

Bauphysikalisch optimierte Außenschichten gegen mikrobiellen Bewuchs an Außenfassaden

M. Krus ¹
C. Fitz ¹
H. M. Künzel

Kurzzusammenfassung

Verfärbungen von Fassaden aufgrund mikrobiellen Wachstums haben in den letzten Jahren zugenommen. Wände mit Wärmedämmverbundsystemen sind besonders betroffen, weil ihre niedrige äußere thermische Masse, verbunden mit dem hohen Wärmewiderstand der Dämmschicht, zu häufiger Unterkühlung der Oberfläche durch langwellige nächtliche Abstrahlung führt. Die damit verbundene Betauung auf der unterkühlten Fassade ist eine wesentliche Feuchtequelle für das mikrobielle Wachstum. Deshalb besteht ein Weg, Wachstum zu verhindern, darin, die Häufigkeit der Betauung zu reduzieren, indem die Perioden der Taupunkttemperaturunterschreitung vermindert werden. Dies kann erreicht werden, indem die thermische Trägheit der Außenschicht vergrößert wird, z.B. durch Beigabe von Phasenwechselmaterialien (PCM), oder indem Anstriche mit abgesenktem langwelligem Emissionsvermögen (Low-E-Anstriche) eingesetzt werden. Nach aktuellem Wissensstand ist nicht die Menge des Tauwassers für die Gefahr des mikrobiellen Wachstums entscheidend, sondern, zumindest für den Start mikrobiellen Wachstums, das auf der Oberfläche für die Mikroorganismen verfügbare Wasser. Saugfähige Untergründe können dadurch deutliche Vorteile mit sich bringen. Der Einfluss dieser Maßnahmen oder einer Kombination davon auf das Bewuchsrisiko wird durch hygrothermische Berechnungen sowie durch Freilandversuche untersucht.

1 Hintergrund

Seit einiger Zeit gibt es immer mehr Beschwerden über das mikrobielle Wachstum auf Fassaden (Blaich, J. 1999). Abb. 1 zeigt eine Fassade mit typischem mikrobiellem Wachstum von Pilzen und Algen. Die Oberfläche über dem gekippten Fenster belegt, dass auch das Lüftungsverhalten der Einwohner einen Einfluss auf das mikrobielle Wachstum haben kann. Die Wirkung von Wärmebrücken ist auch deutlich sichtbar. Die geringfügig höhere Oberflächentemperatur bewirkt in einem schmalen Bereich eine Unterbrechung des massiven Pilzwachstums über dem Fenster. Die restliche Oberfläche zeigt vorherrschend Wachstum von Algen.

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Valey, DEUTSCHLAND
martin.krus@ibp.fraunhofer.de



Abbildung 1: Wachstum von Algen auf einer Fassade mit dem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und Pilzwachstum über dem Fenster.

Dieses Wachstum tritt größtenteils in den ersten Jahren nach der Fertigstellung auf und führt erwartungsgemäß zu Missfallen vom Bauherrn. Abbildung 2 zeigt eine fotografische Ansicht von einem Gebäude, auf dem die rechte Seite ungefähr ein Jahr vorher gedämmt worden ist. Die linke Seite ist unverändert belassen worden. Es ist offensichtlich, dass der höhere Dämmstandard das Wachstum von Algen oder Schwärzepilzen begünstigt hat.



Abbildung 2: Fotografische Ansicht von einem Gebäude, auf dem die rechte Seite ungefähr ein Jahr vorher gedämmt wurde. Der höhere

Dämmstandard fördert augenscheinlich das Wachstum von Algen oder Schwärzepilzen (aus Bagda, E. 2002).

Da der Einsatz von Bioziden aus Umweltschutzgründen und wegen der zeitlich begrenzten Wirkung vermieden werden sollte, müssen neue Möglichkeiten zur Vermeidung von mikrobiellem Wachstum entwickelt werden, die möglichst auf physikalische Maßnahmen beruhen. Für diesen Zweck werden umfassende Untersuchungen an Fassadenoberflächen auf der Feilantestfläche des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) durchgeführt. Weil es verschiedene Meinungen über die höhere Empfindlichkeit von Wänden mit WDVS (Wärmedämmverbundsystem) im Vergleich zu monolithischen Wänden gibt und auch die physikalischen Ursachen noch nicht vollständig geklärt sind, werden unterschiedliche Wandkonstruktionen für Untersuchungen im Freigelände aufgebaut. Die ganze Vielfalt von interessanten Varianten kann aufgrund des damit verbundenen Aufwands jedoch nicht durch Feldversuche geprüft werden. Stattdessen können mit dem hygrothermischen Programm WUFI[®], das für diesen Zweck modifiziert wurde, Berechnungen ausgeführt werden. Es erlaubt nach seiner Validierung die schnelle und kostengünstige Bewertung von zahlreichen weiteren Varianten, um den Einfluss von verschiedenen Randbedingungen, z.B. die Änderung Orientierung, der Dicke von Dämmschichten oder der Erhöhung der thermischen Speicherkapazität bei Verwendung von Phasenwechselmaterialien (PCM), zu bewerten.

2 Wachstumsbedingungen

Algen und Schimmelpilze sind weltweit verbreitet und bilden einen wesentlichen Teil des Ökosystems. Das Vorhandensein ausreichender Feuchtigkeit ist für das Algenwachstum eine wesentliche Voraussetzung, weil sie auch für die Fotosynthese erforderlich ist. Da Algen keine Wurzeln haben, muss die Wasseraufnahme direkt durch die Zellwand durch Osmose erfolgen. Die Wachstumsgrenze für Grünalgen liegt bei mindestens 70 - 80-%-r.F. (Denffer 1983) und für Blaualgen bei 100-%-r.F. (flüssiges Wasser) (Scherer 1993). Viele Algen können trockene Perioden ohne jeden Schaden überleben und können ihr Wachstum neu starten, wenn genug Feuchtigkeit verfügbar ist. Deshalb ist eine Trocknung von Fassaden während des Tages nicht ausreichend, um Algenwachstum zu verhindern. Venzmer beschreibt als optimale Wachstumsbedingungen auf Fassaden für Grünalgen einen Temperaturbereich innerhalb von 0°C bis 40°C (Venzmer 2001). Für das Wachstum der Schwärzepilze ist abhängig von der Temperatur und der Qualität des Substrats eine

relative Feuchtigkeit auf der Oberfläche zwischen 75 bis 99 % (Sedlbauer 2001) erforderlich.

3 Bewertung der Gefahr für mikrobielles Wachstum

Das erhöhte mikrobielle Wachstum auf stark gedämmten der Witterung ausgesetzten Außenbauteilen ist vor allem eine Folge von höheren Feuchelasten auf der Oberfläche und den daraus resultierenden günstigen Wachstumsbedingungen (Krus & Sedlbauer 2003; Hofbauer u. a. 2003; Denffer von 1983). Neben der Befeuchtung durch den Schlagregen tritt eine Betauung infolge der langwelligen Abstrahlung in klaren Nächten auf, durch die Temperaturen unter der Taupunkttemperatur der Luft erreicht werden. Die Bedeutung dieser Betauung wird offensichtlich, wenn man berücksichtigt, dass vor allem auf den nach Norden orientierten Fassaden mikrobieller Bewuchs auftritt, an denen Schlagregen sehr selten vorkommt. Deshalb werden die Perioden der Oberflächenbetauung und der aufsummierte Grad der Unterkühlung unter die Taupunkttemperatur als Kriterium herangezogen, um eine Einschätzung des Bewuchsriskos zu erhalten (Krus, Sedlbauer 2003).

Das wesentlichste Kriterium für die Gefahr des mikrobiellen Wachstums auf Fassaden ist die Verfügbarkeit von genügend Wasser. Nach aktuellem Wissensstand ist nicht die Menge des Tauwassers für die Gefahr des mikrobiellen Wachstums entscheidend, sondern, zumindest für den Start mikrobiellen Wachstums, das auf der Oberfläche für die Mikroorganismen verfügbare Wasser. Deshalb wird bei den Freilandversuchen, soweit möglich, die Menge an Wasser auf der Oberfläche durch Abtupfen mit einem Zellstofftuch und anschließende Wägung bestimmt (Krus, Fitz 2007) und diese Ergebnisse in die Bewertung der Wachstumsgefahr einbezogen.

4 Rechnerische Untersuchungen

Nur durch instationäre hygrothermische Berechnungen kann die ganze Bandbreite an Randbedingungen und Einflussgrößen in die Untersuchungen einbezogen werden. Die Berechnungen werden mit Hilfe des Berechnungsprogrammes WUFI[®] ausgeführt (Künzel H.M. 1994), das durch das IBP entwickelt und umfangreich validiert wurde. Um den Vergleich der berechneten Ergebnisse (Oberflächentemperatur und Oberflächenfeuchtigkeit) unterschiedlicher Wand-

konstruktionen mit Messergebnissen zu ermöglichen, werden die Berechnungen mit dem gemessenen Außenklima während der Freilanduntersuchungen durchgeführt. Deshalb beziehen sich alle folgend dargestellten Ergebnisse auf das Holzkirchner Klima. Alle Berechnungen erfolgen dazu mit einer erweiterten Version von WUFI[®], die den langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung berücksichtigt (Künzel u. a. 2002), um einen korrekten Vergleich der Oberflächentemperaturen mit der Taupunkttemperatur der Außenluft zu ermöglichen.

Die folgend beschriebenen zwei Konstruktionsvarianten werden durch hygrothermische Berechnungen verglichen. Zum Einen Wände mit einem WDVS und zum Anderen monolithische Konstruktionen, z.B. aus Porenbeton. Beide Wände haben, sofern nicht anders beschrieben, einen ähnlichen Wärmedurchgangskoeffizienten von ungefähr $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Beginnend mit einer WDVS-Standardkonstruktion, werden verschiedene Oberflächeneigenschaften untersucht. Neben der Farbgebung (kurzwelliger Strahlungskoeffizient) ist vor allem der Einfluss des langwelligen Emissionsvermögens von speziellem Interesse. Zusätzlich sind zahlreiche Freilandversuche mit nach Norden sowie nach Westen orientierten WDVS oder Massivkonstruktionen durchgeführt worden, um die Berechnungsergebnisse zu überprüfen.

Die kritischsten Jahreszeiten für das biologische Wachstum auf Außenwänden sind vor allem der Herbst und in geringerem Maße der Frühling. Winter und Sommer bieten kein optimales Klima für das Wachstum von Algen und Pilzen, weil es entweder zu kalt oder zu trocken ist [Hofbauer et al. 2006]. Die folgend dargestellten Auswertungen beziehen sich deshalb zumeist auf den Herbst als Hauptwachstumsperiode.

4.1 Validierung

Für eine klare Nacht wird in Abbildung 3 beispielhaft das Ergebnis der hygrothermischen Berechnung für eine Westwand mit WDVS im Vergleich zu den Freilandmessergebnissen gezeigt. Nachts gibt es keinen sichtbaren Unterschied zwischen gemessenen Oberflächentemperaturen und berechneten Temperaturen. Um die Mittagszeit zeigt der berechnete Verlauf eine verzögerte Aufheizung. Der Grund für dieses Verhalten besteht darin, dass WUFI[®] die Weststrahlung aus der direkten und diffusen Sonnenstrahlung berechnen muss. Dabei wird angenommen, dass die diffuse Strahlung isotrop ist. In Wirklichkeit gibt es aber eine Zunahme der diffusen Strahlung in der

Umgebung der Sonne. Um die Mittagszeit ist die berechnete Weststrahlung niedriger als die wirklich gemessenen Werte und deshalb sind die berechneten Oberflächentemperaturen niedriger. Aber Oberflächentemperaturen nahe (oder tiefer) als die Taupunkttemperatur können nur in der Nachtzeit oder früh in den Morgenstunden beobachtet werden. Deshalb kann man trotzdem mit WUFI® sowohl die Oberflächentemperaturen für die Perioden der Betauung als auch den Grad der Abkühlung unter die Taupunkttemperatur für verschiedene Varianten korrekt berechnen.

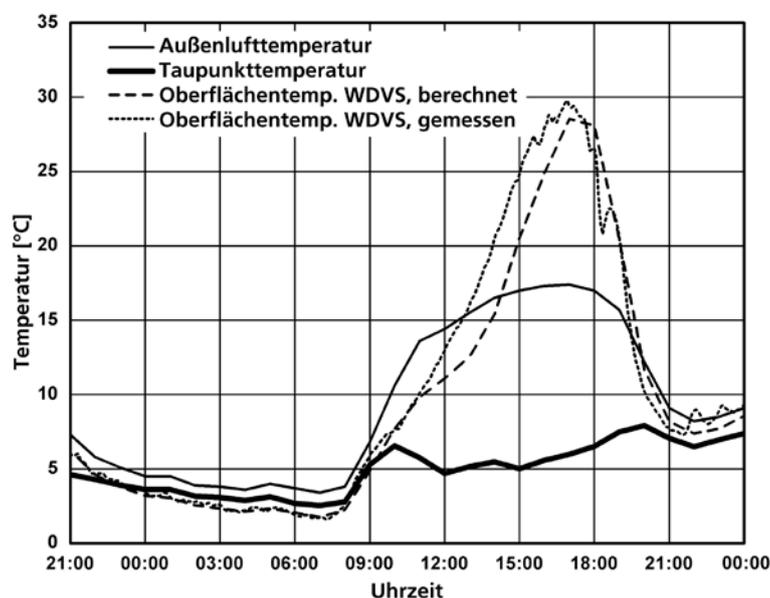


Abbildung 3: Vergleich von gemessenen und berechneten Verläufen der Oberflächentemperatur für eine nach Westen orientierte Wand mit WDVS während einer klaren Nacht und einem darauf folgenden Tag im September. Die Verläufe der Außenlufttemperatur und Taupunkttemperatur werden mit dargestellt.

4.2 Einfluss des Konstruktionsstyps und der Orientierung

Abbildung 4 zeigt die aufsummierten Stunden der Betauung im Herbst für die beiden betrachteten Konstruktionen und zwei Orientierungen. Der Unterschied zwischen der Konstruktion mit WDVS und der monolithischen Wand ist offensichtlich. Die Porenbetonwand weist auf der Ostorientierung mehr Betauung auf als auf der Westorientierung im Gegensatz zur Wand mit WDVS. Dies ist darin begründet, dass die gespeicherte Sonnenenergie bis zur Morgendämmerung zu einem großen Teil verloren geht, während auf der Westseite die komplette aufgenommene Energie für die darauf

folgende Nacht zur Verfügung steht. Für das WDVS ist dieser Effekt wegen dessen niedriger Wärmespeicherkapazität irrelevant. Hier weist die Ostseite eine geringere Betauungsdauer auf, weil die Ostfassade morgens mit der aufgehenden Sonne früher über die Taupunkttemperatur der Außenluft aufgewärmt wird. Insgesamt ist die Betauungszeit bei WDVS im Vergleich zur monolithischen Wand des Porenbetons deutlich höher. Das entspricht auch Beobachtungen bezüglich des biologischen Wachstums auf Fassaden in der Praxis. Aus diesem Grund konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen auf WDVS.

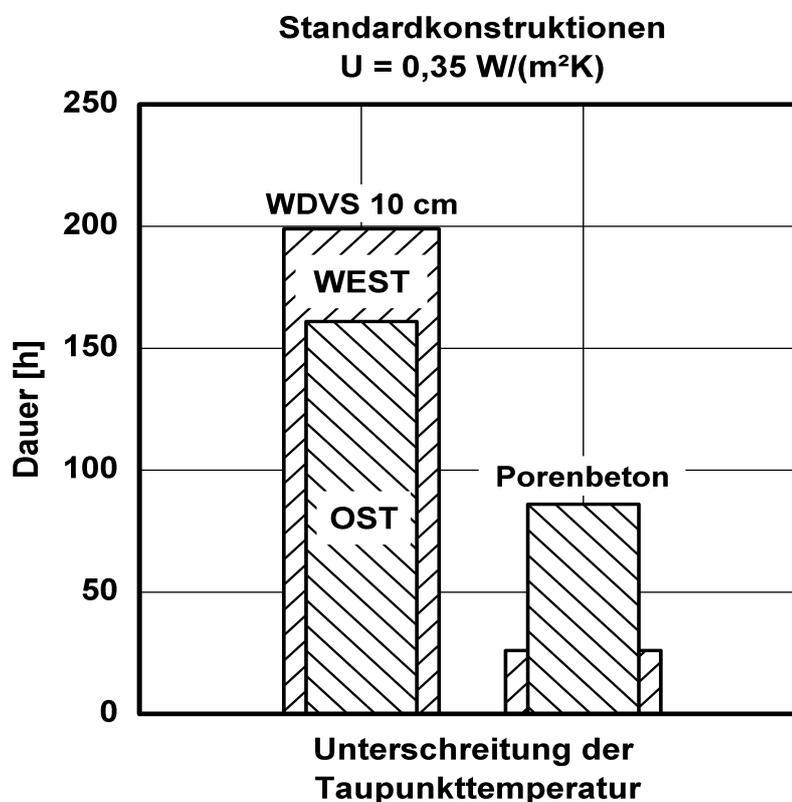


Abbildung 4: Vergleich der aufsummierten Betauungszeiten für eine Konstruktion mit WDVS und eine monolithische Wand aus Porenbeton für West- und Ostorientierungen im Herbst.

Abbildung 5 zeigt die für die Herbstperiode berechneten Taupunkttemperaturunterschreitungsdauern für ein WDVS in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke bzw. dem Wärmedurchgangskoeffizienten und von der Ausrichtung der Fassade. Damit wird erkennbar, dass eine deutliche Reduktion der Betauungszeiten nur durch eine politisch sicher nicht durchsetzbare Verminderung der Dämmstoffdicken auf unter 8 cm erreicht werden kann. Bemerkenswert ist auch, dass die Kurven für Nord- und Westausrichtung und die Kurven für

Süd- und Ostausrichtung nahezu zusammenfallen. Dabei liegen die Werte für Süd- und Ostausrichtung um etwa 20 % unterhalb der der anderen beiden Ausrichtungen. Bedenkt man, dass in der Praxis die meisten Probleme mit mikrobiellen Bewuchs auf der West- und Nordseite eines Gebäudes zu beobachten sind, kann daraus als einfache Näherung gefolgert werden, dass eine Reduktion der Betauungsdauer um ca. 25 % die meisten Probleme hinsichtlich eines Bewuchses lösen wird.

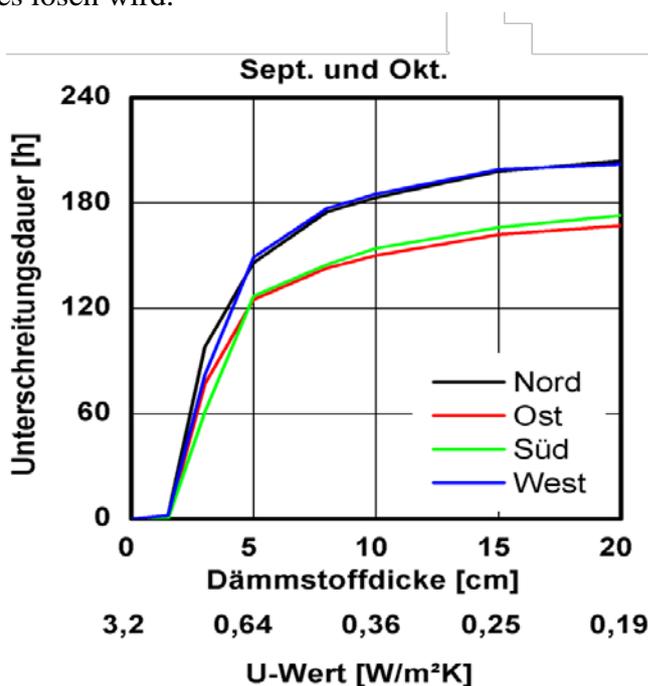


Abbildung 5: Für die Herbstperiode berechnete Taupunkttemperaturunterschreitungsduern für ein WDVS in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke bzw. dem Wärmedurchgangskoeffizienten und von der Ausrichtung der Fassade.

In Abbildung 6 sind beispielhaft für ein Gebäude auf dem Freigelände des IBP fotografische Ansichten der unterschiedlichen Orientierungen aufgeführt. Während die Ost- und Südseite weitgehend bewuchsfrei sind, ist an der West- und Ostseite deutlicher Bewuchs zu erkennen.



Abbildung 6: Fotografische Ansichten der unterschiedlichen Orientierungen eines Gebäudes auf dem Freigelände des IBP. Die Ost- und Südseite (oben) sind weitgehend bewuchsfrei. An der West- und Ostseite (unten links und rechts) ist deutlicher Bewuchs zu erkennen.

4.3 Berechnungen zu unterschiedlichen Vermeidungsstrategien

Es gibt hauptsächlich zwei verschiedene physikalische Ansätze, um die Betauung auf den Außenoberflächen von WDVS zu reduzieren. Indem man die thermische Speicherkapazität nahe der Außenoberfläche erhöht, ist es möglich, genug der täglichen Sonnenwärme im Bauteil zu speichern, um die Absenkung der Außenoberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren. Außerdem kann die tägliche Erwärmung der Fassade erhöht werden, indem eine dunklere Farbgebung mit einem höheren kurzwelligen Absorptionsfaktor eingesetzt wird. Die nächtliche Absenkung der Außenoberflächentemperatur kann durch Verwendung eines Anstrichs mit einem reduzierten langwelligen Emissionsvermögen (Low-E-Farben) vermindert werden. Ein

mögliches Kriterium, um die Ergebnisse und die Gefahr des Wachstums zu bewerten, ist hier die Dauer der Betauung und die Intensität der Taupunkttemperaturunterschreitung. Ein dritter Ansatz, um das Bewuchsrisko auf WDVS zu reduzieren, ist die Anpassung der hygrischen Materialeigenschaften, die zu einer niedrigeren Menge der Feuchtigkeit auf der Oberfläche führen sollte.

4.3.1 Einfluss der Dicke des Putzes

Eine Möglichkeit, die Zeit die Betauung der Oberfläche zu reduzieren, ist die Verwendung eines dickeren Putzes mit höherer Wärmespeicherkapazität. Normalerweise wird ein System mit nur einem 3 bis 5 mm dicken Putz verwendet. In Abbildung 7 wird für eine Nacht des Septembers der Verlauf der berechneten Oberflächentemperaturen dieses Dünnputzes mit dem eines Dickputzes mit einer Stärke von 10 mm verglichen.

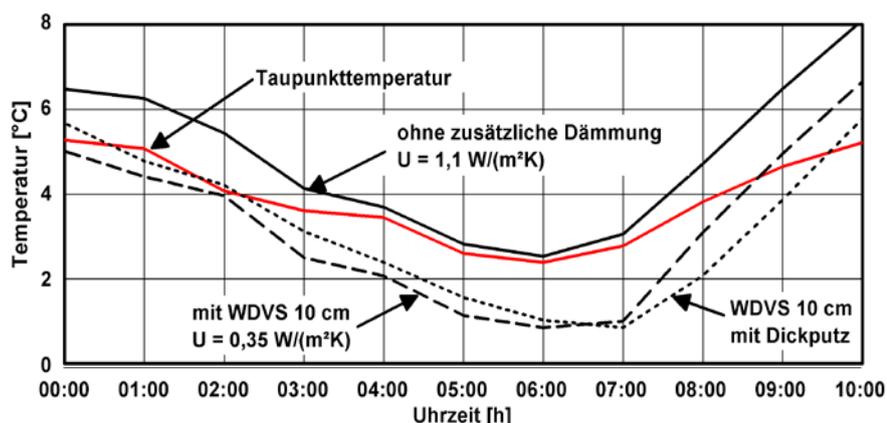


Abbildung 7: Verläufe der Oberflächentemperatur in einer Nacht im September für zwei westlich orientierte Fassaden mit einem 10 cm dicken WDVS aber verschiedener Dicke des Putzes (3 mm und 10 mm).

Die Temperatur der Fassade mit dem dicken Putz geht um ca. eine Stunde später unter die Taupunkttemperatur als die Temperatur der Standardkonstruktion mit 3 mm starkem Putz. Aber am Morgen, wenn die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung wieder ansteigen, braucht die Fassade mit dem dicken Putz mehr Zeit, um über die Taupunkttemperatur zu kommen. Die Wirkung des dickeren Putzes beschränkt sich somit hauptsächlich auf eine Zeitverschiebung um eine Stunde im Vergleich zur Standardkonstruktion.

Für eine ausgeprägtere Wirkung muss deshalb die Wärmespeicherkapazität weiter erhöht werden. Abbildung 8 zeigt die Betauungsdauer für zwei verschiedene Dickputze mit einer maximalen Dicke von 20 mm und einer hohen Rohdichte im Vergleich zu einem normalen dünnen Putz. Dies zeigt die maximalen Möglichkeiten eines Dickputzes in Bezug auf die Verminderung der nächtlichen Betauung eines WDVS.

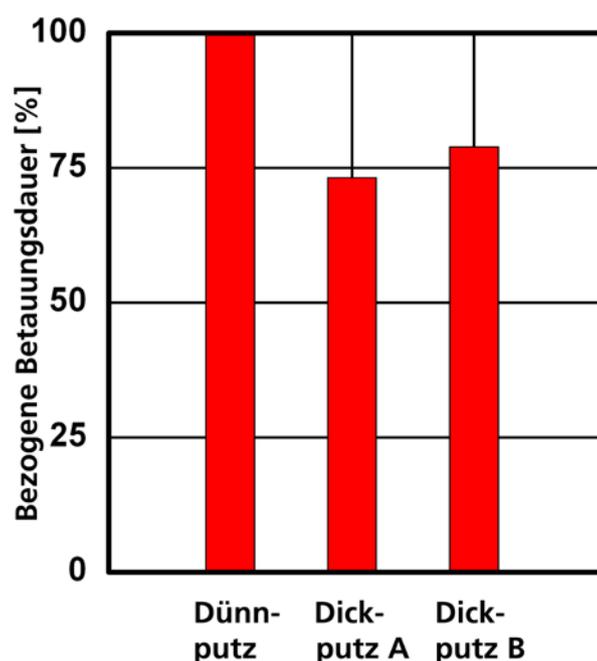


Abbildung 8: Betauungsdauer von zwei verschiedenen Dickputzen mit einer maximalen Dicke von 20 mm und einer hohen Rohdichte im Vergleich zu einem normalen Dünnputz.

4.3.2 Einfluss der Strahlungseigenschaften der Oberfläche

Um den Einfluss der Strahlungseigenschaften der Oberfläche zu bestimmen, wurden Berechnungen mit einer dunklen Farbgebung statt einer weißen (Absorptionskoeffizient 0,6 statt 0,4) durchgeführt. Wie erwartet, erreicht die Oberflächentemperatur des dunklen Putzes eine höhere maximale Temperatur während des Tages, wie in Abbildung 8 gezeigt.

Eine neue viel versprechende Weise, die Betauung auf WDVS zu vermindern, ist die Anwendung von Anstrichen mit abgesenktem langwelligem Emissionsvermögen (langwelliger Abstrahlungskoeffizient 0.6 statt 0.9). Die positive Wirkung solch einer Farbe ist durch hygrothermische Berechnungen ebenfalls untersucht worden. Die Variante mit einem hellen Putz, aber niedrigem IR-Emissions-

vermögen wird tagsüber wärmer als der Standardfall. Das zeigt, dass auch während des Tages jede Oberfläche einen Energieverlust aufgrund der langwelligen Emission aufweist, die nicht vernachlässigbar ist.

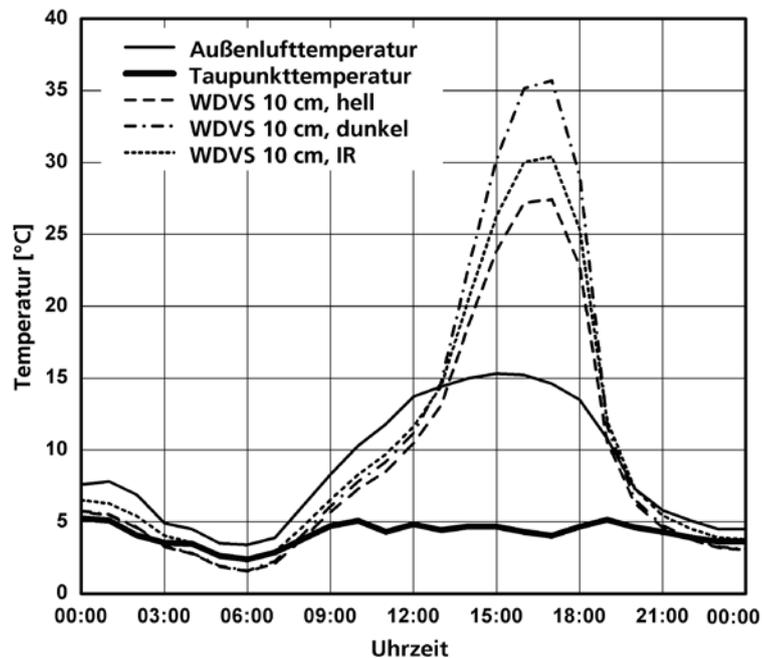


Abbildung 9: Berechnete Verläufe von Oberflächentemperaturen für nach Westen orientierte Wände mit WDVS und verschiedenen Oberflächeneigenschaften für einen Sonnensommertag (am 13. September). Die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur sind ebenfalls dargestellt.

In der Nacht verursacht die langwellige Abstrahlung ein Abkühlen der Fassade (Abb. 10). Die Oberflächentemperatur der dunklen Fassade, die die höchsten Temperaturen während des Tages zeigt, fällt nahezu zur selben Zeit unter die Taupunkttemperatur wie die der weißen Fassade. Das zeigt, dass die thermische Speichermasse oberhalb der Dämmung zu niedrig ist, um genug Sonnenenergie für die Vermeidung der Betauung zu speichern. Die Oberflächentemperatur des WDVS mit dem niedrigeren IR-Emissionsvermögen bleibt stattdessen immer oberhalb der Taupunkttemperatur.

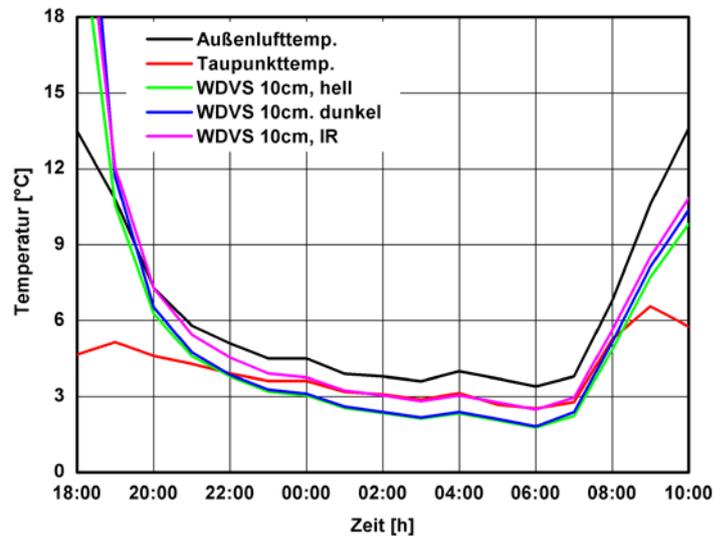


Abbildung 10: Berechnete Verläufe von Oberflächentemperaturen für nach Westen orientierte Wände mit WDVS und Anstrichen mit verschiedenen spektralen Eigenschaften für eine klare Nacht (13./14. September). Die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur sind ebenfalls dargestellt.

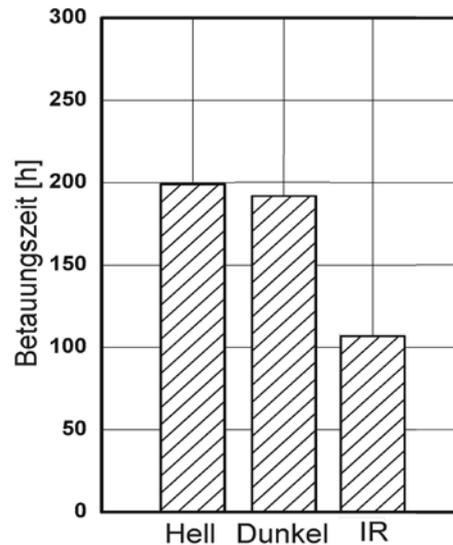


Abbildung 11: Aufsummierte Betauungszeiten für Wände mit WDVS während der Hauptwachstumsperiode Herbst in Abhängigkeit von verschiedenen Oberflächeneigenschaften.

Abbildung 11 zeigt die berechneten aufsummierten Betauungszeiten für Wände mit WDVS während der Hauptwachstumsperiode Herbst in der Abhängigkeit von verschiedenen Oberflächeneigenschaften. Es ist offensichtlich, dass eine dunkle Farbe mit einer Verminderung der Betauung von ungefähr 5 % nur eine geringe Verbesserung bewirkt. Der Vorteil einer dunklen Farbe liegt in den höheren Oberflächen-

temperaturen nach dem Sonnenaufgang, die eine frühere Abtrocknung bewirken. Mit der Verwendung eines dunkleren Anstrichs sind aber auch zwei zusätzliche positive Wirkungen gegeben. Zum Einen kann die höhere tägliche Maximaltemperatur hin und wieder zu einem Abtöten der Mikroorganismen führen. Zum Anderen sind auf dieser Oberfläche leichte Verfärbungen durch Mikroorganismen deutlich schwerer zu erkennen, sodass eine geringere Reklamationsquote zu erwarten ist. Das deutlich bessere Ergebnis für das WDVS mit dem Anstrich mit niedrigerem langwelligen Emissionsvermögen im Vergleich zu herkömmlichen Anstrichen zeigt, dass dessen Verwendung eine viel versprechende Möglichkeit darstellt, die Gefahr des mikrobiellen Wachstums auf WDVS zu reduzieren.

4.3.3 Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM)

Eine andere Möglichkeit, die Betauung auf der Oberfläche der Fassade zu vermindern, ist der Einsatz eines Phasenwechselmaterials (PCM). Die dahinter liegende Idee besteht darin, dass die Temperatur des PCM relativ unverändert bleibt so lange es seine Phase ändert, während die Oberfläche Energie aufgrund der langwelligen Abstrahlung verliert. Wenn diese Temperatur über der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft liegt, wird keine Betauung stattfinden. Für die Berechnungen wird hinter dem Putz eine PCM-Schicht mit einer Dicke von 5 mm angenommen. Für das PCM kann Paraffin eingesetzt werden, das mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Schmelzpunktttemperaturen verfügbar ist. Somit können für die Berechnungen nahezu beliebige Schmelzpunktttemperaturen angenommen werden, um den Einfluss auf die Dauer der Betauung zu optimieren. Hierbei werden zwei unterschiedliche Typen von PCM zugrunde gelegt, die sich in ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1. Materialeigenschaften der ausgewählten PCM-Typen.

Materialeigenschaft	Einheit	PCM Typ 1	PCM Typ 2
Rohdichte	[kg/m ³]	900	1500
Wärmeleitfähigkeit	[W / (mK)]	0.2	1,0
Spezifische Wärmekapazität	[J / (kgK)]	2100	1500
Latentwärme	[(kJ / (kgK)]	100	110

Abbildung 12 zeigt die für den Herbst berechneten Ergebnisse für unterschiedliche Schmelzpunktbereiche bei Verwendung der Außenbedingungen von Holzkirchen. Es ist offensichtlich, dass die Wahl der Phasenänderungstemperatur einen starken Einfluss auf die Wirksamkeit des PCM hat.

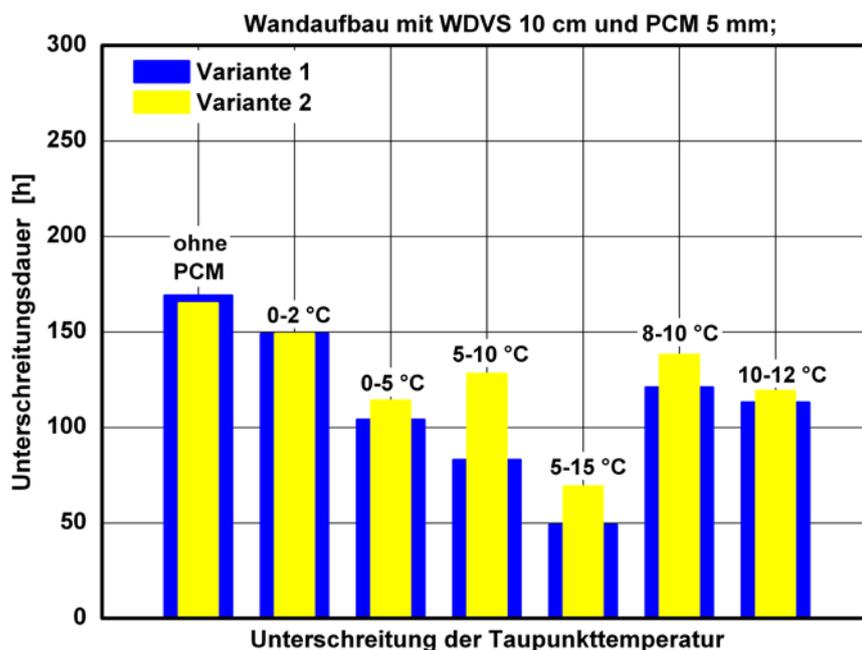


Abbildung 12: Berechnete für den Herbst aufsummierte Btauungszeiten für unterschiedliche Schmelzbereichsbereiche bei Verwendung der Außenbedingungen von Holzkirchen.

Abbildung 13 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperaturen einer typischen Nacht Mitte September für eine Wand mit einem Standard-WDVS und eine Wand mit PCM, deren Umschlagstemperatur nicht optimiert wurde (Phasenänderung ca. 15 °C) sowie ein optimiertes System (Phasenänderung bei 5 - 15 °C). Es ist klar sichtbar, dass mit einem optimierten PCM die Wand bemerkenswert höhere Oberflächentemperaturen während nächtlicher Stunden hat als das herkömmliche WDVS. Jedoch in den Morgenstunden muss eine Verzögerung der Temperaturerhöhung beobachtet werden. Das wird in dieser Zeit durch die Phasenänderung von fest zu flüssig verursacht. Dies führt zwar zu einer Btauung am Morgen, aber wegen des Anstiegs der Außentemperatur wird das Kondensat schnell abtrocknen. Der Verlauf der Oberflächentemperatur der Wand mit nicht optimiertem PCM zeigt während der Nacht fast dasselbe Verhalten wie das normale WDVS; es werden nur geringfügige Verbesserungen bezüglich der Btauung erreicht.

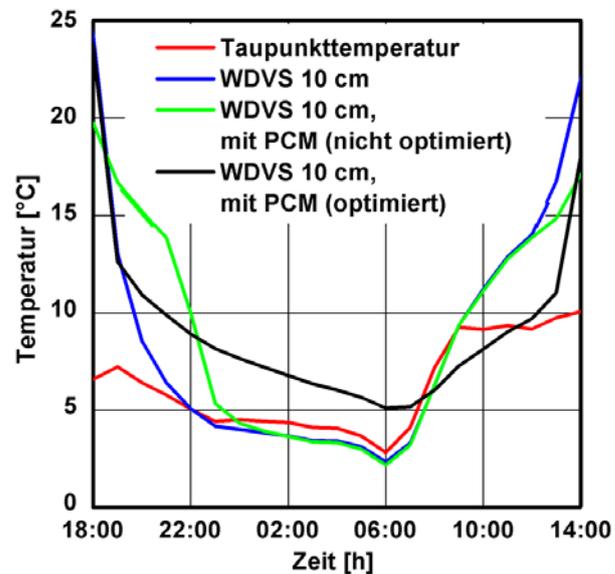


Abbildung 13: Berechneter Verlauf der Oberflächentemperaturen einer typischen Nacht Mitte September für eine Wand mit einem Standard-WDVS und eine Wand mit PCM, deren Umschlagstemperatur nicht optimiert wurde (Phasenänderung ca. 15 °C) sowie ein optimiertes System (Phasenänderung bei 5 - 15 °C).

Abbildung 14 zeigt die aufsummierten mit der Höhe der Taupunkttemperaturunterschreitungen gewichteten Betauungszeiten für das Standard-WDVS und das System mit dem optimierten PCM. Ohne PCM ist das Ergebnis fast dreimal so hoch.

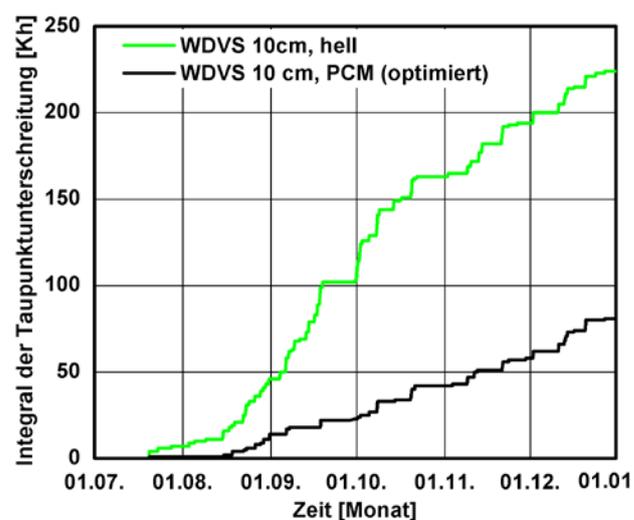


Abbildung 14: Berechnete und aufsummierte mit der Höhe der Taupunkttemperaturunterschreitungen gewichtete Betauungszeiten für das Standard-WDVS und das System mit dem optimierten PCM.

4.3.4 Kombination von PCM und IR-Wirkung

Es ist naheliegend, beide Maßnahmen, den Einsatz von PCM und die Anwendung eines Anstrichs mit reduziertem langwelligem Emissionsvermögen, zu kombinieren. Der Einfluss des PCM und der Kombination mit dem IR-Anstrich werden in Abbildung 15 gezeigt. Am Nachmittag nehmen die Temperaturen der drei Fassaden abhängig von den Eigenschaften der Oberfläche und des Materials verschieden schnell ab. Die Standardkonstruktion (blaue Linie) mit einem grauen Anstrich erreicht die niedrigste Oberflächentemperatur. Die Temperatur liegt während der ganzen Nacht von ca. 17:00 Uhr bis 5:00 Uhr unterhalb der Taupunkttemperatur. Der Einfluss des PCM (schwarze Linie) wird durch die höhere Temperatur widerspiegelt, ebenso wie bei der Fassade mit PCM und IR (grüne Linie). Die Temperatur der Fassade mit PCM ist nur für kurze Perioden zwischen 18:00 Uhr - 20:00 Uhr und 2:30 - 5:00 Uhr unter der Taupunkttemperatur. Am Morgen nimmt die Oberflächentemperatur der Standardkonstruktion schneller zu, weil die Fassaden mit PCM mehr Energie brauchen, um sich zu erwärmen. Die Fassade mit PCM und IR-Anstrich zeigt dagegen fast die ganze Nacht keine Taupunkttemperaturunterschreitung.

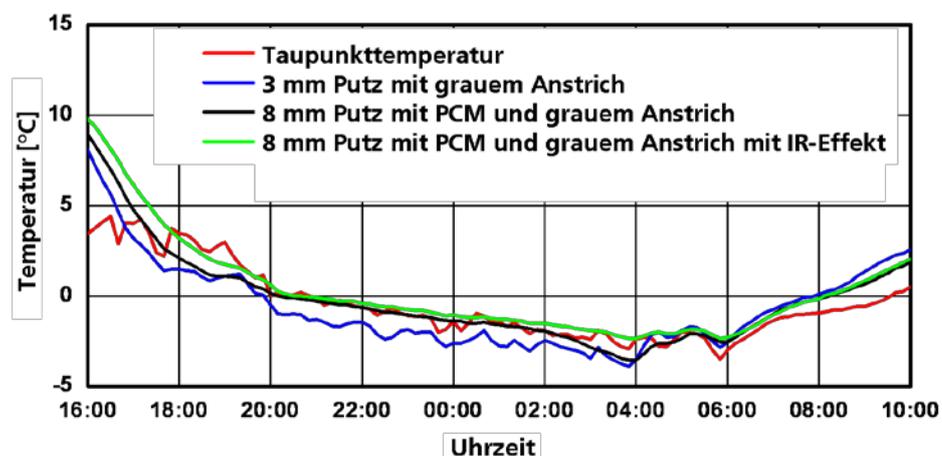


Abbildung 15: Verläufe der Oberflächentemperatur von drei nördlich orientierten Fassaden mit 10 cm dickem WDVS und verschiedenen grauen Anstrichen mit und ohne IR-Wirkung sowie PCM in einer Nacht im November.

4.3.4 Vergleich von Maßnahmen zur Reduktion der nächtlichen Unterkühlung

In Abbildung 16 werden die Effekte der verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion der nächtlichen Unterkühlung vergleichend dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Anwendung von dunklerer Fassaden-

farbe hinsichtlich des Vermeidens der Betauung kein nennenswertes Ergebnis liefert. Allerdings wurde hier bewusst nur leicht getönte Farbgebung zugrunde gelegt, da dunkle Farben am Markt nur eine geringe Verbreitung aufweisen und aufgrund der hohen zu erwartenden Maximaltemperaturen eventuell andere Probleme mit sich bringen. Dennoch kann eine leicht getönte Farbe vorteilhaft sein, da sie geringes Wachstum verbirgt sowie höhere Temperaturen von Zeit zu Zeit eine Abtötung der Mikroorganismen zur Folge haben können. Ein dickerer Außenputz mit einer hohen thermischen Masse kann die Betauungszeiten um maximal 20 %, IR Farbe um fast 30 % und der Einsatz von PCM sogar um bis zu 70 % reduzieren. Die Kombination von beiden Maßnahmen (PCM + IR) kann im Extremfall die Betauungszeiten noch weiter reduzieren. Es muss jedoch in Betracht gezogen werden, dass im Falle der Verwendung von Phasenwechselmaterialien (PCM) die gewünschte Wirkung nur erreicht wird, wenn der Schmelzpunkt des PCM an die Klimarandbedingungen angepasst ist, was durch den zusätzlichen Begriff "optimiert" in der Abb. 16 ausgedrückt wird.

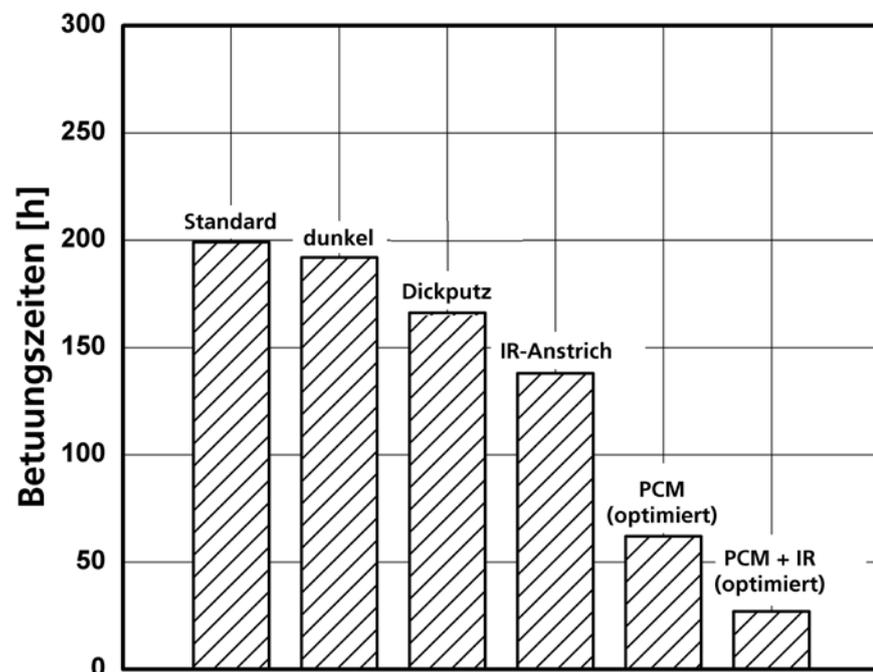


Abbildung 16: Vergleichende Darstellung der Effekte der verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion der nächtlichen Unterkühlung für die Herbstperiode.

4.3.5 Verbesserung der hygrischen Materialeigenschaften

Das wichtigste Kriterium für das Bewuchsrisko ist die Feuchtigkeit auf der Oberfläche, welcher durch das Außenklima, die Baukonstruktion aber auch wesentlich durch die Materialeigenschaften der Außenbeschichtung beeinflusst wird. Neben der Oberflächenorientierung, dem Wärmeschutz und der Wärmespeicherkapazität haben auch die hygrischen Eigenschaften der Beschichtung einen maßgeblichen Einfluss. Da es offensichtlich ist, dass bereits kleine Unterschiede im mittleren oder langfristigen Niveau der Feuchtigkeit sichtbare Unterschiede im Wachstum verursachen, kann eine Optimierung der hygrischen Oberflächeneigenschaften eine wesentliche Reduzierung des Bewuchsriskos bewirken. In diesem Zusammenhang muss geklärt werden, inwieweit eine Hydrophobie der Oberfläche, die eine niedrigere Wasserabsorption der Außenbeschichtung bewirkt, die allgemein erwartete positive Wirkung der Verminderung der Verschmutzung und des mikrobiellen Wachstums bedeutet. Es ist auch möglich, dass ein bestimmter Grad des Wasseraufnahmevermögens des Untergrundes helfen kann, mikrobielles Wachstum zu vermeiden, indem das Tauwasser von der Oberfläche in tiefere Schichten geleitet wird, so dass es für die Mikroorganismen nicht mehr verfügbar ist.

Um das auf der Außenoberfläche befindliche Wasser berechnen zu können, wurde für das Berechnungsprogramm eine Oberflächenfeuchtespeicherschicht entwickelt (Krus Rösler 2006). Die „Materialkennwerte“ dieser Oberflächenfeuchtespeicherschicht sind so angepasst worden, 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.

Bei der Entwicklung des Laborversuches musste erreicht werden, dass die Bedingungen im Labor den Bedingungen an der Fassade möglichst ähnlich sind. Dies bedeutet in diesem Fall vor allem, dass die Taupunkttemperaturunterschreitungen in der Größenordnung der Freilandversuche liegen sollten. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abbildung 17 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 Temperaturfühler zur Regelung der Oberflächentemperatur eingebracht.

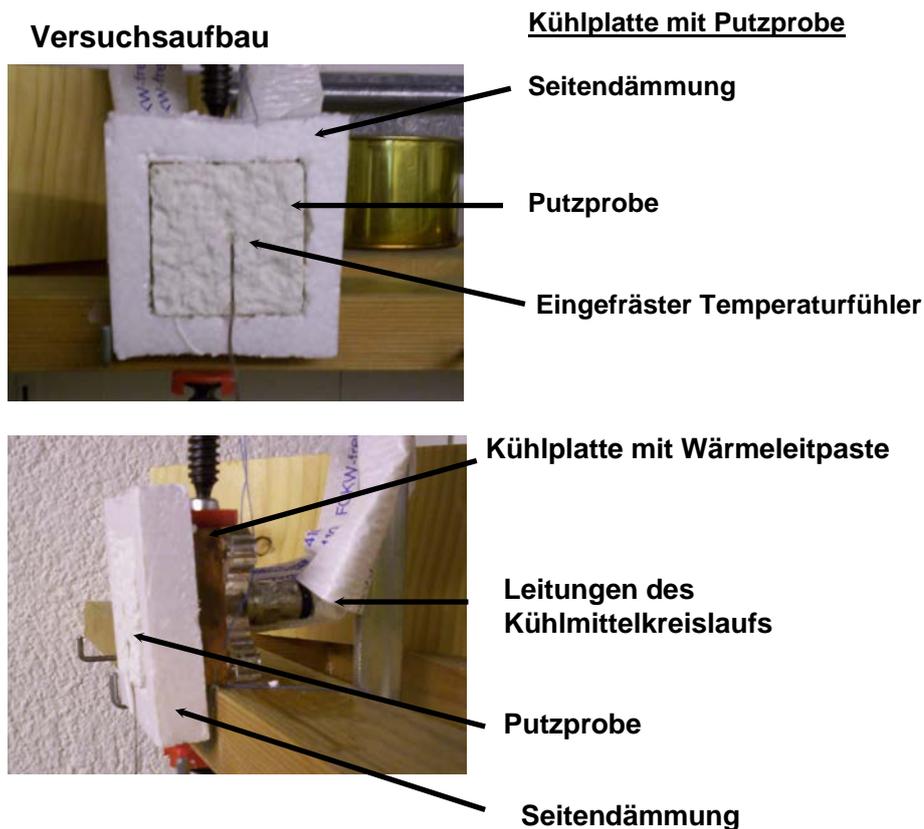


Abbildung 17: Versuchsaufbau zur Betauung einer Putzoberfläche unter vorgebbaren Randbedingungen im Klimaraum. Oben ist die Vorderansicht der seitlich gedämmten Putzprobe dargestellt. In der Seitenansicht (unten) erkennt man die rückseitig angebrachte Kühleinrichtung zur Unterkühlung der Probenoberfläche, um deren Betauung zu ermöglichen.

Um das Verhalten an der Fassade im Labor zu simulieren, werden die Temperaturen so gewählt, dass die Taupunkttemperaturunterschreitung 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 Taupunkt-

temperatur im Klimaraum ermittelt. Das an der Oberfläche befindliche Wasser wird durch ein Abtupfen mit einem saugfähigen Vlies und anschließende Wägung ermittelt. In Tabelle 2 sind die für einen Putz mit ultrahydrophobem Anstrich und einem Dispersions-silikatanstrich 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 2: Gemessene und berechnete flächenbezogene Oberflächenwassergehalte für einen Putz mit ultrahydrophobem Anstrich und Dispersions-silikatanstrich.

Probe	Betauung [h]	Oberflächen feuchte gemessen [g/m ²]	Oberflächen feuchte berechnet [g/m ²]	Abweichung [%]
Ultrahydrophober Anstrich	1	25.7	23.0	10.3
	2	49.0	43.5	10.9
Dispersions-Silikat-Anstrich	2	7.4	6.8	8.2
	3	11.0	10.5	4.8

In Abbildung 18 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 (Abbildung 18 oben) und eine gute Übereinstimmung mit den Messpunkten. Ein ganz anderes Bild ergibt sich beim Dispersions-silikatanstrich (Abbildung 18 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 Kapillartransportvorgänge 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.

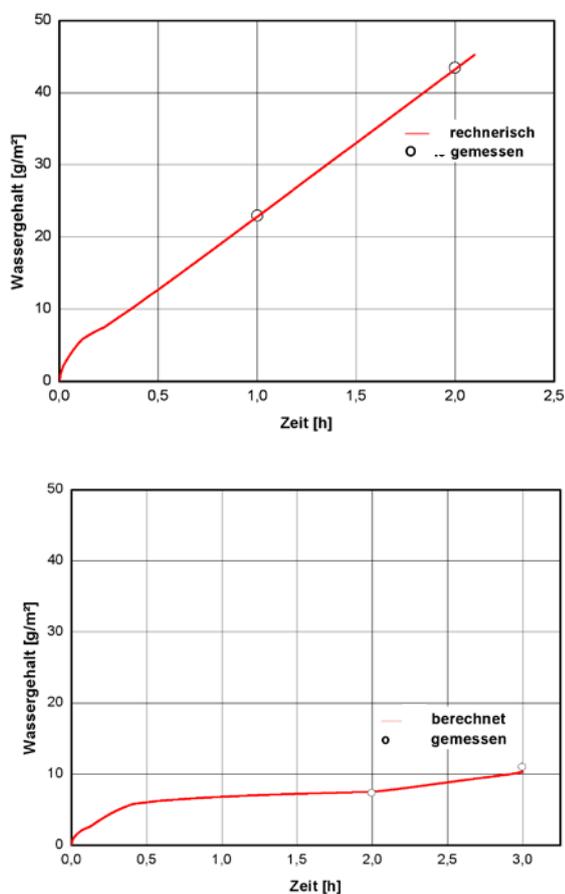


Abbildung 18: Vergleich des berechneten Verlaufs mit dem gemessenen Verlauf der Oberflächenfeuchte für eine Putzprobe mit ultrahydrophobem Anstrich (oben) und mit Dispersionssilikatanstrich (unten)

Vergleicht man die in Abbildung 19 dargestellten Laborergebnisse für unterschiedliche Beschichtungen mit den Wasseraufnahmekoeffizienten, wird klar, dass bereits relativ niedrige Wasseraufnahmekoeffizienten geringfügig oberhalb $0,1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ zu einer deutlichen Reduktion der Oberflächenfeuchte führen. Dies ist darin begründet, dass die nächtliche Betauung zwar einen langen aber langsamen Befeuchtungsmechanismus mit einem niedrigen Massenstrom darstellt. Dies bedeutet aber, dass auch Putze, die als wasserabweisend einzustufen sind, eine für diesen Effekt ausreichend hohe kapillare Wasseraufnahme aufweisen können.

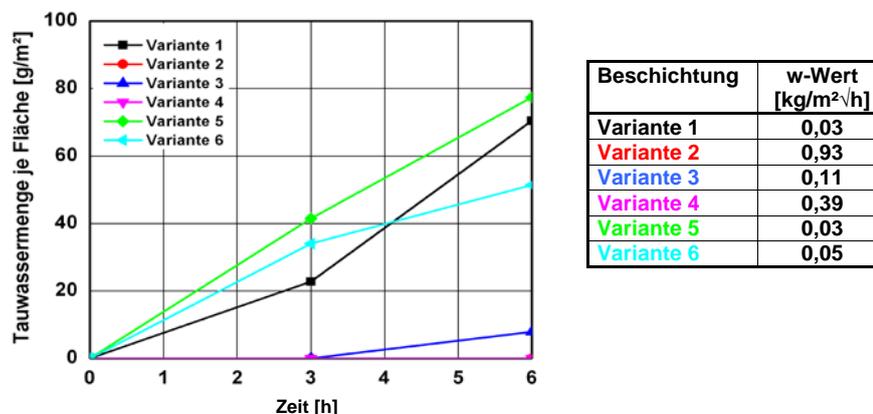


Abbildung 19: Im Laborversuch nach 3 und 5 Stunden Betauung ermittelte Oberflächenfeuchten für Beschichtungen mit unterschiedlichen Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert).

Für die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Oberflächenfeuchte unter natürlichen Randbedingungen wurde an einer westorientierten Außenfassade mit vier unterschiedlichen WDV-Systemen der zeitliche Verlauf der Oberflächenfeuchte bestimmt. 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. Abbildung 20 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 zwischen Rechnung und Messung erreicht.

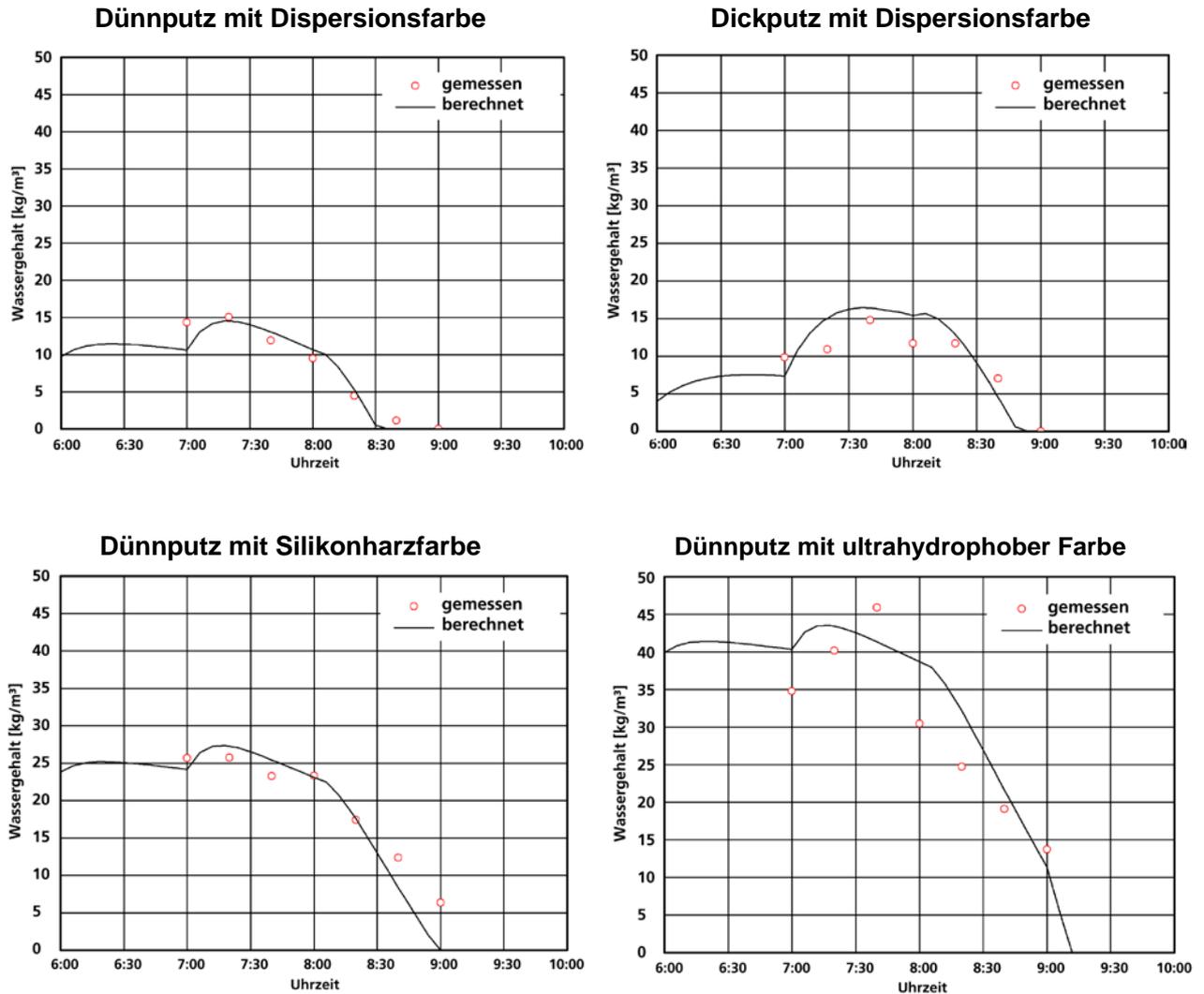


Abbildung 20: Vergleich des berechneten Verlaufs der Oberflächenfeuchte mit der gravimetrischen Oberflächenfeuchtebestimmung für unterschiedliche Putze und Anstriche einer Westfassade für einen typischen Septembermorgen.

Abbildung 21 zeigt die aufsummierte Menge von Wasser auf der Außenfassade während der Hauptwachstumsperiode im Herbst für einen ultrahydrophoben Anstrich und eine Dispersionsilikatbeschichtung. Es ist leicht erkennbar, dass die Dispersionsilikatbeschichtung nur die Hälfte der Menge an Wasser für Mikroorganismen zur Verfügung stellt.

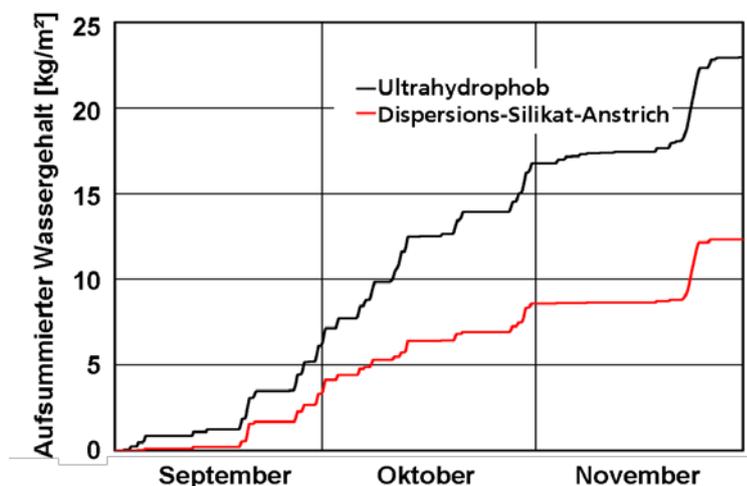


Abbildung 21. Berechnete aufsummierte Mengen von Tauwasser auf der Außenfassade (ohne Berücksichtigung der zwischenzeitlichen Trocknung) für einen ultrahydrophoben Anstrich und eine Dispersions-silikatbeschichtung im Herbst, der Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen.

5. Freilanduntersuchungen

Es sind verschiedene Freilandversuche durchgeführt worden, um die Berechnungen zu überprüfen. Abb. 22 zeigt eine fotografische Ansicht der Fassaden. Bei den in Abb. 22 links oben dargestellten nach Westen orientierten Fassaden handelt es sich um zwei Testfassaden aus monolithischen Konstruktionen und Wänden mit normalen WDVS. Die rechts oben dargestellte, nach Norden orientierte Fassade besteht aus Wänden mit WDVS, von denen eines zu Vergleichszwecken aus einem Silikonharzputzsystem mit Silikonharzfassadenfarbe besteht und die anderen aus unterschiedlichen mineralischen putzen mit einem „hydrophilen“ Anstrich. Bei der in Abb. 22 unten dargestellten, ebenfalls nach Norden ausgerichteten Fassade, wurden neben einem Standardsystem Putze mit PCM, mit IR-Anstrich und Kombinationen eingesetzt. Direkt unter der Außenoberfläche der Wände wird der Verlauf der Temperatur gemessen, um durch Vergleich mit der gemessenen Taupunkttemperatur der Außenluft die Dauer und die Intensität der Oberflächenbetauung zu ermitteln.



Abbildung 22. Fotografische Ansicht der westorientierten (links oben) und der nördlich orientierten Fassade (rechts oben und unten).

Obwohl es sich bei der Freilandversuchsstelle in Holzkirchen um eine Gegend mit hoher Schlagregenbelastung handelt - dies war damals einer der wesentlichen Gründe für die Auswahl des Standorts -, zeigen die Untersuchungen, dass bei Wärmedämmverbundsystemen die Betauungszeiten gegenüber den Beregnungszeiten überwiegen (siehe Abbildung 23). Dies ist ein zusätzlicher Hinweis auf die Bedeutung der nächtlichen Betauung.

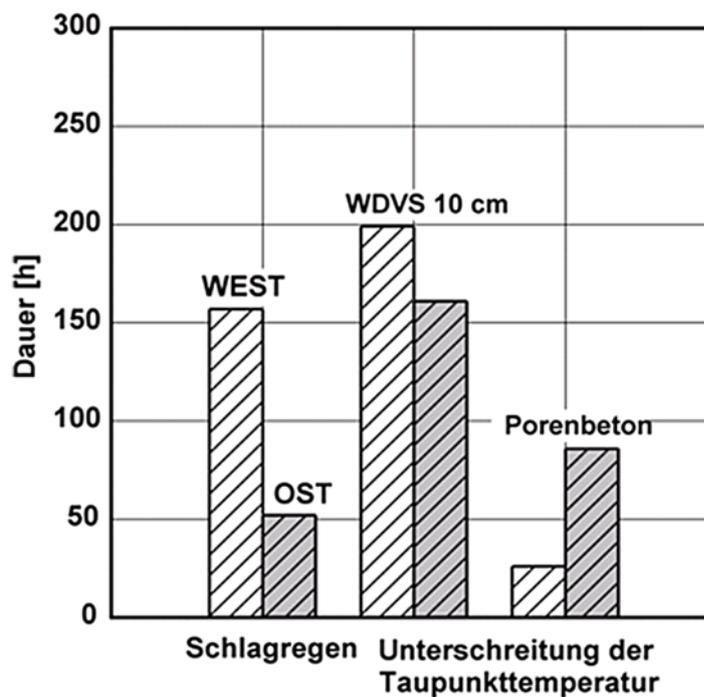


Abbildung 23: Vergleich der Berechnungszeiten des schlagregenreichen Standorts Holzkirchen mit den Betauungszeiten eines Wärmedämmverbundsystems und einer monolithischen Konstruktion, jeweils mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,35 / \text{m}^2\text{K}$.

5.1 Einfluss des Konstruktionstyps

Um zu belegen, dass das Ausmaß der Betauung auf monolithischen Systemen niedriger ist, sind auch Messungen an massiven Wänden (Abb. 24) einzogen worden. Im Vergleich zu WDV5 zeigen die beiden massiven Wände aus hoch dämmendem Ziegel und Porenbeton deutlich kürzere Betauungszeiten, bei mit dem WDV5 vergleichbarem Wärmedämmstandard. Wie die Berechnungen bereits zeigten, ergibt eine leicht getönte Oberfläche (graue Farbgebung) nur eine unwesentliche Verbesserung.

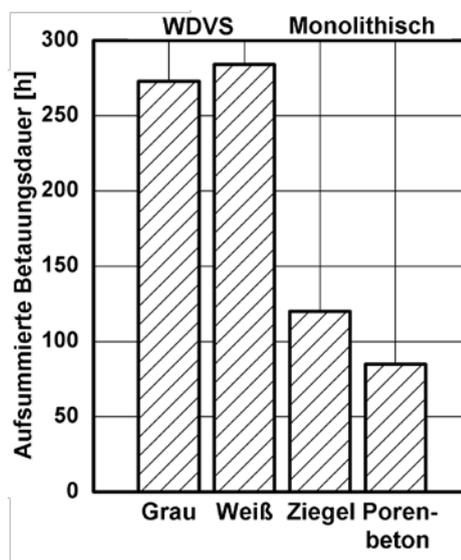


Abbildung 24: Vergleich der gemessenen aufsummierten Betaudauern für verschiedene Wandkonstruktionen und Beschichtungssysteme für den Herbst als Hauptwachstumsperiode.

5.2 Einsatz von PCM und Low-E-Anstrich

Die Vorteile von innovativen Materialien, wie z.B. IR-Anstrich, PCM-Putz und die Kombination von PCM und IR-Anstrich, können durch Freilandmessungen belegt werden (siehe Abb. 25, Messergebnisse der Nordfassade des Testgebäudes aus Abb. 22 unten). Mit den für die dargestellte Zeitspanne gemessenen Betaudauern ist die Wirksamkeit von PCM im ersten Herbst klar sichtbar, wobei die Messungen in diesem Jahr nicht vor dem Oktober angefangen werden konnten. Im Vergleich mit einem weißen Dünnputz wurde die Dauer der Betaudauer für den Dickputz mit PCM-Zusätzen (ca. 10 M.-%) um etwa 30 % reduziert. Beim Vergleich dieses Ergebnisses mit den für PCM berechneten Ergebnissen der Abb. 12, muss berücksichtigt werden, dass weniger als Hälfte der Menge von PCM beigemischt wurde, sodass die gemessene Dauer der Betaudauer tendenziell eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen zeigt. Die Fassade mit IR-Anstrich, der nur einen langwelligen Emissionsgrad von 0.74 statt dem der den Berechnungen zugrunde gelegten 0.6 erreichte, zeigt eine Abnahme der Betaudauern von etwa 15 %. Wie erwartet, erreicht die Kombination des PCM-Putzes und des IR-Anstrichs mit fast 50 % eine höhere Verminderung als Fassaden mit PCM Zusatz oder IR-Farbe allein.

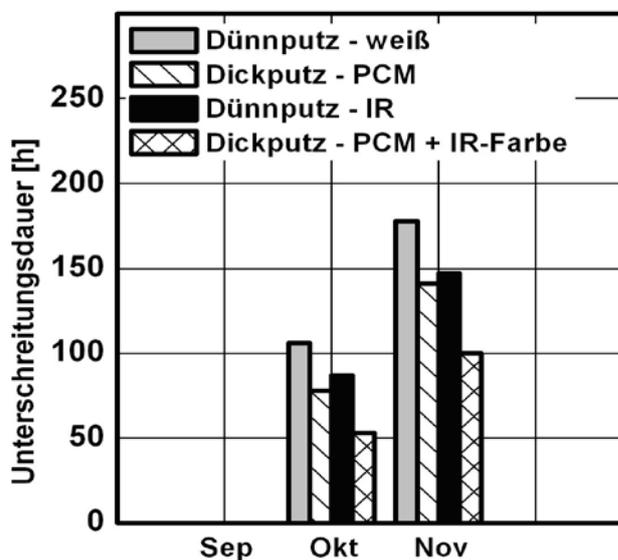


Abbildung 25: Dauer der Betaung für das WDVS ohne und mit PCM und IR-Anstrich für den ersten Herbst der Messperiode.

Außer Dauer und Stärke der Betaung ist die resultierende Menge von Oberflächenwasser entscheidend, um das Risiko von mikrobiellem Wachstum zu bewerten, da nur das Wasser auf der Oberfläche einer Fassade für Mikroorganismen verfügbar ist. Deshalb wurde auch auf der Westfassade die Oberflächenfeuchtigkeit durch Abtupfen des Wassers mit einem saugfähigen Vlies bestimmt. Abb. 26 zeigt die Ergebnisse eines Morgens nach einer klaren Nacht. Im Vergleich zur Oberfläche des weißen Dickputzes wurde auf der Oberfläche eines normalen WDVS mit weißer Farbe fast die doppelte Menge an Wasser gemessen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Ergebnisse in einem sehr großen Ausmaß von den hygri-schen Materialeigenschaften des Putzes und des Anstrichs abhängig sind. Es dringt eine größere Menge des Tauwassers durch den dicken Putz unter die Oberfläche. Das beste Ergebnis wird durch die Oberfläche mit IR-Anstrich (Variante mit einem Emissionskoeffizienten von etwa 0.6) erreicht. Fast kein Wasser konnte an diesem Morgen auf dieser Oberfläche abgetupft werden. Leider müssen die derzeit verfügbaren IR-Anstriche für die Praxis noch unbedingt optimiert werden, weil bis jetzt alle geprüften IR-Anstriche nach kurzer Bewitterungsdauer einen metallischen Glanz bekommen (siehe Abb. 27). Das ist vermutlich in dem speziellen Bindemittel begründet, das für die langwellige Abstrahlung zumindest teilweise transparent sein muss, aber für den Gebrauch draußen nicht stabil genug ist. Die Aluminiumflocken, die verwendet werden, um die langwellige Emission zu reduzieren, erscheinen durch die Abwitterung auf der Oberfläche. Die Messergebnisse zeigen jedoch,

dass es sich lohnen würde, diese Anstriche entsprechend weiter zu entwickeln.

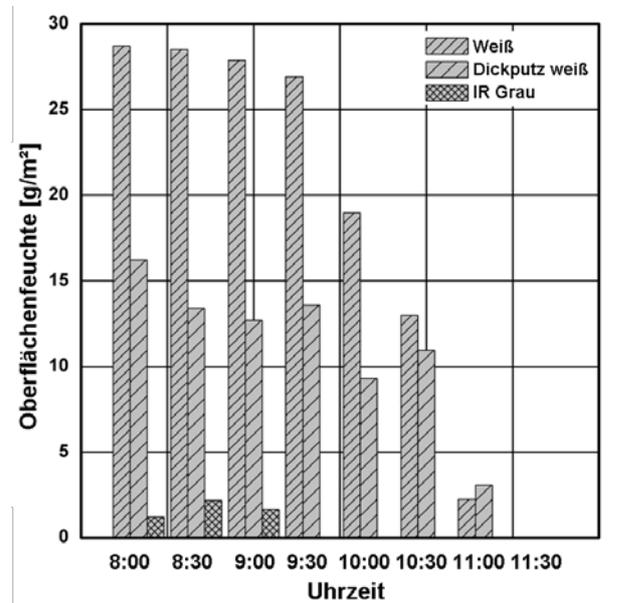


Abbildung 26: Verläufe der Oberflächenfeuchtigkeit von westorientierten WDVS mit verschiedenen Beschichtungen.



Abbildung 27. Fotografische Ansicht der Oberfläche mit einem IR-Anstrich vor (linke Seite) und nach einer Bewitterungsperiode von 12 Monaten (rechte Seite).

Die Messungen an der Nordfassade des Testgebäudes der Abb. 22 unten wurden fortgesetzt. Abb. 28 zeigt die Ergebnisse für die darauf folgenden 2 Herbstperioden. Überraschenderweise zeigt sich bei der

Beschichtung mit PCM-Zusätzen im Gegensatz zur ersten Herbstperiode keine oder nur eine geringe Verminderung der Betauungszeiten. Der Grund liegt aber nicht in der Stabilität des PCM-Zuschlags, sondern in der Schmelztemperatur des verwendeten PCM, welche hierbei $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt. Während die mittlere Außenlufttemperatur im Herbst des ersten Jahres der Untersuchungen bei ca. $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lag, betrug sie etwa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in den folgenden Jahren. Deshalb konnte in diesen beiden Herbstperioden keine Latentwärme wirksam werden. Die Fassade mit IR-Farbe zeigt jedoch eine andauernde und unveränderliche Verminderung der Betauungszeiten. Eine interessante Beobachtung ist die Tatsache, dass während der Gesamtperiode der Messungen die Kombination des PCM-Putzes und der IR-Farbe eine deutlich höhere Verminderung der Betauungszeiten zeigt als die IR-Farbe allein, obwohl der PCM Zusatz allein zeitweise keine Verbesserung ergab. Derzeit kann dafür noch keine begründete Erklärung gegeben werden.

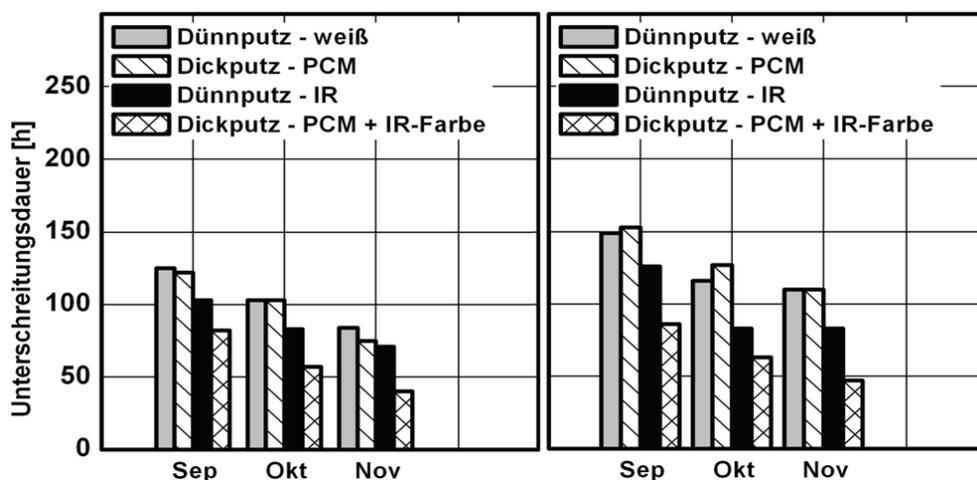


Abbildung 28. Betauungsdauer auf der Oberfläche des WDVS ohne und mit PCM und IR-Anstrich des zweiten (links) und dritten Herbstes (rechts) der Messperiode.

5.3 Einfluss der hygrischen Materialeigenschaften

Um den zeitlichen Fortschritt der Oberflächenfeuchtigkeit unter natürlichen Randbedingungen zu bestimmen, wurde die Oberflächenfeuchte durch Abtupfen an der westorientierten Außenfassade mit Wärmedämmverbundsystemen mit unterschiedlichen Beschichtungen bestimmt. Besonders aufschlussreich ist dabei der Vergleich einer normalen Silikonharzfarbe mit einer Silikonharzfarbe mit einem Kontaktwinkel größer 130° und Abperleffekt. Während sich bei

Untersuchungen an zwei Standorten (Holzkirchen und Ernsthofen) bei der normalen Silikonharzfarbe vergleichbare Bewuchsbilder ergeben, unterscheiden sich diese bei der Farbe mit Abperleffekt je nach Standort. In Holzkirchen tritt kein Bewuchs auf, am anderen Standort wird dagegen ein deutlicher Bewuchs festgestellt. Eine Erklärung hierfür ist im unterschiedlichen Abtrocknungsverhalten zu finden (Abbildung 29), wie anhand von Oberflächenfeuchtemessungen nachgewiesen werden kann. Auf der untersuchten Silikonharzfarbe bleiben die Regentropfen auf der Fassadenoberfläche und trocknen über einen Zeitraum von 3 Stunden langsam ab. Bei der Farbe mit Abperleffekt rollen die Regentropfen ab und die Oberfläche ist bereits kurz nach Regenende nahezu trocken. Nach nächtlicher Betauung liegen umgekehrte Verhältnisse vor. Weil Tautropfen wesentlich kleiner als Regentropfen sind, kommt der Abperleffekt nicht zum Tragen und das Tauwasser bleibt auf der Fassade. Da auf der Farbe mit Abperleffekt aufgrund der extremen Hydrophobie auf der Oberfläche höhere Tauwassermengen verbleiben als auf der normalen Silikonharzfarbe, dauert es länger bis die Flächen abtrocknen. Im Gegensatz zu Ernsthofen zeichnet sich das Klima in Holzkirchen durch eine hohe Schlagregenbelastung aus, sodass hier der Abperleffekt positiv zum Tragen kommt, während in Ernsthofen der negative Einfluss der extremen Hydrophobie überwiegt.

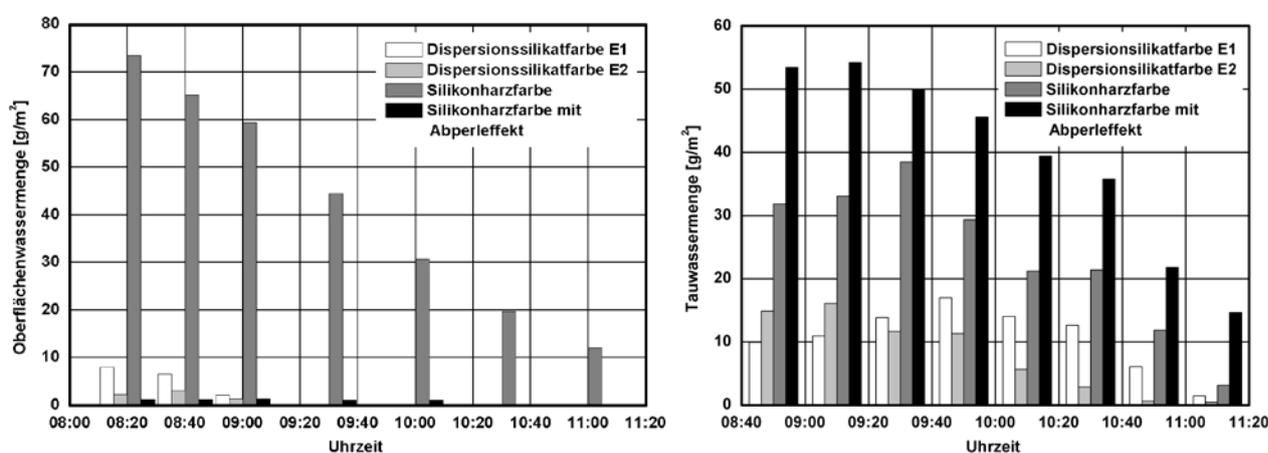


Abbildung 29: Oberflächenfeuchte und Abtrocknungsverhalten von Wandflächen mit verschiedenen Beschichtungen nach Regen (links) und nach Betauung (rechts).

Um direkt den Einfluss der hygrischen Eigenschaften auf die Oberflächenfeuchte zu untersuchen, wurde auf einer nach Norden ausgerichteten Versuchswand ein WDV-System mit verschiedenen Putz-/Anstrichsystemen versehen (in Abb. 22 oben rechts gezeigte Fassade). Die Beschichtungssysteme unterscheiden sich vor allem in ihrer Hydrophobie. Bei System C handelt es sich um ein Silikonharzputzsystem mit Silikonharzfassadenfarbe, das eine hohe

Hydrophobie aufweist. Die drei anderen Systeme (A, B, D) bestehen aus unterschiedlichen mineralischen Putzen mit einem hydrophilen Anstrich. Bei allen vier Systemen liegen, wie Abbildung 30 am Beispiel einer klaren Nacht im September zeigt in Bezug auf die Oberflächentemperatur und damit auf die Betauungssituation die gleichen Randbedingungen vor.

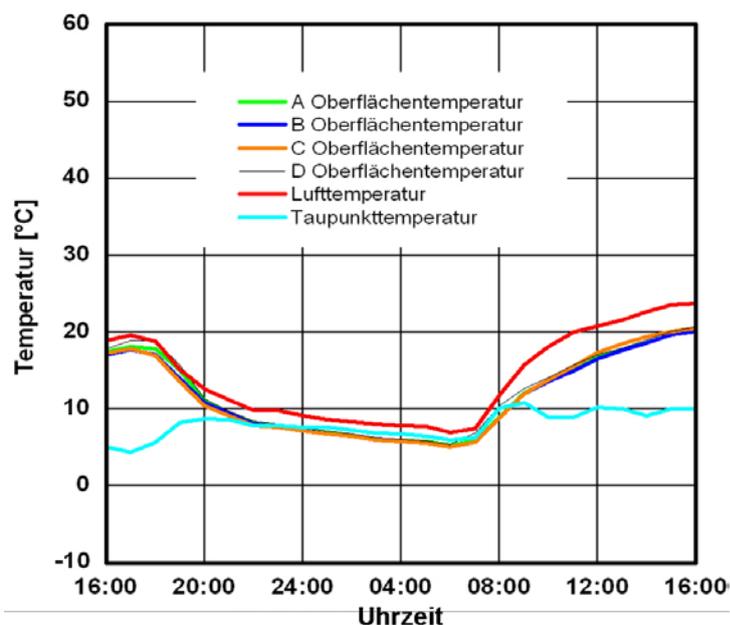


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperatur von einer nach Norden orientierten Versuchsfassade mit WDVS und vier verschiedenen Beschichtungssystemen.

Die Ergebnisse einer Oberflächenfeuchtebestimmung an dieser Versuchswand sind beispielhaft in Abbildung 31 dargestellt. Auf dem Beschichtungssystem C, dem Silikonharzputz mit Silikonharzfarbe, werden mit 60 g/m^2 relativ hohe Oberflächenfeuchten festgestellt, die im Zeitraum von 2,5 Stunden auf etwa 40 g/m^2 abnehmen. Die Systeme A, B und D weisen dagegen nur sehr geringe Oberflächenfeuchten auf und unterscheiden sich untereinander kaum. Während der Untersuchungsperiode von mehr als 2 Jahren konnten an den drei „hydrophilen“ Systemen nie merkliche Mengen an Oberflächenfeuchte abgetupft werden.

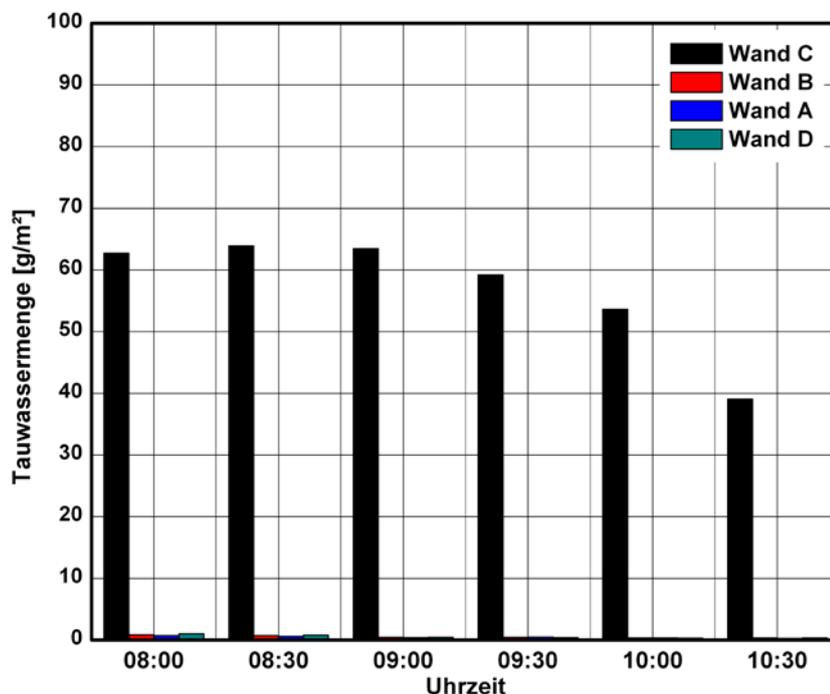


Abbildung 31: Gemessene Oberflächenfeuchte an einer nordorientierten Versuchswand an einem Morgen im September (mineralischer Putz mit Silikatfarbe (A), mit hydrophilem Anstrich (B + D) und Silikonharzsystem (C)).

Für die Untersuchung des Einflusses eines Anstrichs auf die Oberflächenfeuchte wurden auf ein bestehendes WDVS mit einem Silikonharzputzsystem, das sich durch eine hohe Hydrophobie auszeichnet, 10 verschiedene Anstriche aufgebracht (Abbildung 32) und die Oberflächenfeuchten zu verschiedenen Zeitpunkten nach nächtlicher Betauung bestimmt. Dabei konnten abhängig vom Farbtyp deutliche Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 33). Die höchsten Oberflächenfeuchten treten auf den untersuchten Silikonharzfarben auf. Die Oberflächenfeuchten auf den Dispersionsfarben mit unterschiedlichem Wasseraufnahmekoeffizient korrelieren zu diesen. Auf der untersuchten Dispersionsilikatfarbe konnte im Untersuchungszeitraum an keinem der Beprobungszeitpunkte überhaupt Oberflächenfeuchte festgestellt werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bereits durch die Verwendung eines geeigneten Anstrichs die auftretende Oberflächenfeuchte deutlich reduziert werden kann. Im Laufe der Bewitterung konnte allerdings eine Änderung der auftretenden Feuchtemenge bei einzelnen Anstrichen festgestellt werden, die auf eine Ausbildung der Hydrophobie der Beschichtung durch die Bewitterung zurückzuführen ist. Ein Effekt, häufig beobachtet wird und z.B. in (Künzel, H.M. 2011) dokumentiert ist.

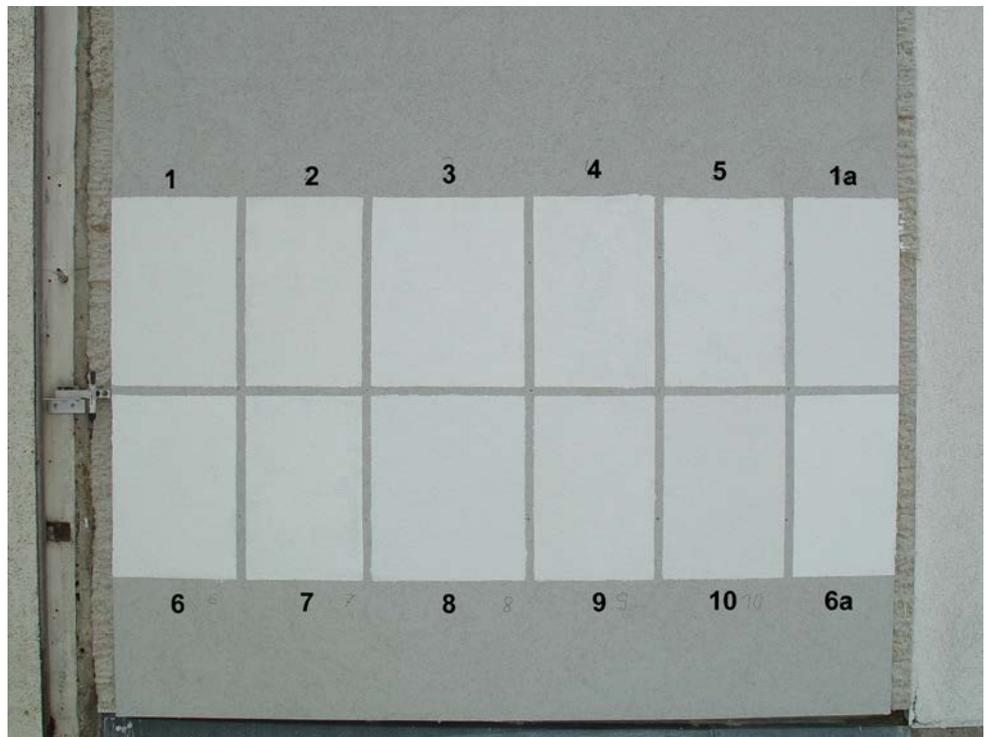


Abbildung 32: Versuchswand mit verschiedenen Anstrichen auf einem hydrophoben Wärmedämmverbundsystem auf Silikonharzbasis. Die aufgetragenen Anstriche unterscheiden sich im Bindemittel und in den hydrophoben Eigenschaften.

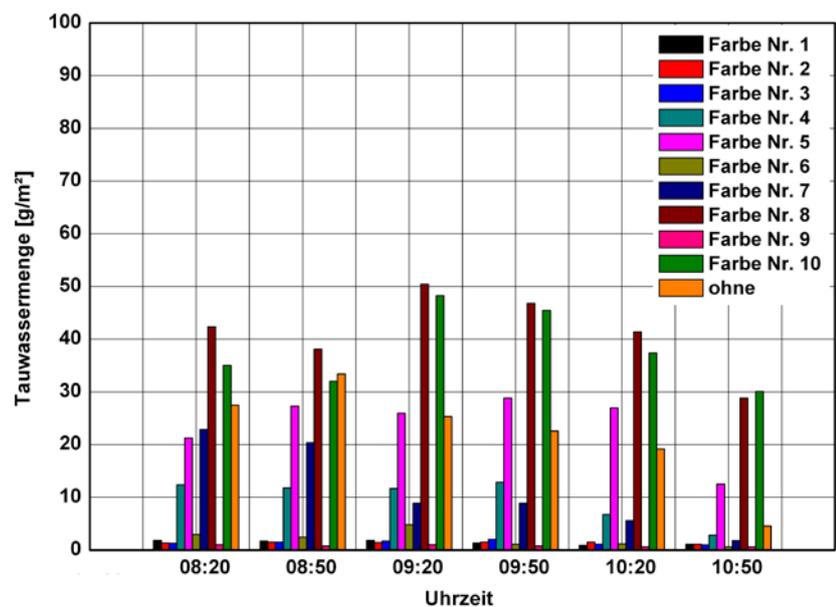


Abbildung 33: Gemessene Oberflächenfeuchten an den Versuchsfächen.

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Anstrichen ist aufgrund deren geringen Schichtdicken begrenzt, sodass nach erfolgter Sättigung noch genügend Oberflächenfeuchte vorhanden sein kann, um einen Aufwuchs zu ermöglichen. Außerdem ist noch nicht ausreichend geklärt, ob das in dem Anstrich befindliche Wasser ausreichend weit von der Oberfläche entfernt ist, um die Wachstumsbedingungen maßgeblich zu verschlechtern. Die später an diesen Musterflächen vorgefundenen Befallsmuster korrelieren wahrscheinlich deshalb nicht in allen Fällen mit den gemessenen Oberflächenfeuchten. Wahrscheinlich ist neben einem „hydrophilen“ Anstrich auch eine gewisse Saugfähigkeit des Untergrundes erforderlich, um auf diesem Weg das Bewuchsrisko zu reduzieren.

5. Weiterführende Untersuchungen

Die Freilanduntersuchungen zum PCM haben gezeigt, dass die üblichen langfristigen Berechnungen, bei denen Standardklimajahre wiederholt werden, hier nicht zu einem repräsentativen Ergebnis führen. Dies ist in der starken Sensibilität der Ergebnisse auf die jahresweise wechselnden Klimabedingungen begründet. Dies bedeutet, dass zum Einen eine weitere Optimierung des PCM-Einsatzes erforderlich ist und zum Anderen, dass bei den Berechnungen dieses besondere Verhalten berücksichtigt werden muss. Für diesen Zweck wurde ein Klimafile aus zehn gemessenen Holzkirchner Klimajahren entwickelt und damit die folgend dargestellten Berechnungen durchgeführt.

Bei den Berechnungen wird der Schmelzpunkt des PCM variiert bzw. ein größerer Schmelzbereich angesetzt. Für die Untersuchungen wurde eine 8 mm dicke Putzschicht mit 10 M.-% (Abbildung 34) und 20 M.-% (Abbildung 35) zugrunde gelegt, sowie eine 15 mm dicke Schicht mit 20 M.-% (Abbildung 36).

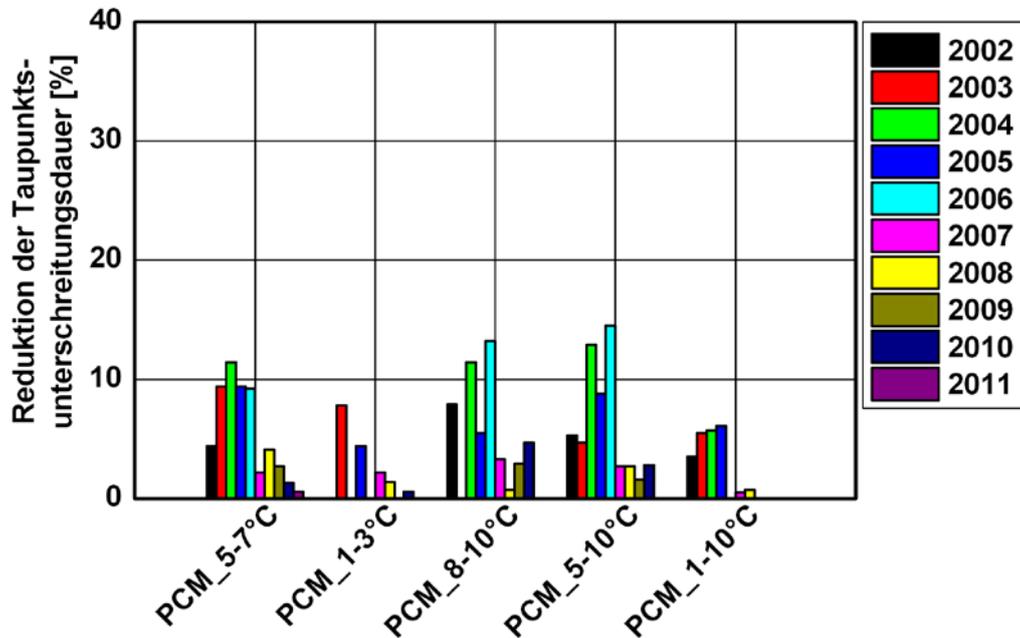


Abbildung 34: Für zehn aufeinander folgende in Holzkirchen gemessene Klimajahre berechnete Reduktion der Taupunkttemperaturunterschreitungen einer WDVS-Fassade bei Variation der Schmelzpunkte bzw. Schmelzbereichs des PCM. Ergebnisse für eine 8 mm dicke Putzschicht mit 10 M.-% PCM.

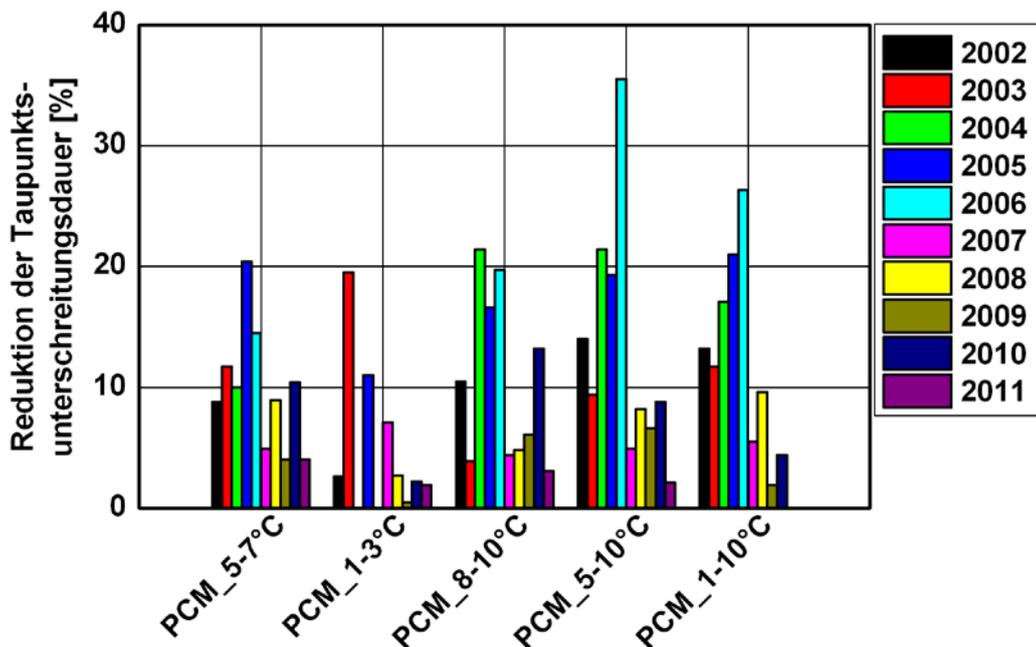


Abbildung 35: Für zehn aufeinander folgende in Holzkirchen gemessene Klimajahre berechnete Reduktion der Taupunkttemperaturunterschreitungen einer WDVS-Fassade bei Variation der Schmelzpunkte bzw. Schmelzbereichs des PCM. Ergebnisse für eine 8 mm dicke Putzschicht mit 20 M.-% PCM.

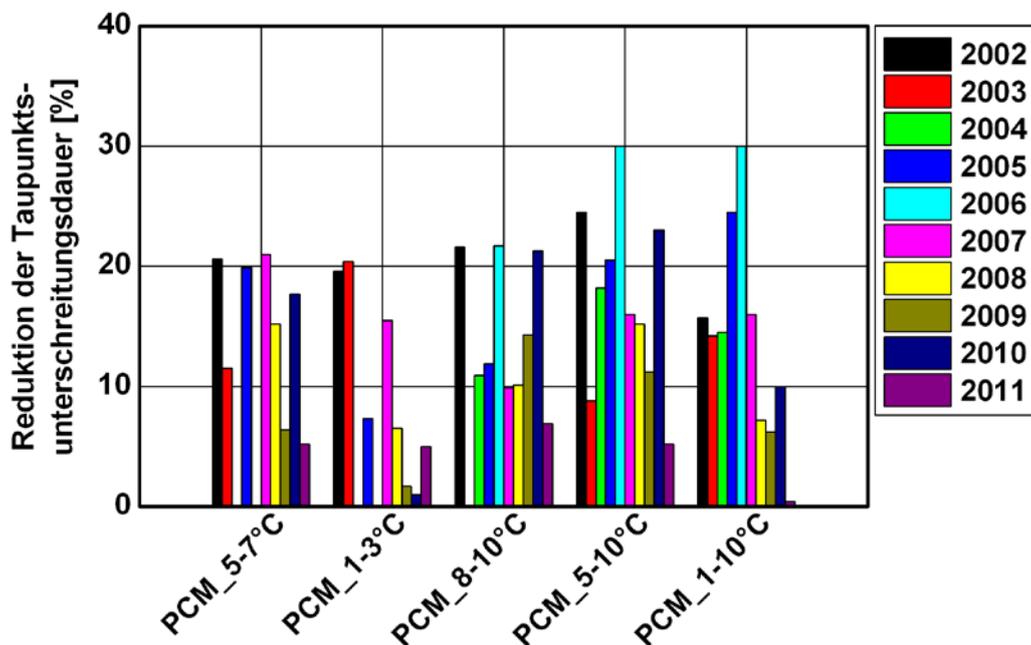


Abbildung 36: Für zehn aufeinander folgende in Holzkirchen gemessene Klimajahre berechnete Reduktion der Taupunkttemperaturunterschreitungen einer WDVS-Fassade bei Variation der Schmelzpunkte bzw. Schmelzbereichs des PCM. Ergebnisse für eine 15 mm dicke Putzschicht mit 20 M.-% PCM.

Die Abhängigkeit des Ergebnisses vom gewählten Klimajahr ist deutlich zu erkennen. Eine Beimengung von 10 M.-% bei 8 mm dicker Schicht ist nicht ausreichend, um wenigstens gelegentlich mehr als 10 % Reduktion der Betauung zu erreichen. Mit der Verdopplung der Menge werden dagegen immer wieder 20 % überschritten. Eine weitere Erhöhung der Menge bringt erwartungsgemäß noch bessere Ergebnisse. Vergleicht man die berechneten Ergebnisse mit der in der jeweiligen Herbstperiode vorliegenden mittleren Taupunkttemperatur (Tabelle 3), wird ersichtlich, warum in Abhängigkeit vom gewählten Schmelzbereich in manchen Jahren kaum oder gar keine Wirkung erzielt wird.

Tabelle 3: Mittlere Taupunkttemperaturen der Herbstperiode des jeweiligen Jahres.

Jahr	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2007	2009	2010	2011
Mittlere Taupunkttemperatur	6,5	5,1	8,4	8,1	9,4	6,3	6,5	8,5	6,8	8,5

4 ZUSAMMENFASSUNG

Vor allen bei Neubauten hat sich in den letzten Jahrzehnten das Dämmniveau deutlich erhöht. Die Verbesserung des Wärmedämmstandards führt zu einem deutlich höheren Risiko eines Befalls der Außenfassade mit Schwärzepilzen oder Algen. Das wesentlichste Kriterium für das Risiko eines mikrobiellen Bewuchses an Fassaden ist die Verfügbarkeit ausreichender Mengen an Feuchtigkeit. Dabei kommt der nächtlichen Betauung besondere Bedeutung zu, da nur mit ihr das vermehrte Auftreten des Bewuchses auf der schlagregenarmen Nordseite zu erklären ist. Um das Risiko eines mikrobiellen Wachstums abzuschätzen, ist die durch die langwellige Abstrahlung hervorgerufene Betauung auf der Oberfläche deshalb ein gutes Kriterium. Im direkten Vergleich zu monolithischen Wänden, z.B. aus Porenbeton oder Ziegeln, sind Wände mit WDVS gefährdeter. Aber für die wärmetechnische Verbesserung von bestehenden Gebäuden ist in den meisten Fällen die Verwendung von WDVS am praktikabelsten. Deshalb werden für diese Systeme Lösungen gegen mikrobiellen Befall angestrebt. Dazu wurden rechnerische Untersuchungen und Messungen im Freilandversuch durchgeführt. Bei der Betrachtung des Problems von unerwünschtem Aufwuchs an Fassaden muss beachtet werden, dass die meisten ausgeführten WDVS ohne Schäden sind. Nur ein geringer Prozentsatz weist einen zu beanstandenden mikrobiellen Bewuchs auf. Aus diesem Grund und weil Berechnungen zeigen, dass die meist unbelasteten Ost- und Südfassaden eine um ca. 20 % niedrigere Betauungsdauer aufweisen, gehen die Autoren davon aus, dass bereits eine Verringerung des Tauwasseranfalls um 25 % die meisten Probleme vermeiden könnte. Es wird aber immer auch spezielle Situationen geben, zum Beispiel eine verschattete Wand in Wald- und Gewässernähe, bei denen die Anwendung von bioziden Wirkstoffen unvermeidlich ist.

Ein geeignetes Kriterium, um die Wirksamkeit bauphysikalischer Maßnahmen in Bezug auf das Wachstumsrisiko zu bewerten, ist die Dauer der Betauung und die Intensität der Taupunkttemperaturunterschreitung. Aus bauphysikalischer Sicht gibt es zwei ganz unterschiedliche Möglichkeiten zur Beeinflussung des für den mikrobiellen Bewuchs besonders wesentlichen Feuchtehaushalts (oder Mikroklimas) an der Außenoberfläche eines WDV-Systems, nämlich die Optimierung der thermischen oder der hygri-schen Materialeigenschaften. Mit einer Erhöhung des oberflächennahen Wärmespeichervermögens kann die tägliche solare Erwärmung des Bauteils und somit die gespeicherte Energie genutzt werden, um eine nächtliche Temperaturabsenkung unter die Taupunkttemperatur weitgehend zu vermeiden. Zusätzlich kann durch eine Farbgebung mit höherer kurzwelliger Absorption die tägliche Erwärmung der Fassade gesteigert werden. Der nächtliche Temperaturabfall kann

auch durch eine Beschichtung mit abgesenkter langwelliger Emission (Low-E-Anstriche) deutlich vermindert werden. Mit sogenannten IR-aktiven Farben kann der Emissionsgrad für langwellige Strahlung von über 90 % auf etwa 60 % gesenkt werden. Die verminderte thermische Abstrahlung führt tagsüber zu höheren Maximaltemperaturen, nachts führt sie zu verminderter Unterschreitung der Taupunkttemperatur. Allerdings sind derzeit noch keine ausreichend witterungsstabilen IR-Anstriche verfügbar. Eine Weiterentwicklung der IR-Farbe wäre aber sehr wünschenswert, da deren Anwendung die am einfachsten auch im Baubestand durchführbare Maßnahme darstellen würde.

Ein anderer Weg die nächtliche Betauung zu reduzieren, ist der Einsatz von PCM-Materialien im Außenputz oder oberflächennah darunter. Dazu sind z.B. Paraffine geeignet, die mit unterschiedlichen Schmelzpunkten zur Verfügung stehen. Wesentlich für die Verminderung der Taupunktunterschreitung durch Einsatz von PCM ist die Optimierung des Temperaturbereichs für den Phasenwechsel. Darin liegt aber das Problem bei dessen Anwendung. Die Optimierung des Phasenwechselpunktes kann unter Verwendung von Testreferenzjahren rechnerisch erfolgen. Allerdings sind die Unterschiede der klimatischen Bedingungen aufeinander folgender Jahre so groß, dass auch ein derart optimiertes PCM nicht durchgängig zur Wirkung kommt. Dieses Beispiel zeigt aber auch, dass eine alleinige rechnerische Betrachtung trotz korrekter Rechenergebnisse nicht immer die Praxisrealität wiedergibt, da zum Teil Einflussgrößen übersehen werden, die nur ein – in diesem Fall allerdings mehrjähriger – Freilandtest zu Tage bringt. Um trotzdem über rechnerische Untersuchungen eine realistische Aussage über die Wirksamkeit des PCM's auch bei in der Praxis auftretenden Jahresschwankungen zu erhalten, wurde ein Klimafile aus zehn aufeinander folgenden gemessenen Holzkirchner Klimajahren entwickelt und damit die Berechnungen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass bei ausreichend großer Menge an PCM, mit einem durch Mischen verschiedener Paraffine breitem Schmelzbereich, eine Reduktion der Betauungszeiten erreicht werden kann, die immer wieder 20 % überschreitet, aber im Jahreswechsel variiert. Bedenkt man, dass der Aufwuchs von Algen meist mehrjährige Perioden erfordert, kann der Einsatz von PCM, trotz immer wieder auftretender Perioden geringerer Wirksamkeit, ein Mittel zur Vermeidung mikrobiellen Bewuchses darstellen.

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 physika-

lischen 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 weit reichende Reduzierung biologischer Besiedelungen erbringen. Bei der Betrachtung muss 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 dieses ist in der Anfangsphase der Bewuchsentwicklung für die Mikroorganismen verfügbar. Eine gewisse Saugfähigkeit des Untergrundes kann deshalb mikrobiellen Bewuchs verhindern helfen, indem das anfallende Tauwasser von der Oberfläche in größere Bauteiltiefen abgeleitet wird und damit Mikroorganismen nicht mehr zur Verfügung steht. Die Untersuchungen zeigen, dass auf stark hydrophoben Untergründen die Tauwassertropfen auf der Fassadenoberfläche bleiben und über einen langen Zeitraum nur langsam abtrocknen. Feuchte aufnehmende Untergründe bieten in dieser Beziehung bemerkenswerte Vorteile. Z.B. konnte an den nicht ganz so hydrophoben Fassadenoberflächen, die auf der Nordseite eines Gebäudes im Freigelände appliziert wurden, zu keinem Zeitpunkt Oberflächenfeuchte abgetupft werden. Dabei muss betont werden, dass diese Systeme immer noch einen sehr niedrigen Wasseraufnahmekoeffizient von 0,1 bis 0,2 kg/m²√h aufweisen. Sie gelten somit immer noch als wasserabweisend! Diese positiven Ergebnisse führten dazu, dass inzwischen zahlreiche sogenannte „hydrophile“ WDV-Systeme für den europäischen Markt entwickelt worden und im Einsatz sind.

REFERENCES

Blaich, J. 1999. *Außenwände mit Wärmedämm-Verbundsystem, Algen- und Pilzbewuchs*. Deutsches Architektenblatt 31, H.10, S.1393 - 1394.

Bagda, E.: *Algen und Pilze. Ausbau und Fassade* 4 (2002), H. S. 42-43.

Denffer von, D., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. & Bresinsky, A. 1983. *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.

Hofbauer, W., Breuer, K. & Sedlbauer, K. 2003. *Was wächst auf unseren Fassaden?* Teil I: Algen, Flechten, Moose, Farne. Bauphysik, H. 6.

Hofbauer, W.; Fitz, C.; Krus, M.; Sedlbauer, K.; Breuer, K. 2006. *Prognoseverfahren zum biologischen Befall durch Algen, Pilze und Flechten an Bauteiloberflächen auf Basis bauphysikalischer und mikrobieller Untersuchungen* Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik –IBP-, Holzkirchen; Bauforschung für die Praxis Band 77 (2006). IRB-Verlag. ISBN 978-3-8167-7102-9.

Krus, M. & Sedlbauer, K. 2003. *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.

Krus, M. & Rösler, D. 2006. *New model for the hygrothermal calculation of condensate on the external building surface*. Third International Building Physics Conference in Montreal.

Krus, M.; Fitz, C. 2007 *Vergleich unterschiedlicher Messverfahren zur Erfassung der Oberflächenfeuchte von Putzfassaden..* Berichtsband zum Workshop 2007 Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, S. 119-126. Aedificatio-Verlag. ISBN 978-3-931681-91-3.

Künzel H.M. (1994). *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. PhD Thesis, University of Stuttgart.

Künzel, H. M., Schmidt, Th. & Holm, A. 2002. *Exterior Surface Temperature of Different Wall Constructions – Comparison of Numerical Simulation and Experiment*. 11. Bauphysikalisches Symposium, Dresden.

Künzel, H.M.; Fitz, C.; Krus, M.: *Feuchteschutz verschiedener Fassadensysteme*. Fassadensanierung, Hrsg. Venzmer, H., Fraunhofer - Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich, S. 29-52, 2011, ISBN 978-3-410-20630-9-

Scherer, S. 1993. *Anpassungen von Cyanobakterien in Wüsten*. In: Hausmann, K. & Kremer, B. P.: *Extremophile: Mikroorganismen in ausgefallenen Lebensräumen*. VCH. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo, S. 179-193.

Sedlbauer, K. 2001. *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Thesis, University of Stuttgart.

Venzmer, H. 2001. *Grüne Fassaden nach der Instandsetzung durch WDVS? Nicht bestellt und dennoch frei Haus*. 3. Dahlberg-Kolloquium.