im Folgenden beschriebenen Labormesseinrichtung als auch an frei bewitterten Außenoberflächen durchgeführt.

### **3 Aufbau der Laborversuchs und Ergebnisse**

Für die Optimierung der Feuchtespeicherschicht sind wiederholbare Messungen unter klar definierten Randbedingungen von großem Vorteil. Dies ermöglicht die Validierung des Prognoseverfahrens bei gleichzeitiger Variation der Randbedingungen. Für diesen Zweck wurden Versuche entwickelt, mit deren Hilfe es möglich ist, die nächtliche Betauung im Labor nachzuvollziehen. Bei der Entwicklung des Laborversuches muss erreicht werden, dass die Bedingungen im Labor den Bedingungen an der Fassade möglichst ähnlich sind. Dies bedeutet in diesem Fall vor allem, dass die Tau-

punkttemperaturunterschreitungen in der Größenordnung der Freilandversuche liegen sollten.

Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Bild 1 dargestellt. Da im Labor keine nächtliche Abstrahlung realisierbar ist, wird die Betauung der Prüfkörperoberfläche durch eine Unterkühlung der Probe mittels einer rückseitig angebrachten Kühlplatte hervorgerufen. Die zu untersuchenden Putzproben werden dazu mittels einer Wärmeleitpaste, die einen optimalen Wärmetransport zur Probe gewährleistet, auf einen Kühlblock aus Kupfer aufgebracht, dessen Kühlung über einen Kühlwasserkreislauf realisiert wurde. Für die Temperaturerfassung auf der Oberfläche wurde eine nur ein bis zwei Millimeter tiefe und breite Nut in den Putz gefräst. In dieser Nut wurde mittels Schmelzkleber ein Thermoelement eingebracht.



**Bild 1:** Versuchsaufbau zur Betauung einer Putzoberfläche unter vorgebbaren Randbedingungen im Klimaraum. Oben ist die Vorderansicht der seitlich gedämmten Putzprobe dargestellt. In der Seitenansicht (unten) erkennt man die rückseitig angebrachte Kühleinrichtung zur Unterkühlung der Probenoberfläche, um deren Betauung zu ermöglichen.

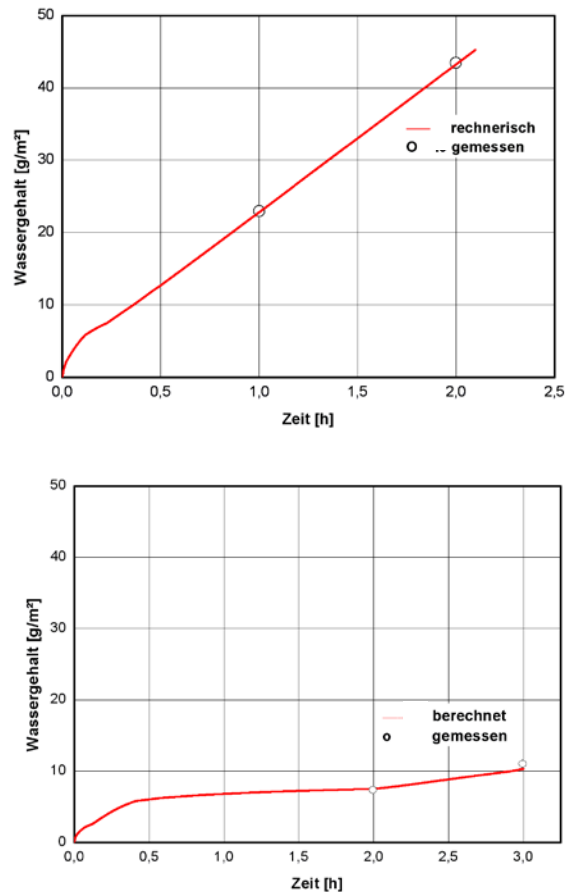
Um das Verhalten an der Fassade im Labor zu simulieren, werden die Temperaturen so gewählt, dass die Taupunktunterschreitung sich in einem Bereich bewegt, der den natürlichen Taubedingungen entspricht. Auch die Betauungsdauer wurde mit ein bis

vier Stunden so gewählt, wie es auch an der Fassade zu erwarten ist. Für die Untersuchungen wurde ein Putz mit unterschiedlichen Anstrichen eingesetzt. Die Betauungsdauer wurde durch den Vergleich der gemessenen Oberflächentemperatur mit der Taupunkttemperatur im Klimaraum ermittelt. Das an der Oberfläche befindliche Wasser wird durch ein Abtupfen mit einem saugfähigen Vlies und anschließende Wägung ermittelt. In Tabelle 1 sind die für einen Putz mit ultrahydrophobem Anstrich und einem Dispersionssilikatanstrich zu jeweils zwei Zeitpunkten ermittelten flächenbezogenen Oberflächenwassergehalte aufgelistet. Es ist deutlich erkennbar, dass auf der hydrophoben Oberfläche wesentlich höhere Oberflächenwassergehalte auftreten. In der Tabelle sind die berechneten Ergebnisse mit aufgelistet. Es ergeben sich zwischen Messung und Rechnung Unterschiede, die im Bereich von 10 % und darunter liegen. Bedenkt man die Messgenauigkeit beim Abtupfen der Oberfläche, bedeutet dies eine recht gute Übereinstimmung.

**Tabelle 1:** Gemessene und berechnete flächenbezogene Oberflächenwassergehalte für einen Putz mit ultrahydrophobem Anstrich und Dispersionssilikatanstrich

Probe	Betauungszeit [h]	Oberflächenfeuchte gemessen [g/m <sup>2</sup> ]	Oberflächenfeuchte gemessen [g/m <sup>2</sup> ]	Abweichung [%]
Ultrahydrophober Anstrich	1	25.7	23.0	10.3
	2	49.0	43.5	10.9
Dispersionssilikatanstrich	2	7.4	6.8	8.2
	3	11.0	10.5	4.8

In Bild 2 sind für beide Proben der zeitliche Verlauf des berechneten Oberflächenwassergehaltes und die gemessenen Werte graphisch dargestellt. Bei der Probe mit ultrahydrophobem Anstrich ergibt sich fast von Anfang an eine zeitlich konstante Zunahme der Oberflächenfeuchte (Bild 2 oben) und eine gute Übereinstimmung mit den Messpunkten. Ein ganz anderes Bild ergibt sich beim Dispersionssilikatanstrich (Bild 2 unten). Zu Beginn nimmt die Probe über Sorption etwas Feuchte auf, der Feuchtegehalt bleibt aber bis zwei Stunden nach Beginn der Betauung nahezu konstant. In diesem Zeitraum wird das anfallende Tauwasser weitgehend über Kapillarsortvorgänge in den Putz unterhalb der Oberfläche transportiert. Erst nach diesen zwei Stunden tritt eine teilweise Sättigung des Putzes auf mit der Folge einer etwas stärker ansteigenden Oberflächenfeuchte. Auch dieses Verhalten wird durch die Berechnung mit guter Übereinstimmung zur Messung wiedergegeben.

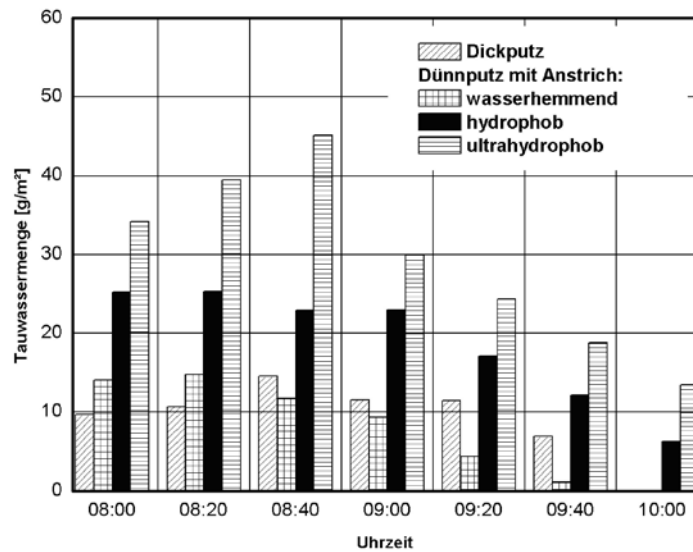


**Bild 2:** Vergleich des berechneten Verlaufs der Oberflächenfeuchte mit dem gemessenen für eine Putzprobe mit ultrahydrophobem Anstrich (oben) und mit Dispersions-silikatanstrich (unten)

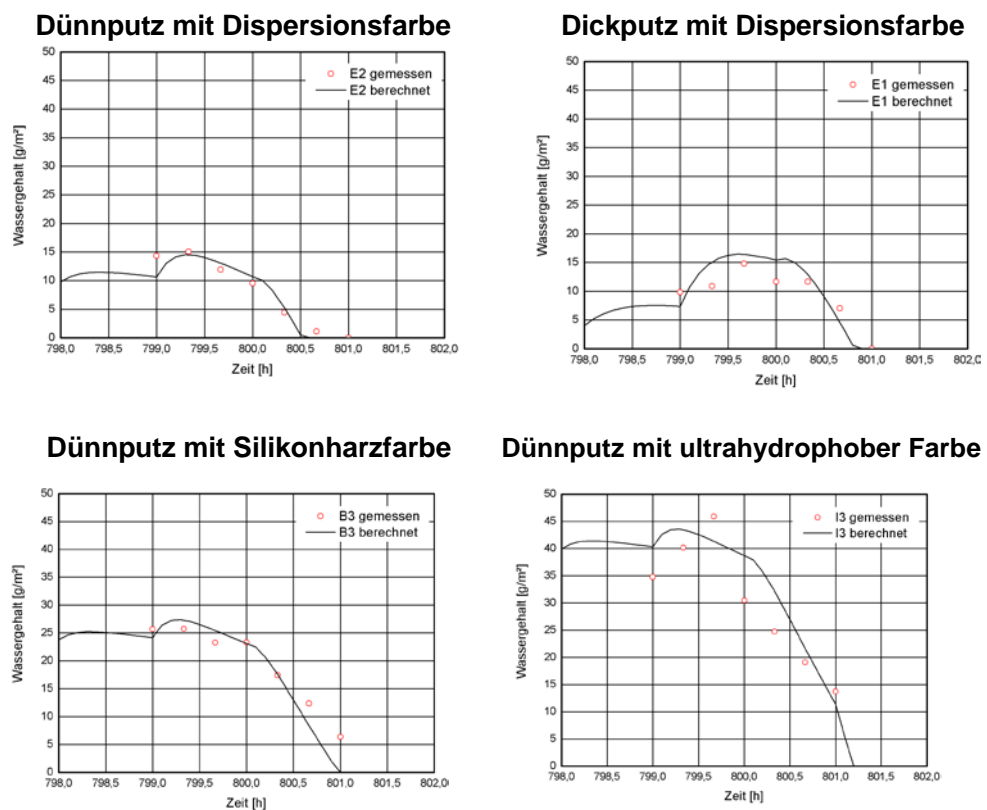
#### 4 Freilanduntersuchungen und Ergebnisse

Auch für die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Oberflächenfeuchte unter natürlichen Randbedingungen wurde an einer westorientierten Außenfassade mit Unterschiedlichen WDV-Systemen und Anstrichen das bereits beschriebene Abtupfverfahren mit anschließender Wägung des verwendeten Vlieses eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Bild 3 für ein Zweistundenintervall im September dargestellt. Zum ersten Messzeitpunkt um 8:00 Uhr ist die Tauwassermenge auf dem Dickputz- und Dünnputzsystem mit mineralischem Anstrich deutlich geringer als auf dem Dünnputzsystem mit Silikonharzfarbe und ultrahydrophobem Anstrich. Die Tauwassermenge nimmt bei der Variante mit ultrahydrophobem Anstrich zunächst noch zu, während sie bei den anderen Varianten nahezu konstant bleibt. Die Varianten mit Dickputz und Dünnputz mit wasserhemmendem Anstrich trocknen im weiteren Zeitverlauf ab und zwar die Variante mit Dickputz langsamer als die Variante mit Dünnputz. Um 10 Uhr sind diese beiden Wandflächen bereits oberflächlich abgetrocknet, während auf

den Silikonharzfarben und besonders auf dem ultrahydrophobem Anstrich, immer noch Tauwasser vorhanden ist.

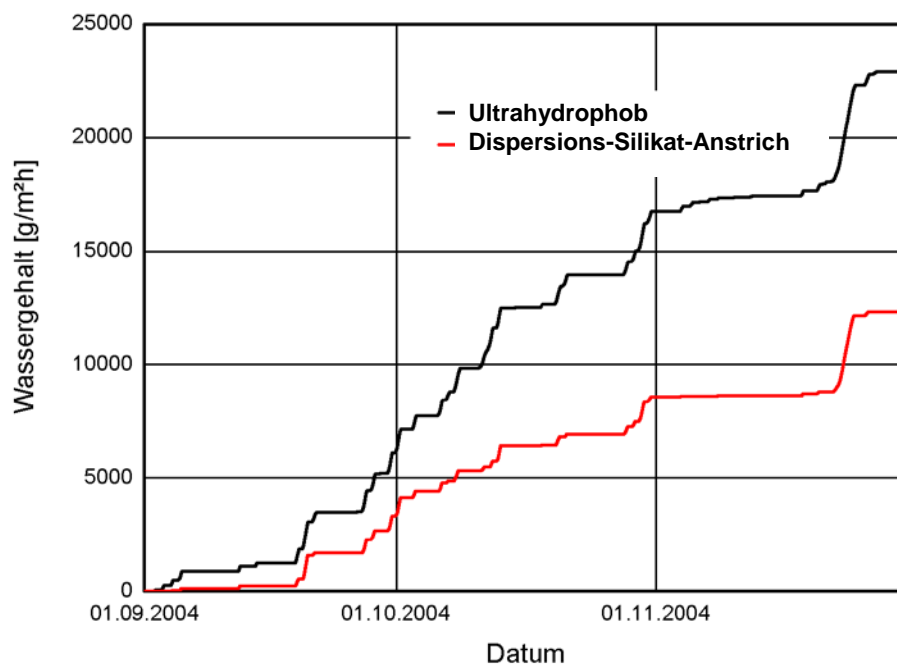


**Bild 3:** Gravimetrische Oberflächenfeuchtebestimmung an einer Versuchswand mit verschiedenen Beschichtungen



**Bild 4:** Vergleich des berechneten Verlaufs der Oberflächenfeuchte für unterschiedliche Putze und Anstriche einer Westfassade für einen typischen Septembermorgen mit der gravimetrischen Oberflächenfeuchtebestimmung

Unter Verwendung der spezifischen Materialkennwerte der Putze und Anstriche auf dieser Fassade lässt sich mit Hilfe des beschriebenen Berechnungsverfahrens dieser zeitliche Verlauf der oberflächenfeuchte nachrechnen. Bild 4 zeigt für einen typischen Morgen im September die Berechnungsergebnisse für diese vier Fassadenabschnitte und die dazu gehörigen Messwerte. In allen Anwendungsfällen wird eine gute Übereinstimmung erreicht.



**Bild 5:** Über die Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen auf Außenfassaden, den Herbst, akkumulierten Mengen an Feuchtigkeit auf der Außenfassade für eine ultrahydrophobe Farbe und einen Dispersions-silikatanstrich

Bild 5 zeigt die über die Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen auf Außenfassaden, den Herbst, akkumulierten Mengen an Feuchtigkeit auf der Außenfassade für eine ultrahydrophobe Farbe und einen Dispersions-silikatanstrich. Man erkennt daraus, dass bei dem Dispersions-silikatanstrich nur etwas mehr als halb so viel Feuchtigkeit den Mikroorganismen zur Verfügung steht. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse muss natürlich auch berücksichtigt werden, dass weitere Einflussgrößen, wie z.B. Selbstreinigungseffekte auch bei hohen Oberflächenfeuchten einen Bewuchs verhindern können.

## 5 Schlussfolgerung

Das wesentlichste Kriterium für das Risiko eines mikrobiellen Bewuchses an Fassaden ist die Verfügbarkeit ausreichender Mengen an Feuchtigkeit. Dabei kommt der nächtlichen Betauung besonderer Bedeutung zu, da nur mit ihr das vermehrte Auftreten des Bewuchses auf der Schlagregenarmen Nordseite zu erklären ist. Dabei muss



aber berücksichtigt werden, dass nach derzeitigem Kenntnisstand nicht die anfallende Tauwassermenge für das Risiko eines mikrobiellen Bewuchses entscheidend ist, sondern das auf der Außenoberfläche befindliche Wasser. Nur diese ist in der Anfangsphase der Bewuchsentwicklung für die Mikroorganismen verfügbar. Saugfähige Untergründe könnten diesbezüglich deutliche Vorteile bieten. Um diese Mechanismen in die Beurteilung einzubeziehen ist deshalb eine derartige Weiterentwicklung des Berechnungsmodells dringend erforderlich.

Die Erweiterung des Prognosemodells zur instationären Berechnung des der Biologie verfügbaren Wassers auf der Fassadenaußenoberfläche ermöglicht die Einbeziehung der hygrischen Materialeigenschaften zur Abschätzung des Bewuchsriskos. Sowohl bei den Laborexperimenten als auch bei den Untersuchungen der Freibewitterung konnte eine gute Übereinstimmung mit den Laborexperimenten erreicht werden. Damit ist ein Berechnungsverfahren entwickelt worden, das bei der Optimierung von Fassadenmaterialien zur Vermeidung mikrobiellen Bewuchses ein wertvolles Hilfsmittel darstellen wird.

Eine exakte Aussage wie lange Tauwasser an der Fassade auftreten muss bis Algenwachstum eintritt, kann noch nicht getroffen werden. Bedenkt man, dass trotz nächtlicher Betauung die meisten ausgeführten Wärmedämmverbundsysteme schadensfrei bleiben, kann man davon ausgehen, dass bereits eine geringfügige Absenkung der Oberflächenfeuchte um 20 % oder mehr eine deutliche Reduktion des Befallsrisikos bedeuten.

## 6 Veröffentlichungen

- [1] M. Krus, K. Sedlbauer, *Instationärer Feuchtegehalt an Außenoberflächen und seine Auswirkungen auf Mikroorganismen*, Tagungsbeitrag zur IBK-Bau-Fachtagung 288 Bauschäden durch Schimmelpilze und Algen, Berlin, 27. Feb. 2003, S. 5/1 – 5/15
- [2] W. Hofbauer, K. Breuer, K. Sedlbauer, *Was wächst auf unseren Fassaden? Teil I: Algen, Flechten, Moose, Farne*, Bauphysik (2003), H. 6
- [3] D. von Denffer, H. Ziegler, F. Ehrendorfer, A. Bresinsky, *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*, Begründet von E. Strasburger, F. Noll, H. Schenk, A.F.W. Schimper. 32. Auflage / neubearbeitet von Dietrich von Denffer, Hubert Ziegler, Friedrich Ehrendorfer, Andreas Bresinsky. Gustav Fischer. Stuttgart; New York (1983)
- [4] H.M. Künzel, *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*, Diss. Universität Stuttgart (1994)
- [5] K. Kießl, M. Krus, H.M. Künzel, *Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen, Praktische Anwendungsbeispiele*, Sonderdruck Bauphysik 15 (1993) H. 2, S. 61-67

- [6] H.M. Künzel, K. Kießl, M. Krus, *Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern*, In: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung, Bd. 6, 1994–1996 (1998), S. 149–156
- [7] H.M. Künzel, Th. Schmidt, A. Holm, *Exterior Surface Temperature of Different Wall Constructions – Comparison of Numerical simulation and Experiment*, 11. Bauphysikalisches Symposium, Dresden (2002)

Dr. Martin Krus, Doris Rösler, Prof. Dr. Klaus Sedlbauer  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
PF 1152, 83601 Holzkirchen  
krus@hoki.ibp.fhg.de