

Mikrobieller Bewuchs an und in Gebäuden verursacht durch Energieeinsparmaßnahmen?

Krus, M.; Sedlbauer, K.; Fitz, C.; Rösler, D.

1 Einleitung

Schimmelpilzbefall, insbesondere an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen hat, in letzter Zeit wieder vermehrt von sich reden gemacht. Ob nun tatsächlich die Fälle mit Schimmelpilzen zugenommen haben, obwohl nachweislich in den letzten Jahren der Dämmstandard in unseren Gebäuden besser wurde, oder ob sich eine zunehmende Sensibilisierung oder Allergisierung in der Bevölkerung bemerkbar macht, kann derzeit nicht eindeutig geklärt werden. Vereinzelt wird in Veröffentlichungen sogar behauptet, dass gerade aufgrund der zunehmenden Dämmungen die Gefahr von Schimmelpilzen in Innenräumen steigen würde. Die vorliegende Ausarbeitung setzt sich mit dieser Fragestellung auseinander und zeigt, ob Energieeinsparmaßnahmen eine Gefährdung durch Schimmelpilzwachstum mit sich bringen.

Die Verbesserungen des Wärmeschutzes zur Energieeinsparung in den letzten Jahrzehnten haben zu einer Erhöhung der Wärmedämmung von Außenbauteilen geführt. Bauphysikalisch betrachtet steigt durch diese Maßnahmen die Wahrscheinlichkeit, dass sich auf der Außenoberfläche der Fassade höhere Oberflächenfeuchten bis hin zu Tauwasser bilden können. Die Folge davon ist, dass die Feuchte als wichtigste Grundlage für mikrobielles Wachstum auf der Wand in zunehmendem Maße gegeben ist [1; 2; 4]. Davon sind besonders Wärmedämmverbundsysteme betroffen, da bei ihnen im Gegensatz zu monolithischen Konstruktionen nur eine geringe thermische Speicherfähigkeit vorliegt. Von der tagsüber auf die Oberfläche eingestrahlten Energie kann nur wenig gespeichert werden, sodass die nächtliche langwellige Abstrahlung häufig zu einer Absenkung der Oberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur der Außenluft führt.

Aufgrund der zeitlich begrenzten Wirksamkeit einer bioziden Ausrüstung und aus Umweltschutzgründen wird nach Wegen gesucht, das mikrobielle Wachstum möglichst mit bauphysikalischen Mitteln zu begrenzen. Zu diesem Zweck werden im Freilandversuchsgelände umfangreiche Messungen an Fassadenoberflächen durchgeführt. Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe von Berechnungen mit dem Programm WUFI® [3] nach deren Validierung schnell und kostengünstig zahlreiche weitere Varianten beurteilen, um unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Orientierung oder Dämmschichtdicke, in ihrer Wirkungsweise abzuschätzen. Am Fraunhofer Institut für Bauphysik wurden dazu umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die ausführlich in [4] beschrieben sind.

2 Schimmelpilzwachstum im Innenraum

Schimmelpilzbefall an Innenoberflächen von Außenbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen, ist ein Thema, das immer wieder intensiv diskutiert wird. Bild 1 links zeigt einen typischen Schimmelpilzschaden in der Raumecke. Die Pilze können zwar bei näherem Hinsehen attraktiv aussehen (Bild 1 rechts), auf Grund der von ihnen eventuell ausgehenden Gesundheitsgefährdung sollte Schimmelpilzwachstum aber vermieden werden.

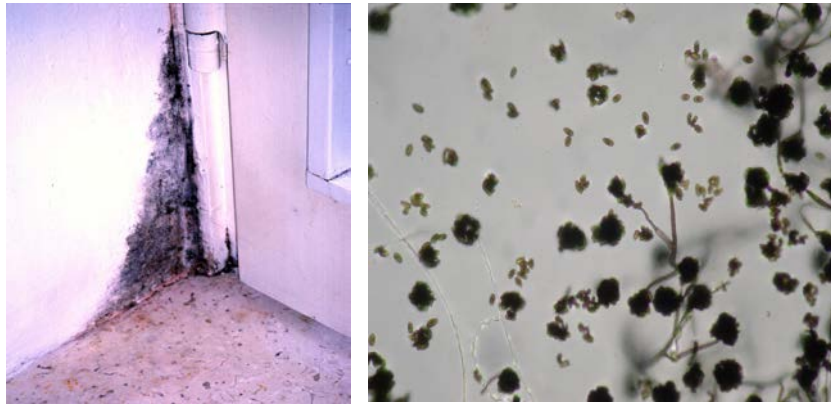


Bild 1 Fotografie eines typischen Schimmelpilzbefalls in einer Raumecke (links) sowie mikroskopische Aufnahme eines Schimmelpilzes (rechts).

Das Auftreten von Schimmelpilzen hängt von der sich einstellenden Oberflächentemperatur sowie –feuchte ab. Diese werden wiederum beeinflusst vom Wärmedurchgangskoeffizienten und den Wärmeübergangswiderständen sowie den im Raum herrschenden hygrothermischen Verhältnissen. Um Pilzbildung erfolgreich zu vermeiden, müssen die Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze bekannt sein. Feuchte spielt dabei bekanntlich eine zentrale Rolle. Im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wurde eine eingehende Recherche durchgeführt und darüber hinaus ein Verfahren entwickelt, das die Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf Basis der biologischen Wachstumsvoraussetzungen bei instationären Randbedingungen ermöglicht [5]. Es beschreibt die Zusammenhänge zwischen der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Art des Substrates (Baustoffuntergrund), die für einen Einsatz von Schimmelpilzbildung und für das weitere Wachstum verantwortlich sind, auf der Basis sog. Isolethensysteme. Wie Bild 2 zeigt, hängt die Wachstumsgrenze für Schimmelpilze außer von der Temperatur und der relativen Feuchte stark vom Nährboden ab. Letztgenannte Einflussgröße wird in die folgenden Substratgruppen eingeteilt:

Substratgruppe 0:

Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien); das dafür gültige Isolethensystem gibt die minimalen Wachstumsvoraussetzungen an, also auch die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Es bildet für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die unterste Wachstumsgrenze.

Substratgruppe I:

Biologisch gut verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material; die unteren Grenzkurven im Isolethensystem (LIMBau I;) zeigen erhöhten Feuchtebedarf.

Substratgruppe II:

Biologisch kaum verwertbare Substrate, wie z.B. mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge (Putze etc., manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen; die unteren Grenzkurven im Isolethensystem (LIMBau II;) zeigen weiter erhöhten Feuchtebedarf.

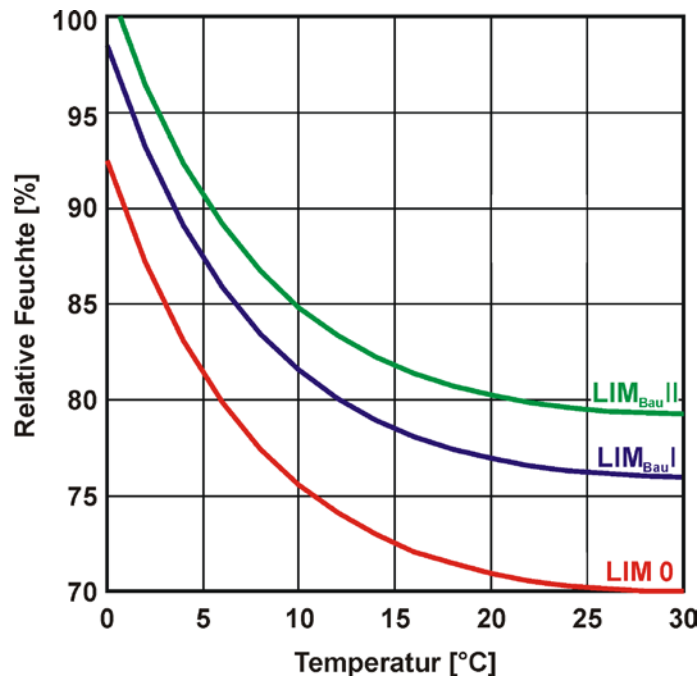


Bild 2 Untere Grenzen für Schimmelpilzwachstum (**LIM** Lowest Isopleth for **Mold**) für die beschriebenen Substratgruppen 0, I und II.

Im Folgenden werden die Einflüsse unterschiedlicher Maßnahmen auf die Oberflächentemperatur sowie –feuchte bzw. die raumklimatischen Bedingungen aufgezeigt und in Verbindung gesetzt mit dem Schimmelpilzrisiko.

2.1 Erhöhung des Dämmniveaus

Das Dämmniveau, das mit Hilfe des U-Wertes charakterisiert wird, beeinflusst maßgeblich die Oberflächentemperatur an der Innenwand und damit die dort vorliegende relative Luftfeuchte. Wärmebrücken sind dabei örtlich begrenzte Stellen in den Umfassungsflächen eines Gebäudes, durch die nach außen ein größerer Wärmeabfluss als in den angrenzenden Bereichen stattfindet. Sie können durch die geometrischen Verhältnisse bedingt sein (z.B. Ecken) oder durch die Aneinanderreihung von Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Tragpfeiler in einer Wand). Die Folgen von Wärmebrücken sind (neben den höheren Energieverlusten) ein Absinken der Temperatur, eine Erhöhung der Feuchte an der Innenoberfläche und damit die Gefahr einer Schimmelpilzbildung.

Möbel, Gardinen und dergleichen stellen kaum einen Widerstand für die Feuchte dar. Sie verringern aber den konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergang. Dadurch erhöht sich der Wärmeübergangswiderstand. Dieser bewirkt eine niedrigere Oberflächentemperatur an der Wand hinter dem Möbel und damit eine höhere relative Feuchte. In Bild 3 sind die Oberflächentemperaturen einer Außenwanddecke mit gutem bzw. Mindestwärmeschutz dargestellt (stationäre Betrachtung). Bei einem gut gedämmten Gebäude sind bei 20 °C und 50 % relativer Raumluftfeuchte die Bedingungen für Schimmelpilzbildung selbst in der Ecke hinter einem Schrank nicht gegeben. Wird jedoch unzureichend gelüftet, so kann eine relative Raumluftfeuchte von 60 % im Raum entstehen. Dies stellt eine kritische Randbedingung dar. In der Ecke hinter dem Schrank kann es zu Schimmelpilzwachstum kommen. Bei Mindestwärmeschutz und einer relativen Raumluftfeuchte von 50 % treten hinter dem Schrank und in der freien Raumecke Feuchten

auf, bei denen bereits Schimmelpilzwachstum einsetzen kann. In der Ecke hinter dem Schrank fällt sogar Tauwasser aus.

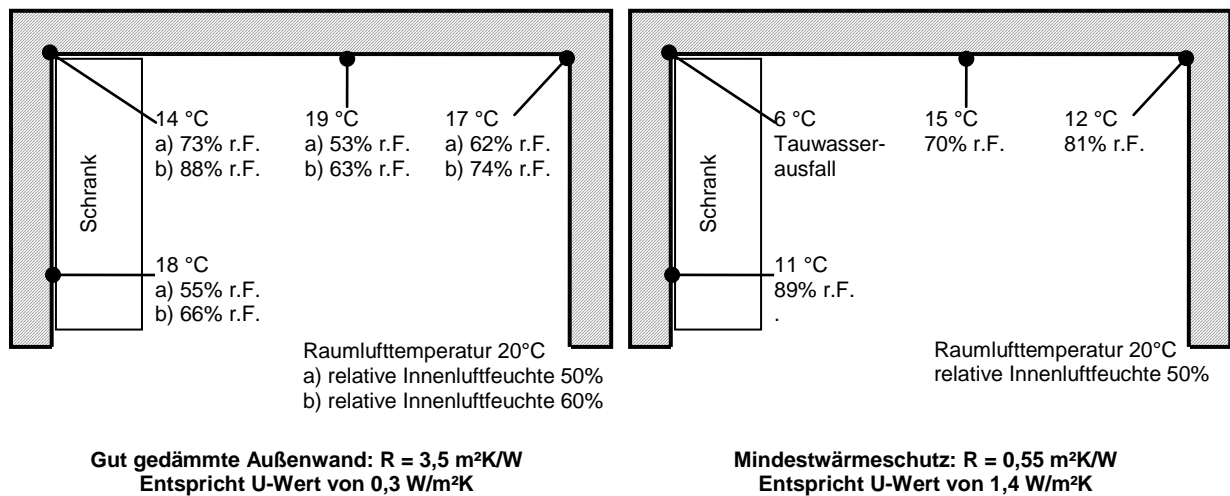


Bild 3 Schematische Darstellung der Temperatur- und Feuchteverteilung an Außenwänden eines Wohnraumes bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten in der Raumlufte, bei einer Außentemperatur von -5 °C und einer Raumlufte von 20 °C. Links eine gut wärmedämmte Außenwand; rechts eine Außenwand mit Mindestwärmeschutz.

Die Verbesserung des Wärmedämmstandards führt zu einer Erhöhung der Innenoberflächentemperaturen und damit zu einer Reduzierung der Gefahr eines Schimmelpilzwachstums. Bei Innendämmung gilt diese Aussage allerdings nur bei bauphysikalisch korrekter Ausführung. Eine nachträgliche Innendämmung führt bei niedrigen Außentemperaturen zu einer Absenkung der Temperatur der Außenwand. Durch die Dämm-Maßnahme kann deshalb die Temperatur hinter der Dämmung unter den Taupunkt der Raumlufte sinken. Wasserdampfdiffusion oder Luftkonvektion aus dem Wohnraum führen dann zu einer Feuchteerhöhung in diesem Bereich. Um Luftkonvektion zu verhindern, muss der gesamte Wandaufbau luftdicht ausgeführt werden. Hohlräume z.B. zwischen Innendämmung und Außenwand oder Fehlstellen im Dämmbereich sind unbedingt zu vermeiden. Aufgrund der häufig vorhandenen Unebenheiten von Außenwänden im Altbau sind Dämmstoffe, die sich dem Untergrund anpassen können, wie z.B. Dämmputze oder Faserdämmstoffe, günstig. Auch Innendämmungen aus Leichtlehm sind anwendbar, solange kein zu hoher Feuchteeintrag während der Applikationsphase damit verbunden ist. Starre Dämmplatten hingegen können Hohlräume bilden, deren dauerhafte Abdichtung besondere Sorgfalt erfordert. In ungünstigen Fällen kann in diesen Hohlräumen auch Schimmelpilzwachstum, wie in Bild 4 zu sehen, stattfinden.



Bild 4 Stockflecken über dem Fenstersturz nach Abnahme einer punktwise verklebten Innendämmung aus gipskartonkaschierten Polystyrol-Hartschaumplatten.

2.2 Abgesenkte Raumlufttemperaturen

Mit abnehmender Raumlufttemperatur nimmt auch die Innenoberflächentemperatur ab. Da die sich einstellenden absoluten Raumluftfeuchten durch die Raumlufttemperatur praktisch nicht beeinflusst werden, führt damit eine geringere Beheizung des Raumes zu einer Erhöhung der Innenoberflächenfeuchten und damit zu einem erhöhten Schimmelpilzwachstumsrisiko. Allgemein ist außerdem zu berücksichtigen, dass das Temperieren von unbeheizten Räumen durch Öffnen der Türe zu beheizten Räumen nicht zweckmäßig ist. Die einströmende Warmluft kann an den Oberflächen des unbeheizten Raumes leicht zu Schimmelproblemen führen. Bild 5 zeigt das Beispiel eines Raumes ohne eigene Beheizung, temperiert durch Öffnen der Tür zum angrenzenden beheizten Wohnzimmer. Deutlich ist zu erkennen, dass das Außenfenster stark beschlagen ist und selbst die Innenwand von Pilzwachstum betroffen ist. Jeder Raum sollte deshalb durch einen eigenen Heizkörper beheizt werden.



Bild 5 Ansicht eines Raumes ohne eigene Beheizung, temperiert durch Öffnen der Tür zum angrenzenden beheizten Wohnzimmer (Foto: D. Pregizer).

Ein häufigeres Problem stellt aber in diesem Zusammenhang der Wunsch nach niedrigeren Temperaturen im Schlafzimmer dar. Bild 6 zeigt diese Situation am Beispiel einer Wohnung mit mittelmäßigem Dämmstandard bei einer Außentemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Unter Zugrundelegung einer

Wohnraumtemperatur von 20 °C und –feuchte von 50 % r.F. ergibt sich stationär betrachtet durch die auf 16 °C abgesenkte Schlafzimmertemperatur dort eine Raumlufttemperatur von 64 % r.F. Zusätzlich erhöhen die entsprechend niedrigeren Oberflächentemperaturen die Oberflächenfeuchten. Dies führt dazu, dass im Gegensatz zum Wohnzimmer in der Zimmerecke Randbedingungen vorliegen, die nur geringfügig unterhalb der Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze liegen. Während im Wohnzimmer die Möblierung an der Außenwand nur in der Ecke zu Problemen führt, ist unter diesen Bedingungen bei jedweder Möblierung der Außenwände Schimmelpilzbildung zu erwarten.

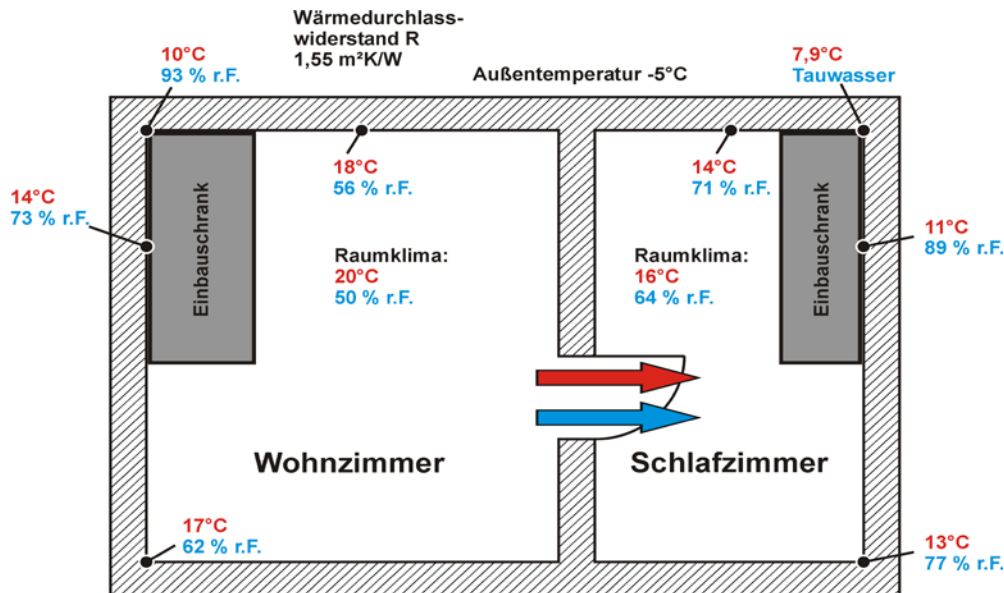


Bild 6 Schematische Darstellung der Temperatur- und Feuchteverteilung an Außenwänden eines Wohnraumes bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten in der Raumluft, bei einer Außentemperatur von -5 °C und einer Raumlufttemperatur von 20 °C im Wohnzimmer und 16 °C im Schlafzimmer.

2.3 Reduzierung der Lüftungswärmeverluste

Durch eine verbesserte Gebäudedichtheit hat der Infiltrationsluftwechsel abgenommen. Während in unsanierten Altbauten der Luftwechsel durch undichte Fenster bei im Mittel ca. 0,5 h⁻¹ lag und damit zumindest annähernd den aus hygienischen Gründen erforderlichen Luftaustausch bewirkte, beträgt dieser bei modernen bzw. energetisch sanierten Gebäuden nur noch etwa 0,1 h⁻¹. Dies bedeutet, dass durch zusätzliche Maßnahmen für eine ausreichende Feuchteabfuhr gesorgt werden muss. Ohne Lüftungsanlagen muss dies durch bewusstes Lüften des Nutzers z.B. als Stoßlüftung durch Öffnen der Fenster erfolgen. Zum Teil fehlt das Bewusstsein für die Erfordernis einer zusätzlichen Belüftung vor allem bei den Nutzern, die in einer Altbauwohnung ohne zusätzliche eigenes Lüften schadensfrei aufgewachsen sind. Bild 7 links zeigt den berechneten Einfluss der Luftwechselrate. Diese wurde dabei, ausgehend von den in der Norm angenommenen 0,5 h⁻¹ bis auf einen Luftwechselwert von 0,2 h⁻¹ herabgesetzt, der aufgrund der dichten Fenster und dem übertriebenen Energiesparwillen oder häufiger Abwesenheit mancher Bewohner in einigen Fällen zumindest zeitweise realistisch sein dürfte. Eine Absenkung des Luftwechsels auf 0,2 h⁻¹ erhöht somit die Raumluftfeuchte in den Wintermonaten um 15 bis 20 % r.F. und damit das Schimmelpilzrisiko deutlich.

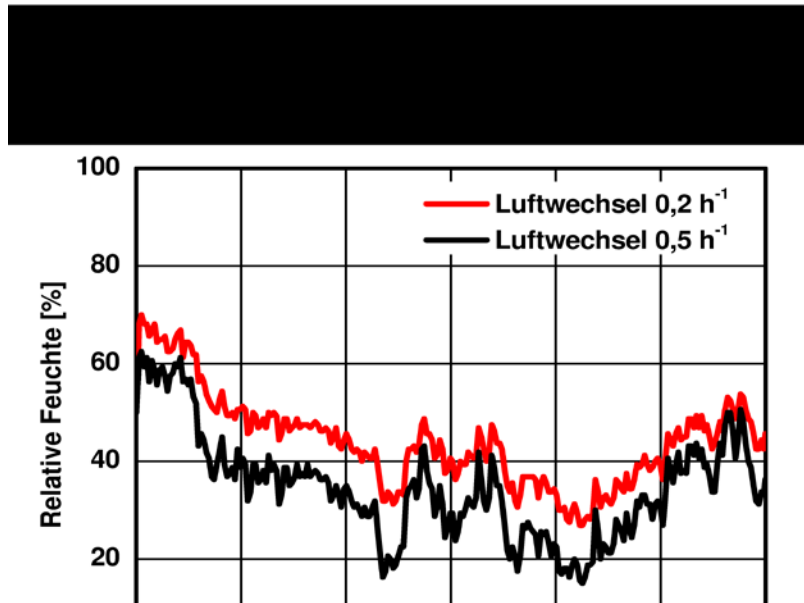


Bild 7 Instationär berechnete typische Raumluftheuchteverläufe bei gemäß Normvorgaben angenommener Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ und abgesenkter Luftwechselrate von $0,2 \text{ h}^{-1}$ (aus [6]).

2.4 Einbau neuer dichter Fenster im Altbau

Bei der energetischen Sanierung eines Altbaus sollte sowohl der Dämmstandard der Außenwände an heutige Erfordernisse angepasst werden als auch die alten undichten Fenster durch neue Fenster mit entsprechend niedrigerem Wärmedurchgangskoeffizienten und besserer Fugendichtheit ersetzt werden. Häufig stehen aber für beide Maßnahmen die erforderlichen finanziellen Mittel nicht zur Verfügung. Bild 8 zeigt die für eine Schimmelpilzvermeidung berechneten erforderlichen Luftwechsel eines Altbaus vor (links) und nach (rechts) Einbau neuer Fenster mit hoher Fugendichtheit. Dabei wurde vor der Sanierung eine Infiltrationsluftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ und danach eine von $0,1 \text{ h}^{-1}$ zugrunde gelegt. Man erkennt, dass der vor der Sanierung vorhandene Infiltrationsluftwechsel nahezu ausreichend war. Ein geringfügig erhöhter konstanter Luftwechsel oder eine kurzfristige morgendliche Stoßlüftung sind zur Schimmelpilzvermeidung ausreichend. Nach Einbau der neuen Fenster muss eine Lüftungsanlage den gleichen konstanten Luftwechsel wie vor der Sanierungsmaßnahme gewährleisten. Da aber in den meisten Fällen die Altbauten über keine Lüftungsanlage verfügen, muss meist der erforderliche Luftwechsel durch Stoßlüftung über die Fenster erfolgen. Hier müssen aufgrund des deutlich reduzierten Infiltrationsluftwechsels mindestens dreimal täglich die Fenster mehr als eine Stunde lang geöffnet werden. In diesem Fall dürften sich die durch den Einbau dichter Fenster erhofften Energieeinsparungen bei Vermeidung von Schimmelbewuchs nicht einstellen. Das bedeutet, dass vor dem Einbau neuer dichter Fenster der Wärmedämmstandard der Wände unbedingt heutigen Anforderungen angepasst werden muss. Gegebenenfalls kann der Einbau der Fenster aus finanziellen Gründen zeitlich nach hinten verschoben werden, nicht aber in umgekehrter Reihenfolge.

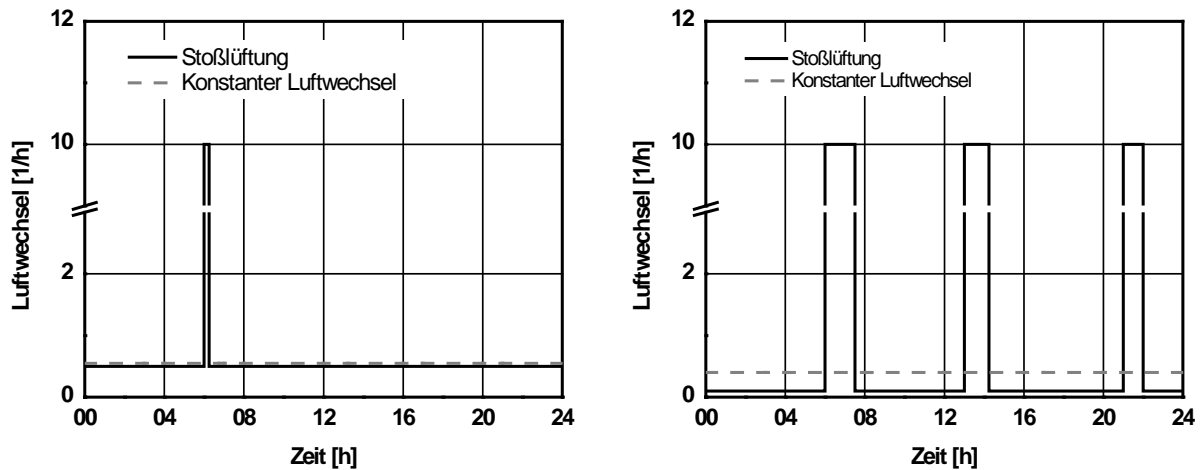


Bild 8 Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer der Altbauwohnung vor (links) und nach Einbau dichter Fenster (rechts) (aus [7]),

3 Mikrobielles Wachstum auf der Fassade (außen)

Die Verbesserung des Wärmeschutzes hat die erwünschte Folge, dass der Wärmeabfluss durch diese Bauteile verringert wird. Bauphysikalisch betrachtet steigt durch diese Maßnahmen die Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit, dass sich auf der Außenoberfläche der Fassade höhere Oberflächenfeuchten bis hin zu Tauwasser bilden können. Die Folge davon ist, dass die Feuchte als wichtigste Grundlage für mikrobielles Wachstum auf der Wand in zunehmendem Maße vorliegt. Die entsprechenden Temperatur- und Feuchteverhältnisse an den Fassadenoberflächen sind ausschlaggebend für das Risiko eines biologischen Aufwuchses. Schimmelpilze benötigen zum Beispiel temperaturabhängig eine gewisse relative Feuchte über einen längeren Zeitraum hinweg für ihr Wachstum [5]. Algen brauchen höhere Feuchten oder sogar freies Wasser. Außerdem können Algen längere Trockenperioden ohne Schaden überstehen, da sie die Lebensfunktionen auf ein Minimum herunterfahren und in eine Art Ruhestadium eintreten, bis sie wieder mit Wasser in Berührung kommen.

Bild 9 zeigt eine typische mit Schimmelpilz- und Algen bewachsene Fassade. Man erkennt oberhalb des gekippten Fensters, dass selbst das Lüftungsverhalten der Bewohner Einfluss auf den mikrobiellen Bewuchs haben kann. Deutlich sichtbar ist hier auch die Wirkung von Wärmebrücken. Die etwas höhere Oberflächentemperatur bewirkt eine Unterbrechung des massiven Schwärzepilzbewuchses oberhalb des Fensters. In der Fläche unterhalb des Fensters sind vorwiegend Algen zu beobachten.

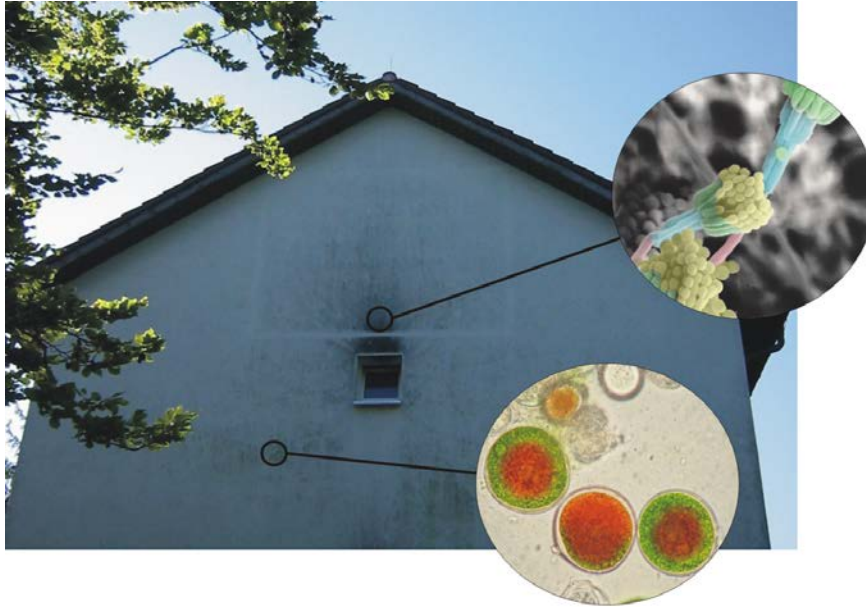


Bild 9 Algenbewuchs einer Fassade mit Wärmedämmverbundsystem und Schimmelpilzbewuchs oberhalb eines Fensters.

Da eine biozide Ausrüstung der Oberflächen aus Umweltschutzgründen und aufgrund deren zeitlich begrenzter Wirksamkeit einen Sonderfall darstellen sollte, wird nach Wegen gesucht, das Algenwachstum möglichst mit bauphysikalischen Mitteln zu unterbinden. Zu diesem Zweck werden im Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) umfangreiche Messungen an Fassadenoberflächen durchgeführt. Allerdings kann nicht die ganze Vielfalt der interessanten Variationen messtechnisch untersucht werden. Mit Hilfe von Berechnungen mit dem zu diesem Zweck modifizierten Berechnungsprogramm WUFI lassen sich nach deren Validierung schnell und kostengünstig zahlreiche weitere Varianten beurteilen, um unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Orientierung, Dämmschichtdicke oder Erhöhung der thermischen Speichermasse durch Nutzung von Latentwärmeeffekten (PCM) in ihrer Wirkungsweise abschätzen.

3.1 Hygrothermische Randbedingungen an der Fassade

Für das Algenwachstum auf Außenfassaden sind die Bedingungen an der Außenoberfläche des Bauteils von entscheidender Bedeutung. Diese werden durch zahlreiche gleichzeitig ablaufende bauphysikalische Vorgänge beeinflusst. In Bild 10 sind die wesentlichen Mechanismen im Überblick dargestellt. Tagsüber verliert die Außenoberfläche über langwellige Abstrahlung, Konvektion und eventuell auch Betauungsenthalpie Energie. Allerdings wird durch solare Einstrahlung eine größere Menge Energie zugeführt mit der Folge, dass sich die Oberfläche erwärmt. Dies bedeutet, dass zum Einen die relative Luftfeuchte an der Oberfläche absinkt und zum Anderen ein Trocknungsvorgang beginnt. Daraus resultiert das dargestellte nach außen abnehmende Feuchteprofil (Bild 10 links). In der Nacht fehlt die solare Einstrahlung, so dass Wärmeverluste überwiegen, mit der Konsequenz einer sinkenden Außenoberflächentemperatur und damit steigender oberflächennaher Luftfeuchten. Sinkt die Oberflächentemperatur soweit unter die Außenlufttemperatur, dass deren Taupunkttemperatur unterschritten wird, kommt es zu einer Befuchtung durch Tauwasseranfall. Solange weitere Kenntnisse über die Wachstumsvoraussetzungen von Algen fehlen, kann die Dauer der Tauwasserbildung und die Stärke der Taupunkttemperaturunterschreitung als gutes Kriterium zur Beurteilung der Ergebnisse und des Bewuchsrisikos herangezogen werden.

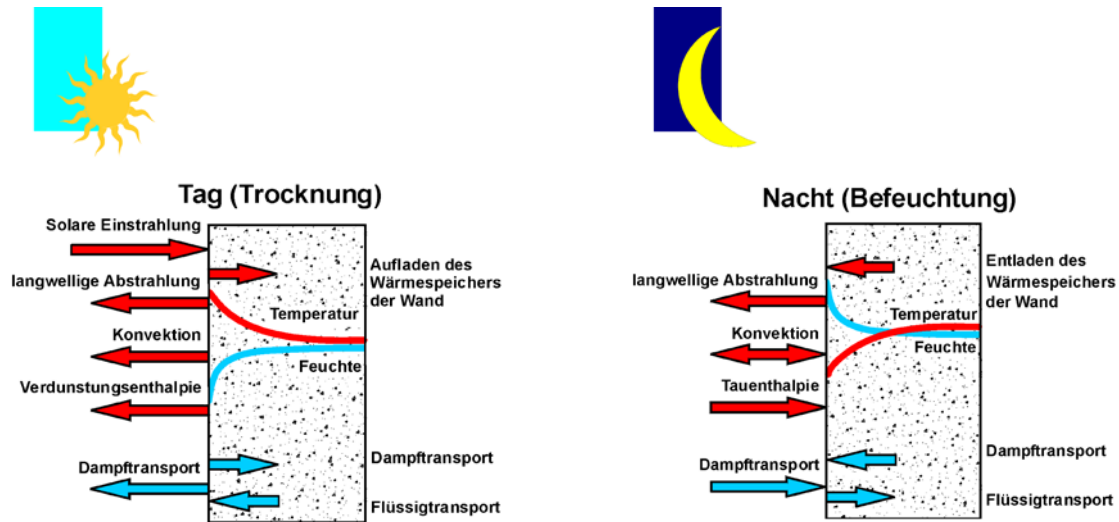


Bild 10 Schematische Darstellung der hygrothermischen Vorgänge an einer gut gedämmten Außenwand während des Tages (links) und der Nacht (rechts).

Für die aufgeführten bauphysikalischen Betrachtungen wird auf das vom IBP entwickelte und vielfach validierte Berechnungsprogramm WUFI [3], zurückgegriffen. Um die berechneten Daten (Oberflächentemperatur und -feuchte) der einzelnen Wandkonstruktionen mit den Messdaten vergleichen zu können, werden für die Berechnungen die zum gleichen Zeitraum erfassten Außenklimarandbedingungen zugrunde gelegt. Es handelt sich somit in allen Fällen um Ergebnisse für das Holzkirchner Klima. Die kritischsten Zeiträume für biologischen Befall der Außenwände sind Herbst und Frühling. Winter und Sommer bieten keine optimalen Klimavoraussetzungen für die Algen [4]. In Bild 11 sind daher die Verläufe der Oberflächentemperaturen in einer Nacht Mitte September an einer monolithischen Wand (links), als Berechnungsbeispiel wurde hier eine Porenbetonwand zugrunde gelegt, und an einem WDV-System (rechts), beide mit vergleichbarem Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$, mit unterschiedlicher Ausrichtung dargestellt.

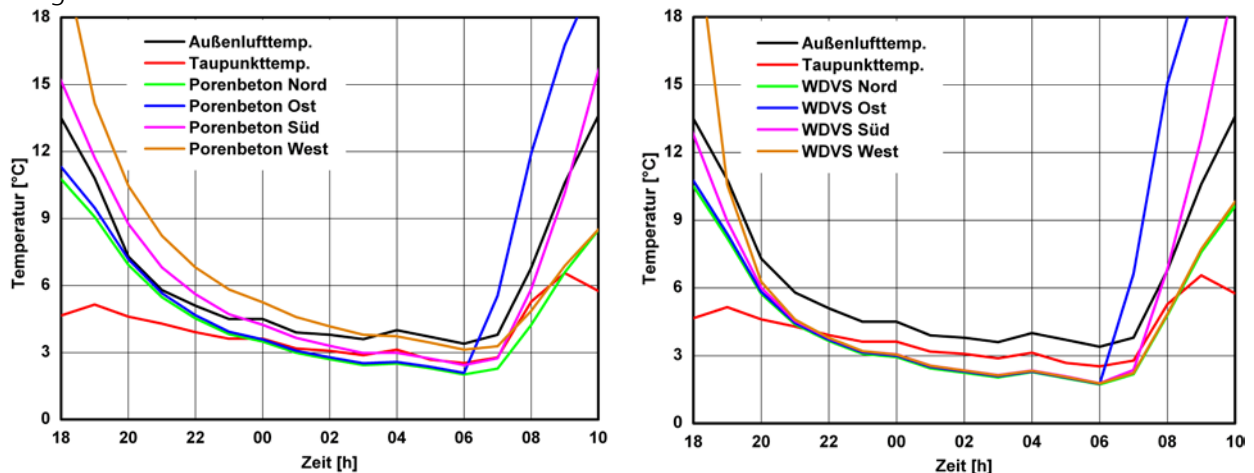


Bild 11 Berechnete Temperaturverläufe für verschiedene Ausrichtungen in einer klaren Septembernacht.

Links: monolithische Wand

Rechts: WDV-System

Bei der monolithischen Wand (linkes Bild) sinkt die Temperatur im Süden gegen 3 Uhr morgens bis zur Taupunkttemperatur ab und bleibt bis etwa 9 Uhr in diesem Bereich. Die Oberflächentemperaturen der Ost- und Nordseiten liegen dagegen schon gegen Mitternacht unter der Taupunkttemperatur, wobei die Ostwand sofort bei Sonnenaufgang wieder eine Temperatur über der Taupunkttemperatur erreicht. Die Nordseite braucht wesentlich länger für die Erwärmung, da hier die Einstrahlung der Sonne fehlt. Die Temperatur der Westfassade unterschreitet dagegen die Taupunkttemperatur nur kurzfristig. Das hängt damit zusammen, dass diese Wandseite den Temperaturhöhepunkt durch die Sonneneinstrahlung erst am späten Nachmittag erreicht und die Wand in den Abendstunden mehr Wärme gespeichert hat als bei anderen Ausrichtungen. Die vergleichbaren Kurven der Wand mit WDVS sind in Bild 11 rechts dargestellt. Der Hauptunterschied zur monolithisch aufgebauten Wand ist, dass die Wärmekapazität des Putzes bei WDVS geringer ist. In den klaren Nachtstunden wird durch die langwellige Abstrahlung die gespeicherte Wärme bei WDVS schneller abgestrahlt mit der Folge häufigerer und längerer Taupunkttemperaturunterschreitungen.

Im Bild 12 sind die aufsummierten Taupunkttemperaturunterschreitungen der beiden Wandkonstruktionen für die West- und Ostausrichtung dargestellt und mit der Schlagregenbelastung verglichen. Daraus wird ersichtlich, dass die Wand mit WDVS mehr Taupunkttemperaturunterschreitungen erfährt als der monolithische Aufbau. Vor allem auf der Westseite spielt als maßgebliche zusätzliche Feuchtequelle der Schlagregen eine große Rolle. Auffällig ist auch, dass im Gegensatz zur WDVS-Fassade bei der monolithischen Bauweise die Ostseite mehr Taupunkttemperaturunterschreitungen aufweist. Dies ist darin begründet, dass die auf der Ostseite morgendlich über solare Einstrahlung eingespeiste Energie bis zum Sonnenuntergang weitgehend abgebaut ist, im Westen dagegen in die Nacht "hingingerettet" wird. Beim WDVS spielt dieser Effekt aber aufgrund der niedrigen Wärmekapazität kaum eine Rolle.

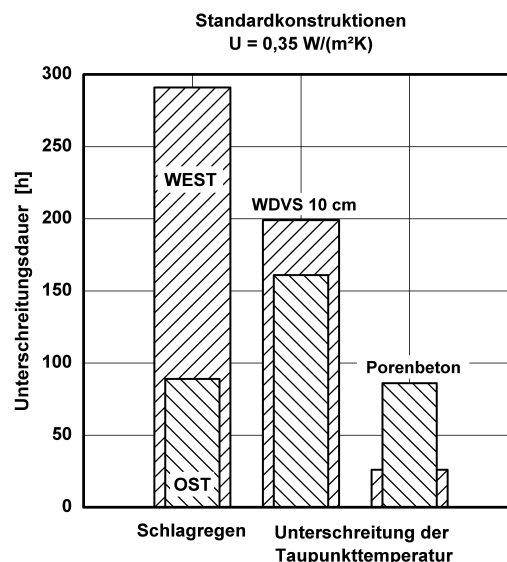


Bild 12 Aufsummierte Taupunkttemperaturunterschreitungen beider Konstruktionen im Vergleich mit der Schlagregendauer.

3.2 Rechnerischer Untersuchungen zu Vermeidungsstrategien

Aus bauphysikalischer Hinsicht gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansatzpunkte zur Reduktion der Betauung der Außenoberflächen eines WDV-Systems. Mit einer Erhöhung des oberflächennahen Wärmespeichervermögens kann die tägliche solare Erwärmung des Bauteils und die damit gespeicherte Energie genutzt werden, um eine Temperaturabsenkung unter die Taupunkttemperatur möglichst zu vermeiden. Weiterhin kann durch Verwendung eines Anstrichs mit höherem Absorptionsgrad die tägliche Erwärmung der Fassade angehoben werden oder mit einem Anstrich mit abgesenktem langwelligem Emissionsgrad der nächtliche Temperaturabfall verringert werden. Ein mögliches Kriterium zur Beurteilung der Ergebnisse und des Bewuchsrisikos ist die Dauer der Tauwasserbildung an der Oberfläche und die Stärke der Taupunkttemperaturunterschreitung. Mit Hilfe von Berechnungen mit dem Softwareprogramm WUFI lassen sich günstig zahlreiche weitere Varianten beurteilen, um unterschiedliche Einflussfaktoren, wie z.B. Orientierung, Dämmschichtdicke oder Erhöhung der thermischen Speichermasse durch Nutzung von Latentwärmeeffekten (PCM) in ihrer Wirkungsweise abzuschätzen.

In Bild 13 sind zusammenfassend die zu erwartenden Effekte der aufgeführten Maßnahmen grafisch dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Einsatz einer dunkleren Fassadenfarbe in Bezug auf die Vermeidung von Tauwasser keinen nennenswerten Erfolg bringt. Trotzdem kann ein getönter Anstrich vorteilhaft sein. Zum Einen, weil er geringfügigen Bewuchs kaschiert und zum Anderen können dadurch hin und wieder höhere Temperaturen auftreten, die für die Mikroorganismen letal sein können. Ein dickerer Außenputz mit hoher thermischer Masse kann die Taupunktunterschreitung maximal 20 %, eine IR-Farbe um fast 30 %, eine Latentwärmeschicht sogar um 70 % reduzieren. Eine Kombination beider Maßnahme kann als Extremfall die Taupunkttemperaturunterschreitungsdauer weiter reduzieren. Bei der Verwendung von Latentwärmespeichermaterialien (PCM) ist allerdings zu beachten, dass sie den erhofften Effekt nur erbringen, wenn der Schmelzpunkt des PCM den klimatischen Randbedingungen angepasst ist (siehe hierzu auch die Ergebnisse der Freilanduntersuchungen).

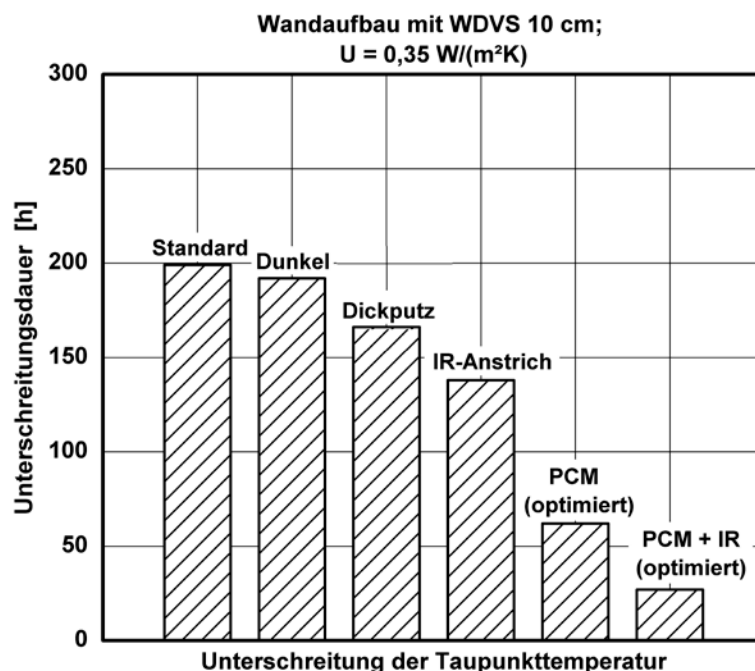


Bild 13 Effekt verschiedener Maßnahmen auf die Dauer der Taupunktunterschreitungen im Zeitraum von September bis Oktober.

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 hygrothermischen Materialeigenschaften des Außenputzes. Dabei muss geklärt werden, ob eine hydrophobe Außenbeschichtung, die zu einer geringeren Wasseraufnahme des Putzes führt, in Bezug auf das Bewuchsrisko von Vorteil ist. Eine derartige Beschichtung beeinflusst nämlich nicht die anfallende Tauwassermenge, die kleinen Tauwassertropfen verbleiben sogar 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.

Bild 14 zeigt die über die Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen auf Außenfassaden, den Herbst, akkumulierten Mengen an Feuchtigkeit auf der Außenfassade für eine ultrahydrophobe Farbe und einen Dispersionssilikatanstrich. Man erkennt daraus, dass bei dem Dispersionssilikatanstrich 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.

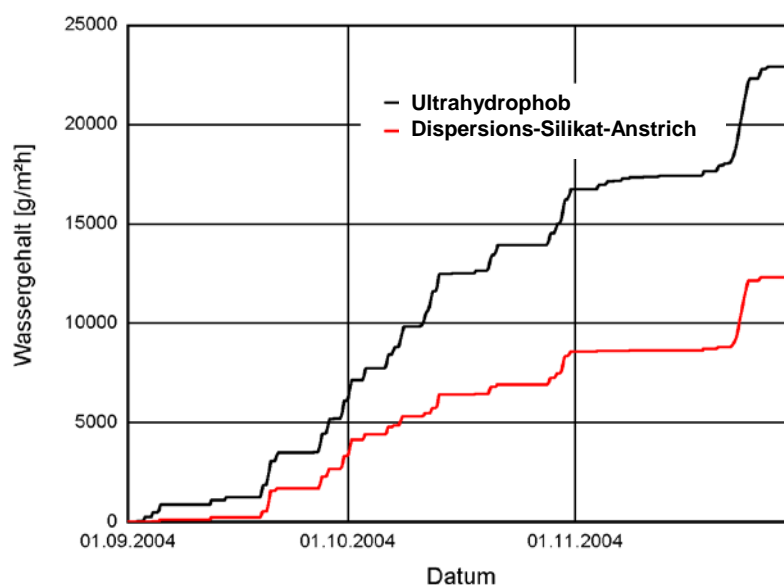


Bild 14 Über die Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen auf Außenfassaden, den Herbst, akkumulierten Mengen an Feuchtigkeit auf der Außenfassade für eine ultrahydrophobe Farbe und einen Dispersionssilikatanstrich.

3.3 Bauteiluntersuchungen im Freiland

Im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojektes sind an drei Standorten in Deutschland spezielle Prüfkörper exponiert worden. Die Prüfkörper wurden in Holzkirchen (Alpenvorland), Ernsthofen (Nähe Darmstadt) und Heggen (Sauerland) jeweils nach Westen ausgerichtet exponiert. Die Expositionsorte unterscheiden sich hinsichtlich der klimatischen Verhältnissen (bedingt durch die geografische Lage) und durch das direkte Umfeld. In der Untersuchungsreihe sind zum einen Putzsysteme mit unterschiedlichen Bindemitteltypen mit und ohne Filmkonservierung, aber auch Putz-Anstrichsysteme mit und ohne Filmkonservierung betrachtet worden. Die untersuchten Systeme lassen sich nach der Art des Bindemittels in Kunstharz, Silikonharz, silikatisch und mineralisch einteilen.

Betrachtet man die Prüfkörper an den Standorten, so ist vor allem am Silikonharzputz ein deutlicher bis starker biologischer Bewuchs aufgetreten. Eine durchgeführte chemische Analyse auf Stickstoffquellen ergab für den untersuchten Silikonharzputz im Vergleich zu den anderen relativ hohe Konzentrationen an löslichem Stickstoff, so dass die Verfügbarkeit von Nährstoffen eine Ursache für den aufgetretenen Bewuchs sein könnte. Die anderen Systeme zeigen zwar auch erste Verunreinigungen, geben aber noch keinen Grund zu Beanstandungen. Im Vergleich zu den übrigen Putzsystemen sind die Proben mit Kunstharzputz am stärksten vergraut.

Ebenfalls untersucht wurde in der Versuchsreihe der Einfluss von Anstrichen auf verschiedenen Putzsystemen. Generell konnte festgestellt werden, dass sich das Bewuchsrisko durch einen geeigneten Anstrich reduzieren lässt. Besonders deutlich wird dies am Beispiel eines Silikonharzputzes. Während der Silikonharzputz ohne Anstrich deutlichen Bewuchs zeigt, ist auf den Prüfkörpern mit Silikonharzfarbe kaum biologischer Bewuchs erkennbar. Dieselbe Silikonharzfarbe wurde auch auf das mineralische Putzsystem aufgebracht. Die Aufwuchsentwicklung unterscheidet sich kaum von der auf dem Silikonharzputz beobachteten und ist damit weitestgehend unabhängig vom Untergrund des Anstrichs.

Neben einer normalen Silikonharzfarbe wurde eine Silikonharzfarbe mit einem Kontaktwinkel größer 130° und mit Abperleffekt in die Untersuchungen einbezogen. Während sich bei der normalen Silikonharzfarbe an allen drei Standorten vergleichbare Bewuchsbilder ergeben, unterscheiden sich diese bei der Farbe mit Abperleffekt je nach Standort. In Holzkirchen tritt kein Bewuchs auf, an den anderen beiden Standorten wird dagegen ein deutlicher Bewuchs festgestellt. Eine Erklärung hierfür ist im unterschiedlichen Abtrocknungsverhalten zu suchen (siehe Bild 15), wie anhand von Oberflächenfeuchtemessungen nachgewiesen werden konnte. Das an der Oberfläche befindliche Wasser wird dabei durch ein Abtupfen mit einem saugfähigen Vlies und anschließende Wägung ermittelt. 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 trocken. Nach nächtlicher Btauung liegen umgekehrte Verhältnisse vor. Da 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.

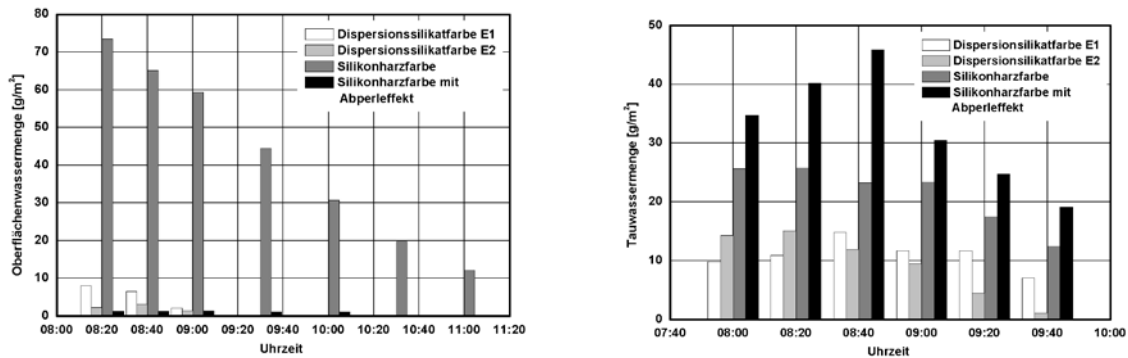


Bild 15 Oberflächenfeuchte und Abtrocknungsverhalten von Wandflächen mit verschiedenen Beschichtungen nach Regen (links) und nach Betauung (rechts).

Für die Freilandversuche wurden auch an der Außenoberfläche der Wände die Temperaturverläufe gemessen, um durch den Vergleich zur gemessenen Außenlufttaupunkttemperatur die Dauer und Intensität der Tauwasserbildung zu bestimmen. In Bild 16 sind die Versuchsfelder einer westorientierten (rechts) und einer nordorientierten (links) Fassade dargestellt.



Bild 16 Fotografische Ansicht der westorientierten (rechts) und nordorientierten (links) Fassaden.

Um zu zeigen, dass monolithische Systeme bezüglich Betauung weniger betroffen sind, werden auch Messergebnisse von Massivwänden einbezogen (Bild 17). Im Vergleich zu den WDVS zeigen diese deutlich geringere Betauungszeiten. Die farbige WDVS bringt, wie schon die Berechnungen zeigten, auch hier nur eine geringfügige Verbesserung.

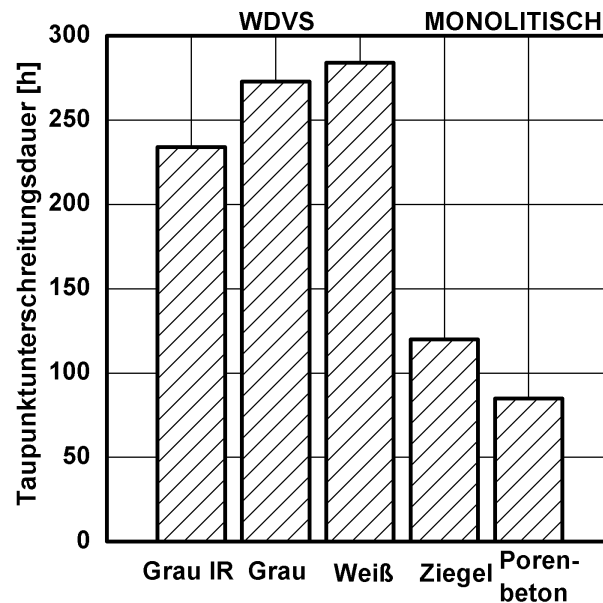


Bild 17 Für die Hauptwachstumsperiode Herbst aufsummierte Betauungszeiten für verschiedene Wandkonstruktionen und Anstrichfarben.

Der Vorteil von neuartigen Materialien, wie z. B. IR-Anstriche, PCM in Putzen und die Kombination von PCM mit IR-Farbe, kann messtechnisch nachgewiesen werden (siehe Bild 17, von der Nordfassade aus Bild 16). Man erkennt, dass die Hauptbetauungszeiten im Herbst und im Winter liegen. Da die Temperaturen im Winter für mikrobielles Wachstum zu niedrig sind, ist der Herbst (wie auch allgemeine Beobachtungen bestätigen) die Hauptwachstumsperiode für mikrobiellen Bewuchs. Betrachtet man für diesen Zeitraum die gemessenen Tauwasserzeiten, so ist im ersten Herbst die Wirksamkeit des PCM deutlich zu sehen, während im zweiten, im dritten sowie im 4. Herbst ein deutlich geringerer Einfluss festgestellt werden konnte. Die Ursache ist in der Umschlagtemperatur des verwendeten PCM zu suchen, die bei 6 °C liegt. Während im ersten Untersuchungsjahr die mittlere Außenlufttemperatur im Oktober bei 5 °C lag, betrug diese in den folgenden Jahren ca. 10 °C. Somit konnte keine Latentwärme freigesetzt werden. Die mit einem IR-Anstrich versehene Fassade, die im Gegensatz zu den rechnerischen Untersuchungen anstatt einer Absenkung des Emissionsgrades auf 0,6 nur einen Wert von 0,74 erreichte, zeigt dagegen durchgängig eine gleich bleibende Absenkung der Betauungszeiten um ca. 15 %. Interessanterweise bringt die Kombination von PCM-Putz mit IR-Anstrich während der gesamten Messperiode eine deutlich größere Absenkung der Tauwasserbildung als der IR-Anstrich allein, obwohl die PCM-Zugabe allein zu manchen Zeiten keine Verbesserung erbringt.

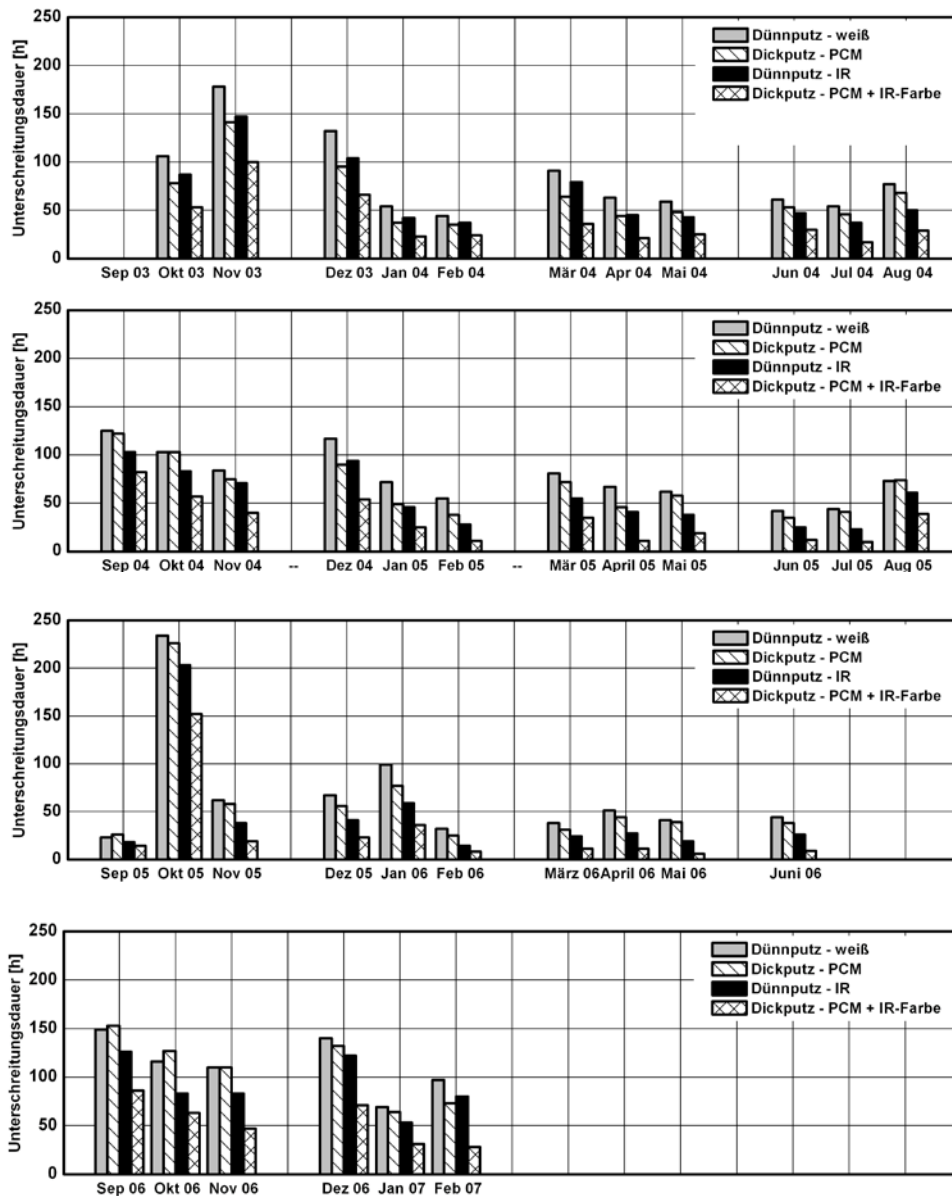


Bild 18 Zeitdauer der Taupunkttemperaturunterschreitung für das Wärmedämmverbundsystem ohne und mit PCM und IR-Farbe für die Messperiode von Okt. 2003 bis Februar 2007.

Neben der Betauungszeit und der Kondensatmenge ist für die Abschätzung des Risikos von mikrobiellem Wachstum die tatsächlich vorhandene Wassermenge an der Oberfläche ausschlaggebend, da für die Mikroorganismen nur das Wasser auf der Oberfläche der Fassade verfügbar ist. Daher wurde an einer Westfassade die Oberflächenfeuchte bestimmt.

Bild 19 zeigt die Ergebnisse für einen Morgen nach einer klaren Nacht. Auf der Oberfläche eines Standard-WDVS mit einem weißen Anstrich wurde fast zweimal so viel Wasser gemessen wie auf der Oberfläche eines weißen Dickputzes. Hierbei ist zu bedenken, dass diese Resultate auch stark von den hygrischen Materialeigenschaften des Putzes und des Anstrichs abhängen. Durch den Dickputz wird mehr Tauwasser unter die Oberfläche geleitet. Das beste Ergebnis aber liefert die Oberfläche mit dem IR-Anstrich (Variante mit einem Emissionskoeffizienten von ca. 0,6). Fast kein Wasser konnte an diesem Morgen auf der Oberfläche gemessen werden. Leider sind derzeit

die verfügbaren IR-Anstriche noch nicht ausreichend witterungsstabil. Dies zeigt sich darin, dass bei den untersuchten Farben nach relativ kurzer Bewitterungszeit durch oberflächliche Abwitterung die für die Verminderung der langwelligen Emission eingesetzten Aluminiumflakes an die Farboberfläche gelangten. Dies hat zur Folge, dass der Anstrich ein metallisches Aussehen bekommt. Die Resultate belegen jedoch, dass es sich lohnen würde, diese IR-Anstriche weiter zu entwickeln, um ihre Wetterbeständigkeit den heutigen Anforderungen anzupassen.

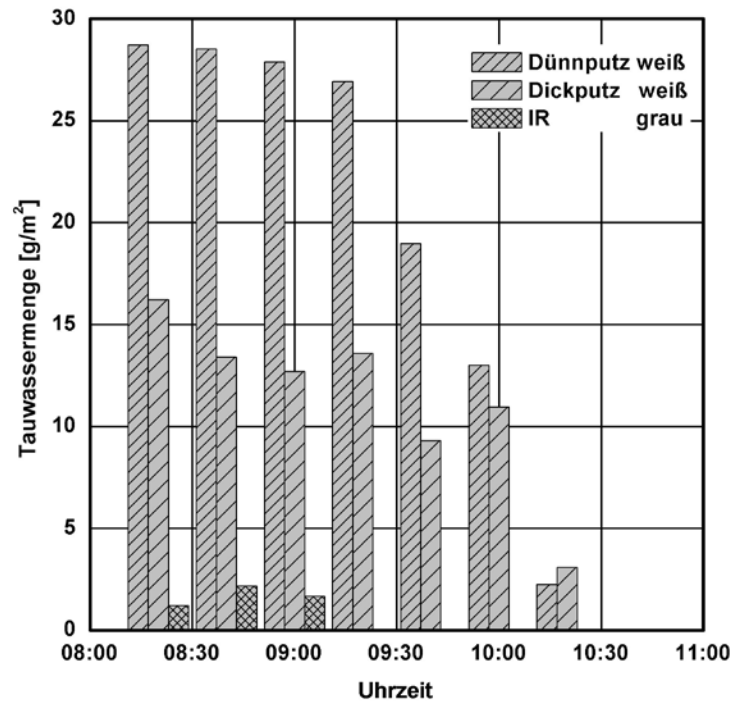


Bild 19 Verläufe der Oberflächenfeuchte für westorientierte Wände mit verschiedenen WDVS.

4 Zusammenfassung

Im Altbaubereich ist es ein bekanntes Problem, dass im Anschluss an eine wärmetechnische Sanierung eines Gebäudes gehäuft Schimmelpilzbildung beobachtet wird. Dies kann nicht der verbesserten Außendämmung angelastet werden. Eine verbesserte Dämmung führt zu niedrigeren Außenwandinnenoberflächentemperaturen und mit der damit verbundenen Absenkung der Oberflächenfeuchte zu verringertem Schimmelpilzrisiko. Auch die negative Wirkung von Wärmebrücken wird durch eine Außendämmung vermindert. Häufig werden im Zuge einer Sanierung auch die alten Fenster durch neue, wesentlich dichtere Fenster moderner Bauart ersetzt. Der vorher vorhandene Grundluftwechsel über Fensterfugen wird dadurch stark eingeschränkt. Meist verändert der Nutzer aber seine Lüftungsgewohnheiten nicht. Oft wird die Fensterlüftung sogar fälschlicherweise noch reduziert, um die meist aufwändige wärmetechnische Sanierung nicht über vermeintlich erhöhte Lüftungswärmeverluste zu konterkarieren. Übersehen wird dabei, dass die vermehrte bedarfsgerechte Fensterlüftung trotz gegensätzlichem Anschein zu einem im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung niedrigeren mittleren Luftwechsel führt. Ein erhöhter Lüftungswärmeverlust ist nicht wirklich gegeben. Eine eingehende Aufklärung der Nutzer über das erforderliche Lüftungsverhalten nach einer derartigen Sanierung könnte zahlreiche Schadensfälle vermeiden helfen.

Vor allen bei Neubauten hat sich in den letzten Jahrzehnten das Dämmniveau deutlich erhöht. Bei entsprechend hohem Dämmstandard kann selbst das Aufstellen von Möbeln an der Außenwand – in früheren Zeiten ein Garant für Schimmelwachstum – bedenkenlos durchgeführt werden. Voraussetzung dabei ist aber eine ausreichende bedarfsgerechte Lüftung und Beheizung der einzelnen Räume.

Beim Neubau kommt allerdings ein neues Problem auf, das vermehrt zu Schimmelpilzbildung führt. Der Bezug des Wohnraums findet, zum Teil auch aus steuerlichen Gründen, häufig direkt im Anschluss an die Baufertigstellung statt ohne ausreichend Zeit für die Austrocknung der Baufeuchte. Aus Unkenntnis wird aber von vielen Nutzern übersehen, dass, wie auch die Berechnungen zeigen, über einen geraumen Zeitraum zur Schimmelpilzvermeidung ein deutlich erhöhter Lüftungsbedarf besteht. Hier sollte bei Übergabe des Wohnraums ebenfalls unbedingt eine entsprechend Aufklärung erfolgen.

Im Gegensatz zur Situation im Innenraum führt die Verbesserung des Wärmedämmstandards 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 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 vers-

chattete Wand in Wald- und Gewässernähe, bei denen die Anwendung von Wirkstoffen unvermeidlich ist.

Eine dunklere Farbgebung führt tagsüber zu höheren Maximaltemperaturen. In Bezug auf die nächtliche Unterkühlung ergeben sich dadurch aber infolge der geringen Wärmekapazität des Standardputzes kaum Unterschiede. Trotzdem kann eine derartige Farbgebung Vorteile bringen, da ein geringfügiger Bewuchs kaschiert wird. Gegebenenfalls werden an sonnigen Tagen auch für die Mikrobiologie letale Oberflächentemperaturen erreicht. Mit dickschichtigeren Putzen könnte die Tauwassermenge etwas reduziert werden, aber der größte Vorteil dieses Systems liegt in der Fähigkeit, einen Teil des Tauwassers unter die Oberfläche abzuleiten.

Ein weiterer Lösungsansatz zur Reduzierung der Taupunkttemperaturunterschreitung ist die Möglichkeit, Latentwärmeeffekte zu nutzen, indem so genannte PCM in die Außenfassade eingebaut werden. Als PCM kann dabei Paraffin dienen, das mit unterschiedlichen Schmelzbereichen verfügbar ist. 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.

Bei IR-aktiven Farben konnte 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. Dies stellt die am einfachsten auch im Baubestand durchführbare Maßnahme dar. Allerdings sind leider derzeit keine ausreichend witterungsstabilen IR-Anstriche verfügbar.

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. Auf stark hydrophoben Untergründen bleiben die Tauwassertropfen auf der Fassadenoberfläche und trocknen über einen langen Zeitraum langsam ab. Saugfähige Untergründe können diesbezüglich deutliche Vorteile bieten

5 Literatur

- [1] Blaich, J. 1999. Außenwände mit Wärmedämm-Verbundsystem, Algen- und Pilzbewuchs. Deutsches Architektenblatt 31, H.10, S.1393 - 1394.
- [2] Venzmer, H. 2001. Grüne Fassaden nach der Instandsetzung durch WDVS? Nicht bestellt und dennoch frei Haus. 3. Dahlberg-Kolloquium.
- [3] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart (1994).
- [4] Hofbauer, W.; Fitz, C.; Krus, M.; Sedlbauer, K.; Breuer, K.: 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.
- [5] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001)
- [6] Krus, M.; Sedlbauer K.; Holm, A.; Künzel, H. M.: Rechnerische Simulation zu Feuchtebelast, Luftwechsel und Schimmelpilzbildung in Wohnungen. Teil 4: Mehrbedarf an Lüftung und Heizenergie bei vorhandener Baufeuchte. Im Buch „Fensterlüftung und Raumklima“, Hrsg. Künzel, H., Fraunhofer - IRB-Verlag, Stuttgart, S. 220-226, 2006, ISBN 3-8167-6796-6.
- [7] Krus, M.; Holm, A.; Hellwig, R.; Sedlbauer K.: Bauphysikalische Aspekte der Feuchteproblematik in Gebäuden. Workshop „Gesundheitsrisiko Wohnfeuchte – Feuchteschäden: Vorkommen, Ursache, Folgen und Vermeidung. Tagungsbeitrag, Berlin 5. Dezember 2005