

---

# Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen

## *Hygrothermal Properties and Loads of Renderings and Coatings*

Hartwig M. Künzel und Cornelia Fitz, Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen



*Dr.- Ing. Hartwig M. Künzel*

Jahrgang 1959, Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Erlangen-Nürnberg. 1987 wiss. Mitarbeiter, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen. 1994 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Seit 1994 Leiter der Abteilung Hygrothermik am IBP.

Mitglied bzw. Obmann in internationalen Normungsausschüssen und Fachgremien (z.B. WTA, CEN, ASHRAE). Über 200 Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften und Kongressbänden.



*Dr. rer.nat. Cornelia Fitz*

1977 bis 1984 Chemiestudium an der Universität Stuttgart. 1984 bis 1987 Promotion am Lehrstuhl für Organische Chemie, Biochemie und Isotopenforschung der Universität Stuttgart. Seit Mai 1994 Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Seit November 2000 stellvertretende Prüfstellenleiterin für den Bereich Feuchte und Mörtel. Seit Januar 2004 Gruppenleiterin in der Abteilung Hygrothermik.

## **Kurzfassung**

Die bauphysikalische Beanspruchung ist ein wesentlicher Faktor für die Auswahl und Lebensdauer von Außenputzen und Anstrichstoffen. Neben den Witterungsbedingungen Temperatur, Strahlung (orientierungsabhängig) und Luftfeuchte wirken häufig auch noch äußere oder innere Feuchtequellen (z.B. Schlagregen, Baufeuchte, Oberflächenbetauung) auf die Fassade ein. Zusammen mit den Trocknungsbedingungen und Substrateigenschaften stellen sie die Randbedingungen für den Feuchtehaushalt von Putz- und Anstrichsysteme dar. Da eine hohe Feuchtebeanspruchung Frostschäden oder mikrobiologischen Bewuchs zur Folge haben kann, sollte die feuchtetechnische Reaktion der Fassade auf die entsprechenden Randbedingungen zugeschnitten werden. D.h. die hygrothermischen Materialeigenschaften von Putz- und Anstrichsystemen sind für den geplanten Einsatz anzupassen bzw. zu optimieren.

Umfangreiche Freilandversuche haben gezeigt, dass die Art der Feuchtebeanspruchung für das richtige Eigenschaftsprofil der Oberflächensysteme entscheidend ist. Während beispielsweise eine hydrophobe Beschichtung einen wirksamen Schlagregenschutz darstellt, kann sie die Tauwasserbildung durch nächtliche Unterkühlung nicht verhindern. Im Gegenteil, die Hydrophobie sorgt sogar dafür, dass das Wasser an der Oberfläche haften bleibt und dadurch eventuell vorhandenen Mikroorganismen zur Verfügung steht. Will man die Tauwasserbildung reduzieren, müssen die thermischen Eigenschaften der Fassaden, wie z.B. die Wärmekapazität des Putzsystems oder der langwellige Emissionsgrad des Oberflächenanstrichs modifiziert werden. Im vorliegenden Beitrag wird die bauphysikalische Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen in Abhängigkeit von deren Exposition und den thermischen Eigenschaften der Wandkonstruktion analysiert und mit Hilfe von Messergebnissen quantifiziert. Gleichzeitig wird untersucht mit welchen Strategien der Feuchteschutz von Fassadensystemen in Zukunft verbessert werden kann.

**Stichwörter:** Außenputz, Anstrich, Schlagregen, Oberflächentauwasser, Feuchteschutz.

## **Abstract**

*The hygrothermal load is a decisive parameter for the selection and the service life of exterior renderings and coatings. Apart from the fluctuating climatic conditions temperature, solar radiation (depending on orientation) and humidity there are often additional exterior or interior moisture loads (driving rain, construction moisture, surface condensation) affecting the façade. Together with the prevailing drying conditions and the characteristics of the substrate they form the boundary conditions for the moisture behaviour of rendering and coating systems. Since high moisture loads may provoke frost damage or microbial growth, efficient protection of the façade's components is necessary. One way of doing this, is adjusting the hygrothermal characteristics of rendering and coating systems according to the designed application.*

*Extensive field tests indicate that the type of load determines the optimum property profile of façade systems. While water repellent coatings provide effective protection against wind driven rain, they are unable to prevent surface condensation due to night-time sky radiation. On the contrary, as a consequence of the water repellency the condensation moisture remains at the surface where it may be ingested by micro-organisms. In order to reduce the formation of condensate the thermal properties of the surface layers must be modified, e.g. by increasing the heat capacity of the rendering or by reducing the infrared emissivity of the coating. In this*

---

*paper the hygrothermal loads of rendering and coating systems are experimentally analyzed and quantified depending on exposure and thermal performance of the entire wall construction. Additionally, the potential of different strategies to improve the moisture protection of façade systems is investigated.*

**Key words:** *stucco, rendering, coating, driving rain, surface condensation, moisture protection*

## **1. Einleitung**

Verunreinigungen oder Schäden an Außenputzen und Anstrichen werden häufig durch deren bauphysikalische Beanspruchung, d.h. in erster Linie durch witterungsbedingte Temperatur- und Feuchtwechsel hervorgerufen. Neben schleichenden Veränderungen durch Auswaschung, Bindemittelverlust oder Kristallisationsprozesse (Alterung) spielen manchmal auch physikalische Schädigungsmechanismen eine Rolle. Frostschäden entstehen beispielsweise immer dann, wenn der Wassergehalt bei Eisbildung größer ist als der schädigungsrelevante Grenzwassergehalt, d.h. die Spannungen, die beim Gefrieren des vorhandenen Wassers auftreten, übersteigen die Festigkeit des Putzmörtels. Meist finden zunächst mikroskopische Veränderungen im Porengefüge statt, die erst bei mehrmaligen Frost-Tauwechseln zu einer sichtbaren Schädigung führen. Salze können beim Kristallisieren ähnliche Schäden hervorrufen, wie das gefrierende Wasser. Außerdem erhöhen sie durch ihre hygroskopischen und diffusionstechnischen Eigenschaften den Wassergehalt des Putzes. Andere Fremdstoffe, wie z.B. mikrobiologischer Bewuchs oder Verschmutzungen verursachen Feuchteschäden eher mittelbar, indem sie durch ihr Wasserrückhaltevermögen bzw. durch das Verdichten der Oberflächenschicht die Feuchte in der Wand erhöhen. Allerdings wird mikrobiologischer Bewuchs beispielsweise in Form von Algen oder Schwärzelpilzen häufig auch ohne schädigende Wirkung als Mangel angesehen, der zu beseitigen ist. Deshalb sind die hygrothermischen Verhältnisse an Fassaden auch darauf hin zu untersuchen ob sie die entsprechenden Wachstumsvoraussetzungen bieten.

Einen wesentlichen Faktor stellen die jeweiligen Witterungsverhältnisse dar und zwar sowohl das Makro- als auch das Mikroklima. Beispielsweise haben Untersuchungen in [1] ergeben, dass Frostschäden vermehrt in relativ milden Wintern auftreten, wenn auf lang anhaltende Regengüsse kurze Frostperioden folgen. Ausrichtung und Position eines Bauteils haben ebenfalls einen Einfluss auf die Schadenswahrscheinlichkeit, da sowohl die Feuchtebeanspruchung als auch die solare Einstrahlung schädigungsrelevant sein können. Das Zusammenwirken der verschiedenen Klimafaktoren und die hygrothermische Reaktion der Fassadenkonstruktion sind sehr komplex. Deshalb sind quantitative Angaben zum Feuchteverhalten von Putz- oder Anstrichsystemen und den damit zusammenhängenden Bewuchs- oder Schadensrisiken nur bedingt möglich. Vergleichende Aussagen, wie z.B. ob bestimmte Expositionsbedingungen oder Materialeigenschaften das Langzeitverhalten einer Fassadenkonstruktion im Verhältnis zum betrachteten Referenzfall verbessern oder verschlechtern, sind bei genauer Betrachtung sehr wohl möglich. Im Folgenden werden die bauphysikalischen Beanspruchungen und die hygrothermischen Eigenschaften von Außenputzen und Anstrichen analysiert und deren Auswirkungen auf eventuelle Schadensrisiken aufgezeigt.

## 2. Zyklische Beanspruchungen

Die bauphysikalischen Beanspruchungen von Außenputzen und Anstrichstoffen resultieren in erster Linie aus den klimatischen Randbedingungen. Beispielfhaft und bis zu einem gewissen Grad repräsentativ für Mitteleuropa werden bei den weiteren Betrachtungen die Klimabedingungen vom Standort Holzkirchen (680 m ü. NN.) zugrunde gelegt. In Bild 1 sind jeweils links eingezeichnet die Verläufe der langjährigen Monatsmittelwerte bzw. Summen (Mittelwerte aus über zehn Jahren) der Außenlufttemperatur, der Luftfeuchte (relativ und absolut) und des Niederschlags zu sehen. Rechts daneben sind die auf jeweils drei Sommer- bzw. Wintermonaten basierenden durchschnittlichen Tagesverläufe für Sommer und Winter dargestellt. Demnach zeichnet sich ein mittlerer Wintertag durch Temperaturen um 0°C aus, nachts etwas darunter und tagsüber etwas darüber. Daraus lassen sich sehr häufige Frost-Tau-Wechsel ableiten, die entsprechende Auswirkungen auf Putz und Anstrich haben können. Für hoch gedämmte Außenwände ist zunehmend ein weiterer Klimaparameter, die absolute Luftfeuchte, von Bedeutung (siehe Ziffer 4). Kurz nach Sonnenaufgang steigt sie – und damit auch die Taupunkttemperatur der Außenluft – spürbar an, während die relative Luftfeuchte aufgrund der solaren Erwärmung stark abfällt. Dieser Effekt lässt sich durch die Verdunstung von Nebel- oder Tau-tröpfchen auf Wiesen und Feldern erklären. Im Mittel wird im November die höchste relative Luftfeuchte gemessen während das Maximum der absoluten Feuchte mit dem Temperaturmaximum im Juli zusammenfällt.

Bei einem Kontinentalklima wie in Holzkirchen fallen die größten Niederschlagsmengen in den Sommermonaten, wobei es zu dieser Jahreszeit am Nachmittag deutlich mehr regnet als am Vormittag. Dies hängt wahrscheinlich mit der stärkeren Gewittertätigkeit zusammen, da im Winter eine tageszeitliche Häufung der Niederschläge nicht beobachtet werden kann. Neben den in Bild 1 gezeigten Klimaparametern spielt die Sonneneinstrahlung für das Temperatur- und Feuchteverhalten von Fassadenkonstruktionen eine wichtige Rolle. Da es sich bei der Strahlung jedoch um eine stark gerichtete Größe handelt, sind jahreszeitliche Verläufe hier weniger aussagekräftig. Beispielsweise ist die gemessene Globalstrahlung im Sommer naturgemäß am höchsten während die Direktstrahlung auf eine Südwand ihr Maximum im Winter erreicht. Außerdem kann die Reflexion von Schneeflächen die Einstrahlung entsprechend verstärken.

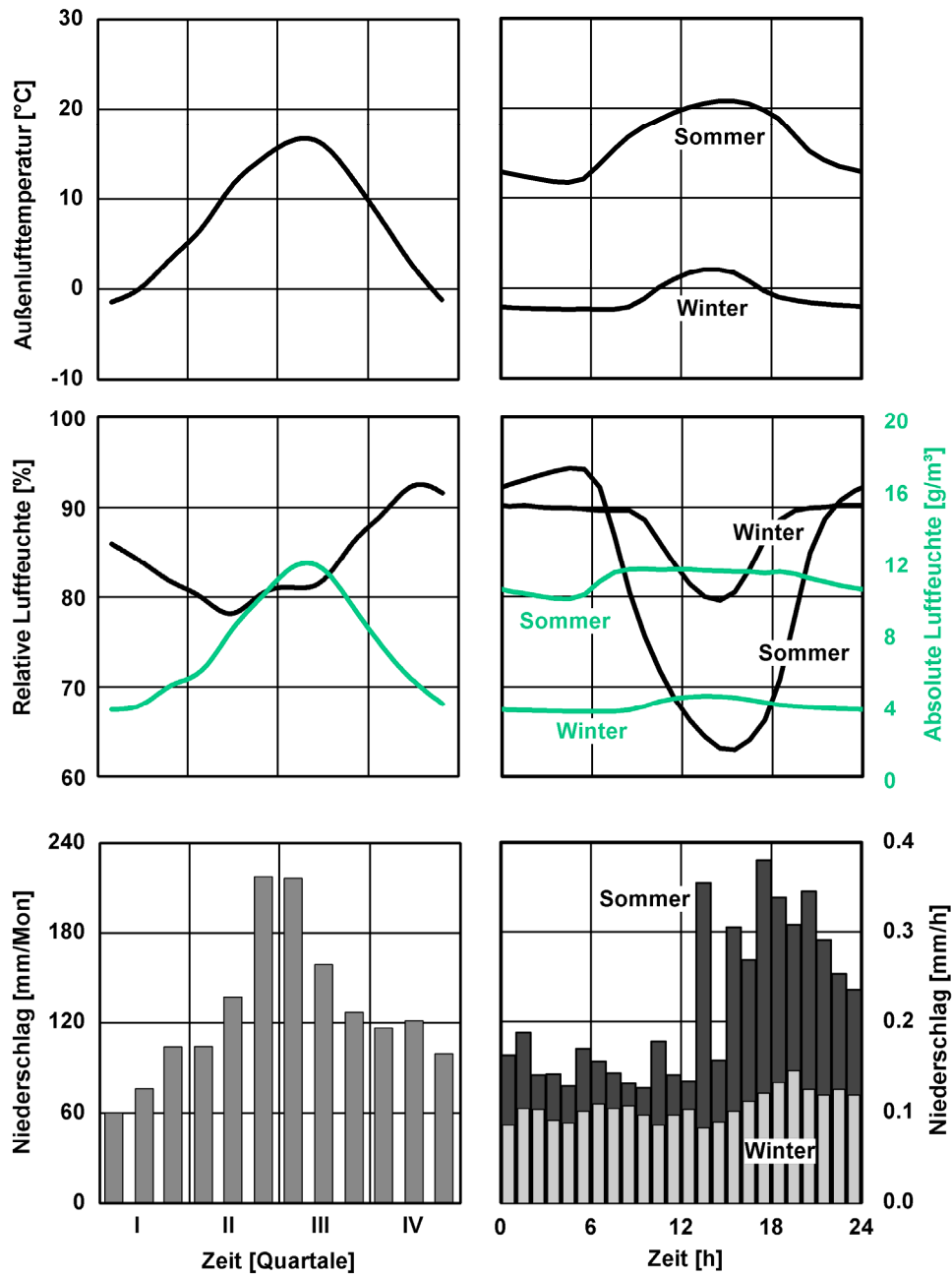


Bild 1: Jahresverläufe der langjährigen Monatsmittelwerte bzw. -summen (linke Diagramme) von Temperatur, Feuchte und Niederschlag in Holzkirchen. Rechts daneben sind die durchschnittlichen Tagesverläufe im Sommer und Winter abgebildet.

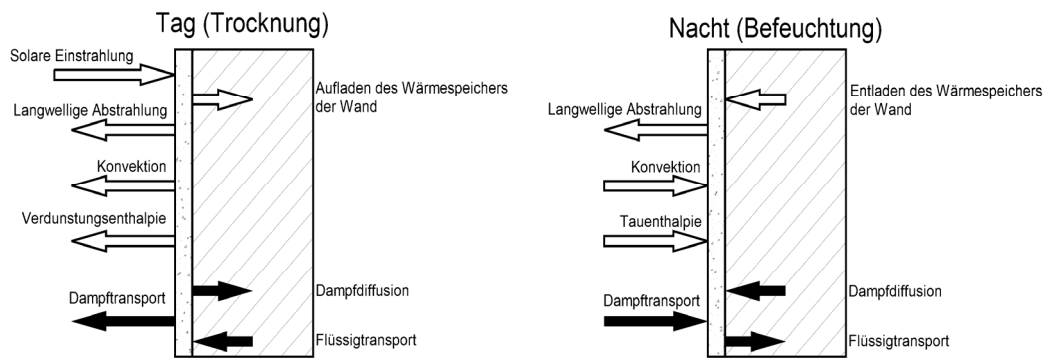
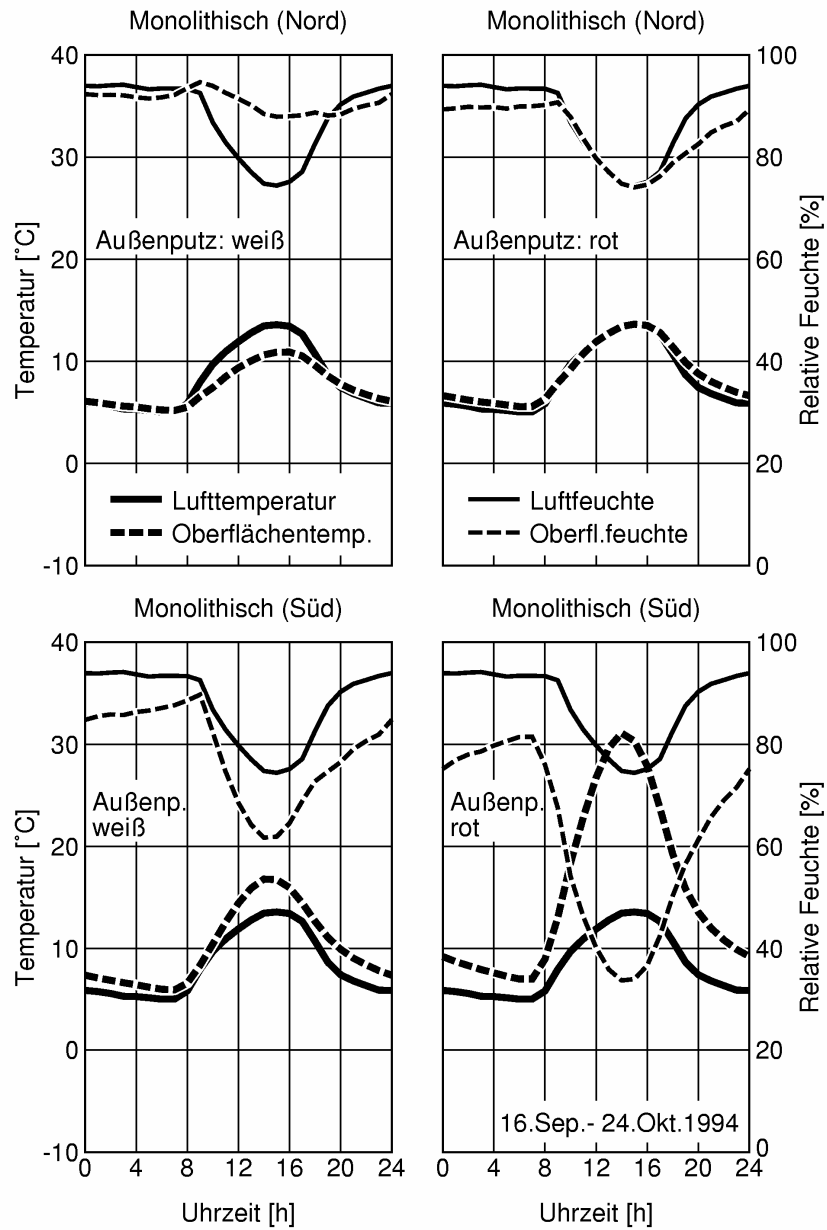


Bild 2: Schematische Darstellung der thermischen (weiße Pfeile) und hygrischen (schwarze Pfeile) Klimawirkungen auf einen Außenputz am Tag und in der Nacht.

Die Auswirkungen der beschriebenen Klimafaktoren auf ein Putz- oder Anstrichsystem sind für einen typischen Tag/Nacht-Zyklus in Bild 2 schematisch dargestellt. An einem sonnigen Tag werden der Putz und die darunter liegende Wandkonstruktion durch die solare Einstrahlung erwärmt. Die damit verbundene Erhöhung des Dampfdruckes führt zu einer Austrocknung der Putzoberfläche durch Feuchteabgabe an die Außenluft aber auch durch Dampfdiffusion in die kälteren Zonen der Wand hinein. Das Absinken der Putzfeuchte hat eine Erhöhung des kapillaren Unterdrucks zur Folge, was zu einem Nachsaugen des im Putzgrund vorhandenen Wassers führt. Insgesamt trocknet die Wand dadurch aus, wobei die Trocknungsgeschwindigkeit stark von der Oberflächentemperatur abhängt. Diese Temperatur ergibt sich aus der Bilanz von kurzweiliger Einstrahlung und langweiliger Abstrahlung sowie der Wärmeabgabe durch Konvektion und Verdunstung nach außen und der Wärmeleitung nach innen. In der Nacht, wenn die solare Einstrahlung wegfällt, dominiert die langwellige Abstrahlung. Die daraus folgende Abkühlung der Wandoberfläche kann unter Umständen sogar zur Unterkühlung des Putzes unter die Taupunkttemperatur der Außenluft führen. Selbst wenn die Unterkühlung für eine Tauwasserbildung nicht ausreicht, wie das häufig bei massiven Wänden aufgrund der hohen Wärmespeicherfähigkeit der Fall ist, hat die Abkühlung eine Erhöhung der Oberflächenfeuchte durch Wasserdampfsorption zur Folge. Der Putz nimmt dabei sowohl aus der Außenluft als auch durch Diffusion aus dem wärmeren Untergrund Feuchte auf.



**Bild 3:** Mittlere Tageszyklen der gemessenen Oberflächentemperaturen im Vergleich zur Außenlufttemperatur (dicke Linien) und der daraus ermittelten Oberflächenfeuchten im Vergleich zur Luftfeuchte (dünn) von nach Norden und Süden orientierten verputzten Ziegelwänden mit weißem oder rotem Anstrich.

Die Auswirkungen der beschriebenen klimatischen Einflussfaktoren auf das instationäre Temperatur- und Feuchteverhalten von Außenputzen und Anstrichen wird anhand von Oberflächentemperaturmessungen an verputzten Ziegelwänden ( $U = 0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) eines Testhauses auf der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik genauer analysiert. Bild 3 zeigt für einen ca. fünfwöchigen Zeitraum im Herbst die mittleren Tagesverläufe der Putzoberflächentemperatur und –feuchte für eine süd- und nordorientierte Außenwand mit weißem und mit dunklem (rot gefärbten) Anstrich im Vergleich zu den Außenluftbedingungen. Auf der Nordseite sind die Temperatur- und Feuchteschwankungen im Putz vergleichsweise gering. Im Fall der weißen Putzoberfläche bleibt die Temperatur am Tag unter der Außenlufttemperatur, was zu einer fast konstanten rechnerischen Oberflächenfeuchte von ca. 90% r.F. führt. Die hygrothermischen Verhältnisse auf der roten Putzoberfläche variieren geringfügig entsprechen den Außenluftverhältnissen. Auf der Südseite liegen die gemessenen Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf über der Außenlufttemperatur. Die mittlere tägliche Schwankungsbreite beträgt beim weißen Putz ca. 10 K und beim roten Putz fast 25 K. Entsprechend ausgeprägt sind auch die Änderungen der rechnerischen Oberflächenfeuchte; etwa 30% r.F. beim weißen und 50% r.F. beim roten Putz. Die damit verbundenen thermischen und hygrischen Dehn- und Schwindvorgängen können bei mangelnder Festigkeit sowohl Risse im Oberputz oder Anstrich als auch ein Abplatzen des Putzes vom Untergrund zur Folge haben.

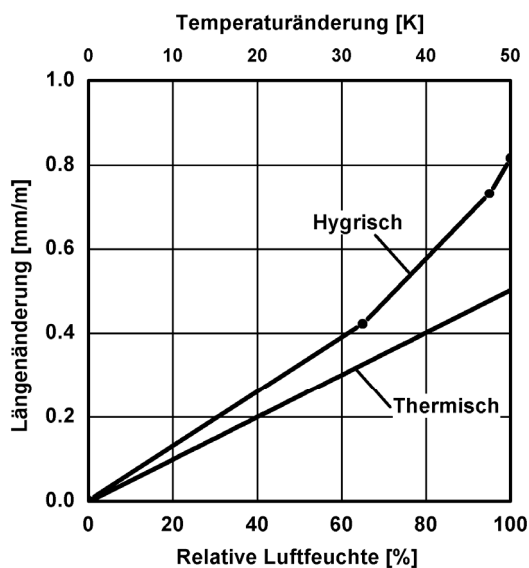


Bild 4: Durchschnittliche hygrische und thermische Längenänderung von Putzen für Wärmedämmverbundsysteme ermittelt aus Einzelmessungen an 24 unterschiedlichen Putzsystemen verschiedener Hersteller. Die 5cm x 20cm großen Putzproben wurden WDVS-Prüfkörpern entnommen, die zuvor sechs Monate lang auf dem IBP-Versuchsgelände in Holzkirchen der freien Witterung ausgesetzt waren. Die thermische Dilatation wurde im Bereich von 20°C bis 80°C bei einer konstanten Luftfeuchte von 35% r.F. gemessen. Die hygrische Dehnung wurde bei 20°C ausgehend vom trockenen Zustand bei 65% r.F., 95% r.F. und bei freier Wassersättigung bestimmt [2].



Labormessungen an 24 Putzsystemen für Wärmedämmverbundsysteme von unterschiedlichen Herstellern in [2] haben bei freier Beweglichkeit der untersuchten Putzproben für den thermischen Dehnkoeffizienten eine Bandbreite von 0,007 – 0,013 mm/(m K) ergeben. Die gemessenen Schwindmaße bei der Austrocknung der wassergesättigten Putzproben bis zu ihrer Gleichgewichtsfeuchte bei 65% r.F. zeigen eine wesentlich größere Bandbreite von 0,1 – 1,1 mm/m. Über alle untersuchten Putzsystemen gemittelt ergeben sich für die klimabedingten hygrothermischen Längenänderungen die in Bild 4 dargestellten Zusammenhänge. Daraus ist zu entnehmen, dass der täglich wiederkehrende Temperaturanstieg um 25 K, wie er beispielsweise an der nach Süden orientierten Oberfläche des roten Putzes in Bild 3 gemessen wurde, eine Dilatation von 0,24 mm/m zur Folge hat. Durch den gleichzeitig auftretenden Oberflächenfeuchtewechsel von 80% auf 30% r.F. beträgt jedoch das hygrische Schwinden etwa 0,4 mm/m. Da die Temperaturveränderungen schneller ablaufen als die Feuchtewechsel durch Trocknung der Oberflächenschicht kann hier nicht von einer Kompensation der gegenläufigen Effekte ausgegangen werden. Bei einer Behinderung der Längenänderung durch den Untergrund resultieren entsprechende Eigenspannungen im Putz, wobei die feuchtebedingten Spannungen im Mittel größer sind, als die thermischen Eigenspannungen.

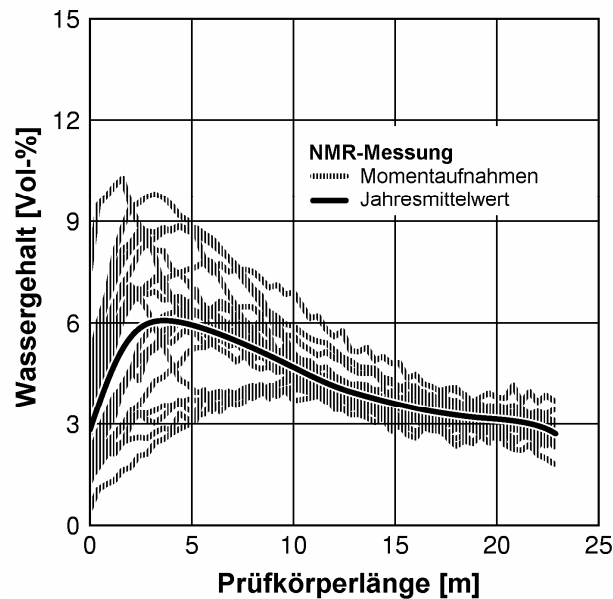
Bei Anwesenheit von Salzen können zyklische Temperatur- und Feuchteschwankungen zu einer Gefügelockerung führen, wenn die Lösungsfeuchte der Salze unterschritten wird. Bei der Bildung von Salzkristallen in den Poren entstehen Kristallisationsdrücke, die den Putz langfristig zerstören [3]. Putze mit größeren Luftporen, wie z.B. die Sanierputze nach WTA sind hier weniger gefährdet, als historische oder konventionelle Putze.

### **3. Feuchtequellen**

Neben der zyklischen Beanspruchung von Putzfassaden durch Lufttemperatur und Feuchtewechsel im Tag/Nacht-Rhythmus stellen sporadisch auftretende Feuchtequellen zusätzliche Belastungen für Putz und Anstrich dar. Solche Feuchtequellen können sowohl von außen, als auch von innen auf die Fassade einwirken.

#### **3.1 Äußere Feuchtequellen**

Schlagregen, Ablauf- oder Spritzwasser und bei hoch gedämmten Fassaden auch Tauwasser sind Beispiele für äußere Feuchtequellen. Die auftreffenden Regenmengen hängen von der Orientierung und Neigung der Bauteiloberflächen und der umgebenden Bebauung ab. Ähnliches gilt für Tauwasser, das sich in klaren Nächten auf der Fassadenoberfläche bilden kann. In beiden Fällen verringert ein entsprechender Dachüberstand die Feuchtebeanspruchung von Außenwänden. Spritzwasser tritt meist im Sockelbereich auf, der deshalb häufig einen besonders widerstandsfähigen Putz erhält. Eine besonders hohe Belastung durch Ablaufwasser weisen Putz- oder Mauerwerksbereiche unter Wasserspeichern oder wasserabweisenden Fassadenflächen (Verglasungen, Bekleidungen, hydrophobiertem Mauerwerk) auf. Hier kann nur eine konsequente Wasserableitung durch Rinnen und Rohre für Abhilfe sorgen.



*Bild 5: Mit Hilfe eines NMR-Scanners gemessene Feuchteprofile in einem schlagregenbelasteten Fassadenprüfkörper aus Naturstein [4]. Bei der Mittelung der Momentaufnahmen über ein Jahr zeigt sich, dass das langfristige Feuchtemaximum nicht an der Außenoberfläche, sondern 2 bis 3 cm dahinter auftritt. Das erklärt, warum es bei exponierten Natursteinfassaden häufig zu Schalenbildung kommt.*

### 3.1.1 Schlagregenbeanspruchung

Das auf die Fassade einwirkende Niederschlagswasser wird je nach Schlagregenintensität und Wasseraufnahmefähigkeit der Oberflächenzone ganz oder teilweise von Putz und Mauerwerk aufgenommen. Nach dem Ende eines Schlagregenereignisses trocknet die Fassadenoberfläche rasch ab, während die Zone dahinter, wie in Bild 5 zu sehen, meist längere Zeit feucht bleibt. Das Schadensrisiko ist meist dort am größten, wo der Wassergehalt im Mittel sein Maximum erreicht.

Die Schlagregenbeanspruchung ist in der Regel auf der Wetterseite am höchsten. Besonders betroffen sind hoch gelegene Fassadenflächen und solche im Bereich von Gebäudeecken und –kanten (siehe Bild 6). Auch Erker und andere Mauerwerksvorsprünge weisen eine erhöhte Schlagregenbelastung auf. Eine Verbesserung der Situation wird in der Regel durch entsprechend große Dachüberstände erreicht. Dies gilt allerdings nur für Schrägdachkonstruktionen. Horizontale Überstände bei Flachdächern schirmen zwar die senkrechte Niederschlagskomponente ebenso gut ab, die durch sie bedingten Rezirkulationsströmungen können jedoch auch eine Steigerung der Schlagregenbelastung von darunter liegenden Fassadenbereichen zur Folge haben.

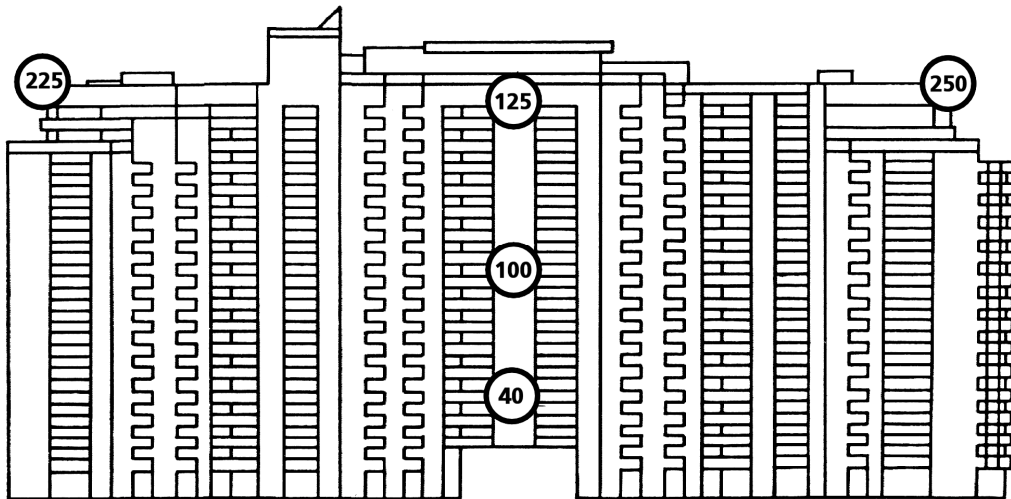


Bild 6: An verschiedenen Positionen an der Fassade eines 50 m hohen Gebäudes gemessene Schlagregenmengen, bezogen auf die Belastung in Fassadenmitte (= 100%) [5].

Häufig unterschätzt wird der Einfluss der Flächenneigung. Eine Schiefstellung der Fassade durch Ausbauchung oder Setzung der Wand sowie bei nach unten stärker werdendem Mauerwerk kann zur Vervielfachung der Niederschlagsbelastung führen, da Regen selbst bei Windstille auf die Fassade trifft. Die rechte Aufnahme des Valleyer Schlosses in Bild 7 zeigt deutlich die Schäden am Putz im oberen Teil der nach Süd-Westen orientierten Fassade. Wie in der seitlichen Ansicht derselben Fassade im linken Foto zu erkennen, hat die Wand im Bereich der Putzschäden eine deutliche Ausbauchung, die dazu führt, dass sie dort einige Grad gegenüber der Vertikalen geneigt ist.



*Bild 7: Aufnahme der süd-westorientierten Fassade des Valleyer Schosses von der Seite und von vorne. Der geneigte Bereich ist deutlich geschädigt.*

Um diesen Sachverhalt genauer untersuchen zu können wurde die herkömmliche Schlagregelmessungen an der klimatisierten Testhalle der Freilandversuchsstelle des IBP im Herbst 2004 durch Messungen auf eine geneigte Fläche ergänzt (angestrebt wird eine Neigung um  $5^\circ$ ). Dazu ist ein in die Hallenfassade integrierten Schlagregelmesser so positioniert worden, dass sein Auffanggefäß im unteren Bereich wenige Zentimeter aus der Vertikalen herausragt. Die Ergebnisse dieser Messung sind im Vergleich zu herkömmlichen Schlagregelmessung an derselben Fassade für einen Zeitraum von zwei Monaten in Bild 8 unten dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass die relativ geringe Auslenkung der Auffangfläche um nur  $5^\circ$  eine Erhöhung der Schlagregenbelastung um etwa den Faktor vier im Vergleich zur Belastung der vertikalen Fassade zur Folge hat. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit Messwerten für den Normalregen (Niederschlag auf eine horizontale Fläche im freien Feld) und die Windgeschwindigkeit senkrecht zur Testfassade im oberen Diagramm von Bild 8 zeigt, dass die geneigte Schlagregenmenge bei etwas Wind fast die Normalregenmenge erreicht.

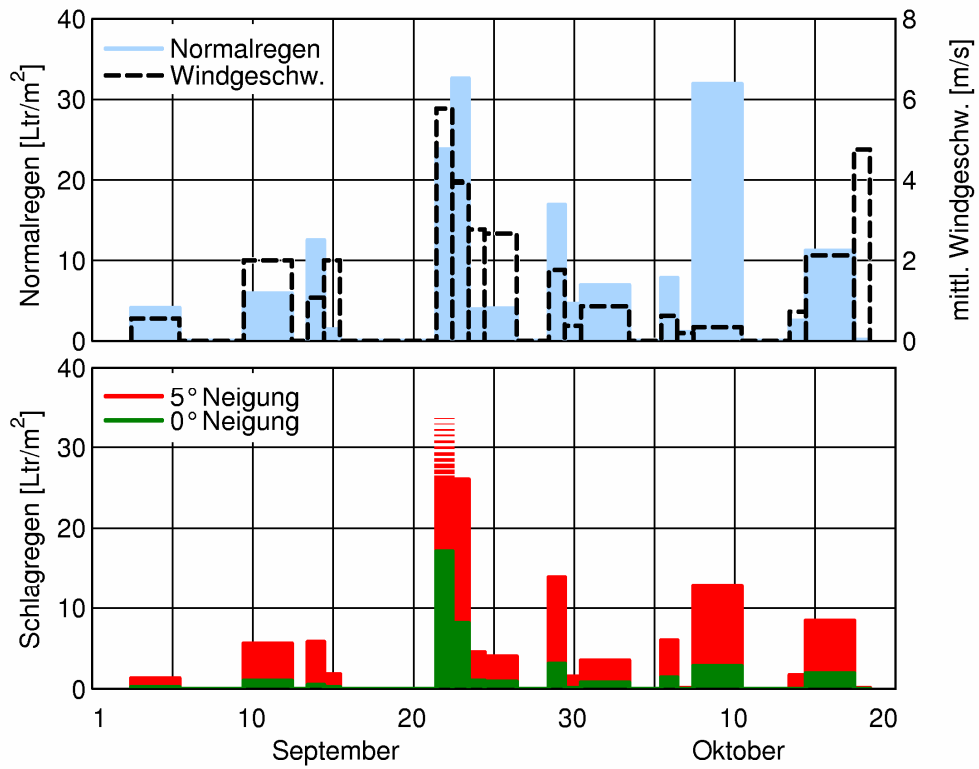


Bild 8: Schlagregenbelastung (unten) gemessen als Tagessummen (bzw. 3-Tagessummen am Wochenende) in der Mitte einer 4 m hohen nach Westen orientierten Versuchshalle mit Flachdach an vertikalen und um 5° gegenüber der Vertikalen geneigten Fassadenelementen im Vergleich zum Niederschlag auf eine horizontale Fläche und zur Windgeschwindigkeit der Westwindkomponente (oben).



*Bild 9: Mit einer Vertikalneigung von ca. 30° nach Westen orientierte WDVS-Prüfkörper nach einer Expositionszeit von zwölf Jahren. Die deutlich höhere Niederschlagsbeanspruchung durch die Neigung hat zu einer Zerstörung des Deckputzes und in der Folge zu einem starken Moosbewuchs auf der Oberfläche geführt.*

Es ist unwahrscheinlich, dass der überproportionale Anstieg der Schlagregenbelastung bei der geringen Neigung gegenüber der Vertikalen allein von der zusätzlich eingefangenen Normalregenkomponente stammt. Vielmehr ist anzunehmen, dass durch die Neigung auch ein Teil des Spitzwassers aufgefangen wird, das von der Schlagregenbelastung der Fassadenbereiche über dem Schlagregenschirm herrührt. Nach [6] spitzen ca. 30% der auf eine Fassade auftreffenden Schlagregenmenge beim Aufprall wieder zurück. Inwieweit dieses Spitzwasser für die starke Erhöhung der Niederschlagsbelastung leicht geneigter Fassadenteile verantwortlich ist, muss durch weitere Untersuchungen noch geklärt werden. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass geneigte Flächen einer wesentlichen höheren Niederschlagsbeanspruchung ausgesetzt sind als eine vertikale Fassade. Selbst moderne, wasserabweisende Putze können unter diesen Umständen versagen, wie die geneigte Auslagerung von verputzten Prüfkörpern am IBP in Bild 9 beweist.

### **3.1.1 Oberflächentauwasserbildung durch nächtliche Unterkühlung**

Während die Schlagregenbeanspruchung einer Fassade zwar von deren Orientierung aber nicht von deren wärmetechnischen Eigenschaften abhängt, bestimmen die Wärmespeicherung und die Wärmeleitung der Außenwand die anfallende Tauwassermenge in klaren Nächten. Wie bereits anhand von Bild 2 erläutert, steht die Fassadenoberfläche im langwelligen Strahlungsaustausch mit ihrer Umgebung. Da nachts keine solare Einstrahlung vorhanden ist und die atmosphärische Gegenstrahlung bei klaren Verhältnissen (keine Wolken) sehr viel kleiner ist

als die Abstrahlung herkömmlicher Fassaden, wird der Außenoberfläche Wärme entzogen. Zur Unterkühlung unter die Taupunkttemperatur der Außenluft – das ist die Voraussetzung für die Tauwasserbildung – kann es jedoch nur kommen, wenn von innen kaum Wärme nachgeliefert wird und die Außenoberflächenschicht keine ausreichende Wärmespeicherfähigkeit besitzt. Besonders stark betroffen sind deshalb hoch gedämmte Fassadenkonstruktionen mit dünnen Oberflächenschichten, die nur eine geringe Wärmekapazität aufweisen wie z.B. Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) [7].

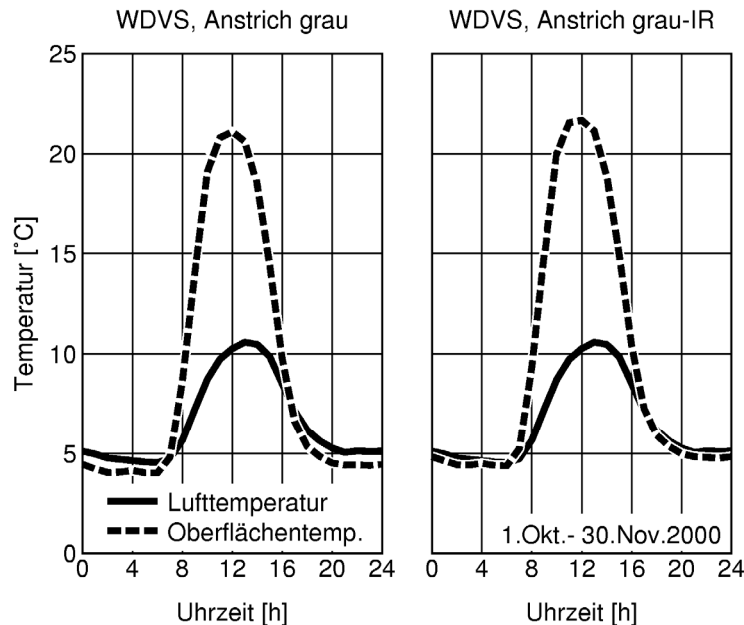


Bild 10: Mittlere Tageszyklen der gemessenen Oberflächentemperaturen von südorientierten WDVS-Versuchsfassaden mit herkömmlichem und Infrarot (IR) wirksamem Anstrich im Vergleich zum Verlauf der Außenlufttemperatur (durchgezogene Linien) [8, 9].

Dass regelmäßige Tauwasserbildung vor allem bei WDVS-Fassaden droht, zeigen die Messergebnisse an südorientierten Versuchswänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen auf Polystyrolbasis ( $U = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) in Bild 10. Dort sind analog zu Bild 3 die über einen Zeitraum von 2 Monaten gemittelten Tagesverläufe der gemessenen Putzoberflächentemperatur mit herkömmlichen und Infrarot wirksamen grau gefärbten Anstrichen im Vergleich zum mittleren Verlauf der Außenlufttemperatur dargestellt. Trotz des annähernd gleichen Wärmedämmniveaus, wie im Fall der monolithischen Ziegelwände, ist bei der Fassade mit herkömmlichem Anstrich (linke Grafik) eine deutliche Unterkühlung unter die Außenlufttemperatur feststellbar, die an den Oberflächen der Ziegelwände (siehe Bild 3) nicht beobachtet werden konnte. Da diese Unterkühlung durch die langwellige Abstrahlung hervorgerufen wird, bewirkt ein Anstrich mit reduzierter langwelliger Emission ( $\epsilon \approx 0,6$ ) eine deutliche Verbesserung der Situation, wie die rechte Grafik in Bild 10 beweist.





*Bild 11: Das in [10] als Leopard-Effekt bezeichnete Muster auf dieser Gebäudefassade ist ein eindeutiges Zeichen für mikrobiellen Bewuchs aufgrund von Tauwasserbildung.*

Die Frage, ob die nächtliche Unterkühlung von Außenwänden einen schädigenden Einfluss auf deren Putz- oder Anstrichsysteme hat, lässt sich bislang nicht ohne weiteres beantworten. Sicher ist, dass damit zusammenhängende Oberflächentauwasserbildung zu biologischem Aufwuchs auf der Fassade führen kann, wie anhand von Bild 11 zu sehen ist. Das Bewuchsmuster auf dem WDVS im Bild mit seinen hellen Flecken (in [10] als Leopard-Effekt bezeichnet) ist ein eindeutiges Zeichen für mikrobielles (z.B. Algen, Pilze oder Bakterien) Wachstum aufgrund von Tauwasserbildung. Schon Ende der 90er Jahre wurde dieses Phänomen an der EMPA in der Schweiz untersucht [11]. Dabei hat sich herausgestellt, dass in erster Linie Wärmedämm-Verbundsysteme neueren Datums betroffen sind. Eine genaue Analyse mit Hilfe der Infrarot-Thermographie hat ergeben, dass die nächtliche Oberflächentemperatur einen Indikator für den Bewuchs darstellt. Bereiche, die im Vergleich zu den bewachsenen Flächen eine um weniger als 1°C höhere Temperatur aufwiesen, wie z.B. die Putzoberfläche direkt über den als Wärmebrücke fungierenden Befestigungsdübeln, zeigten keinen Bewuchs. Ähnliches gilt für WDVS alter Art mit geringerer Dämmschichtdicke (ca. 40 mm), da ihre Oberflächentemperaturen durch die höhere Wärmezufuhr von innen über der Taupunkttemperatur der Außenluft bleiben. Damit konnte das beobachtete Bewuchsmuster eindeutig auf die nächtliche Tauwasserbildung zurückgeführt werden.



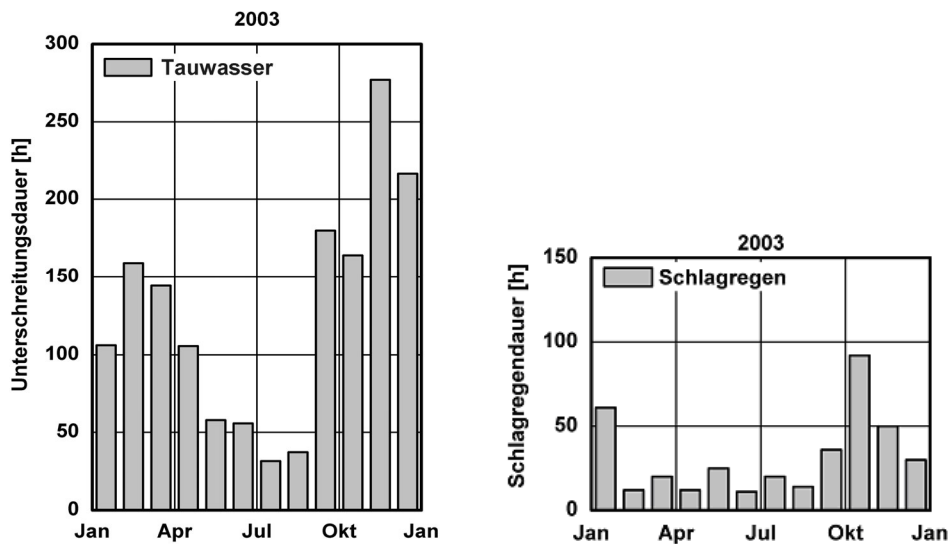


Bild 12: Dauer der Tauwasserbildung (Taupunkttemperaturunterschreitung) im Vergleich zur Schlagregendauer gemessen an einer Versuchswand mit WDVS ( $U = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) mit Dünnputz und weißem Anstrich nach [12].

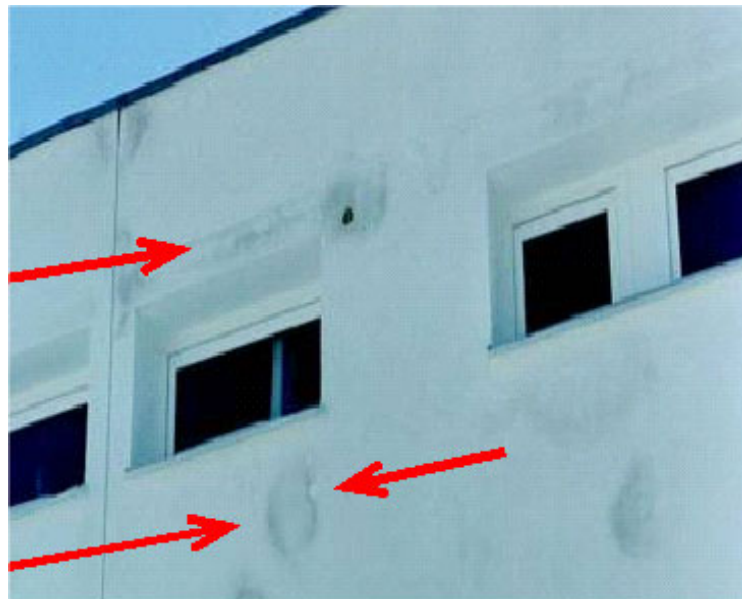
Nach Untersuchungen in [13] hängen Beginn und Fortschritt von mikrobiellem Wachstum stark davon ab, wie lange die entsprechenden Wachstumsbedingungen anhalten. Die Dauer günstiger Feuchtebedingungen, wie zum Beispiel Tauwasser auf der Bauteiloberfläche, wird in der englischsprachigen Literatur auch „Time of Wetness“ (TOW) genannt. Die TOW hängt neben den klimabedingten Feuchtelasten und Trocknungsbedingungen auch von den hygrothermischen Eigenschaften der Oberflächenmaterialien (Putz und Anstrich) und des darunter liegenden Substrates (Mauerwerk, Dämmung, etc.) ab, die unter Ziffer 4 genauer untersucht werden. Ein Vergleich der äußeren Feuchtelasten – Schlagregen und Tauwasser – ist für eine nach Westen orientierte WDVS-Fassade am Standort Holzkirchen in Bild 12 dargestellt. Offensichtlich ist die monatliche Dauer der Oberflächentauwasserbildung deutlich länger als die entsprechende Schlagregendauer. Das bedeutet jedoch noch nicht, dass auch die monatliche TOW und damit die durchschnittliche Fassadenoberflächenfeuchte aufgrund von Schlagregen immer kleiner sein muss. Da die Intensität des Schlagregens die der Tauwasserbildung weit übertrifft – die jährliche Schlagregenmenge in Holzkirchen ist etwa zehnmal größer als die jährliche Tauwassermenge auf hochgedämmten Fassaden – hängen die Feuchtebedingungen auf der Fassade entscheidend von den Feuchterückhalte- bzw. -speichereigenschaften der Oberflächenschichten ab.

### 3.2 Innere Feuchtequellen

Als innere Feuchtequellen werden hier alle Quellen bezeichnet, die der Fassade Feuchte von hinten zuführen. Dazu gehört der Transport von Raumluftfeuchte durch Dampfdiffusion oder Luftkonvektion nach außen, der allerdings nur in Ausnahmefällen eine schadensrelevante Rolle spielt. Eine solche Ausnahme stellt unverputztes Mauerwerk dar, das keine Luftdicht-

heitsebene besitzt. Feuchteschäden aufgrund von Raumlufthkonvektion durch Außenwände aus Sichtmauerwerk sind in Nordamerika ein häufiges Phänomen.

Hierzulande ist die Baufeuchte, d.h. die überhygroskopische Feuchte im Bauteil aufgrund von Wasserzufuhr vor und während des Bau- oder Sanierungsprozesses das größere Problem. Die Feuchte im Mauerwerk wandert entlang des Temperaturgradienten in der Wand in den Außenputz, dessen Wassergehalt sich dadurch stark erhöhen kann. Vor allem bei Wärmedämm-Verbundsystemen auf Mineralwollebasis kann dadurch der Oberputz geschädigt werden. Da der Feuchtestrom aus dem Mauerwerk durch die diffusionsoffene Dämmung kaum gebremst wird, schlägt sich die Baufeuchte schnell im Außenputz nieder, so dass bei Frost im ungünstigsten Fall die Gefahr großflächiger Abplatzungen besteht [14]. Auch ohne Frost kann die Baufeuchte unangenehme Nebenwirkungen entfalten, wie in [15] anhand einer neugebauten Wohnanlage aus Beton beschrieben. Die Dämmung des WDVS der Anlage besteht größtenteils aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS). Nur die Streifen über den Fenstern sind aus Brandschutzgründen in Mineralwolle ausgeführt. Wie in Bild 13 zu sehen sammelt sich dort die Baufeuchte aus dem Beton in der Putzschicht und schafft so günstige Wachstumsvoraussetzungen für Schwärzepilze. Daneben sind aber auch über die Fassade verteilte Flecken zu erkennen. Eine Beprobung der Fassade hat ergeben, dass sich diese Flecken immer in schlecht ausgeführten Stoßbereichen der EPS-Platten ergeben haben, wo entsprechende Spalte der Dampfdiffusion keine Hindernisse in den Weg legen. Die hygrothermischen Simulationsergebnisse in [15] zeigen, dass diese Stoßbereiche in Bezug auf das mikrobielle Wachstum kritischer sind als die Mineralwollestreifen, da dort die Betonfeuchte sehr viel länger erhöht bleibt. Der Feuchtenachschub aus den benachbarten Bereichen, die durch das EPS vor Austrocknung geschützt sind ist dort groß genug um Algen und Pilze lange Zeit (in diesem Fall ca. 7 Jahre lang) zu versorgen.



*Bild 13: Innerhalb kurzer Zeit durch Baufeuchte hervorgerufener Bewuchs durch Mikroorganismen auf einem Wärmedämm-Verbundsystem [15].*

#### 4. Eigenschaften von Putz- und Anstrichsystemen

Die Auswirkungen der beschriebenen hygrothermischen Beanspruchungen auf die Außenwandkonstruktion hängen stark von den Eigenschaften des Putz- und Anstrichsystems ab. Für den Regenschutz gibt es seit langem auf Freilandversuchen [16] basierende Spezifikationen. Gemäß DIN 4108-3 [17] sind in Gebieten mit starker Schlagregenbeanspruchung (Beanspruchungsgruppe III) wasserabweisende Putze und Anstriche zu verwenden. Die Beanspruchungsgruppe III umfasst alle Gebiete mit einer Jahresniederschlagssumme über 800 mm oder sehr windreiche Gebiete. Dazu zählen z.B. Küstengebiete, Mittel und Hochgebirgslagen sowie das Alpenvorland (siehe Karte in [17]). Außerdem fallen auch Gebäude in Gebieten mit mittlerer Schlagregenbeanspruchung (Gruppe II) in Gruppe III, wenn sie in exponierter Lage stehen oder die Hochhausgrenze überschreiten. Als wasserabweisend gelten Putze und Beschichtungen die sich durch eine begrenzte Wasseraufnahme auszeichnen (Wasseraufnahmekoeffizient  $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ) und gleichzeitig relativ diffusionsoffen sind (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d \leq 2 \text{ m}$ ) um eine ausreichende Trocknung zuzulassen. Außerdem gilt, dass das Produkt aus  $w$ -Wert und  $s_d$ -Wert maximal  $0,2 \text{ kg/m}\sqrt{\text{h}}$  betragen darf. Moderne Anstrichsysteme wie z.B. Silikonharzfarben bleiben deutlich unter diesen Grenzwerten, d.h. die Anforderungen an den Regenschutz stellen für heutige Putz- und Anstrichsysteme keine große Herausforderung mehr dar.

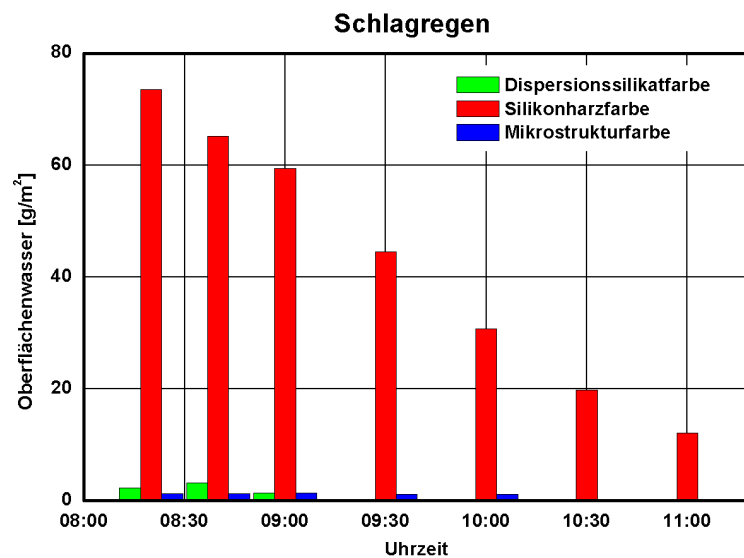


Bild 14: Bestimmung des anhaftende Oberflächenwassers bei WDVS-Versuchswänden mit unterschiedlichen Anstrichen während einer Regenperiode mit Hilfe von speziellen Saugtüchern [12].

Die Schlagregenschutzanforderungen in der Wärmeschutznorm DIN 4108 sollen verhindern, dass die Wärmedämmwirkung von Außenwänden beeinträchtigt wird. Gleichzeitig sind sie so ausgelegt, dass sie auch Frostschäden vorbeugen. Für die Beurteilung des mikrobiologischen Wachstumsrisikos ist jedoch weniger der Wassergehalt der Wand sondern vielmehr die Oberflächenfeuchte von Bedeutung. Deshalb wurden am IBP umfangreiche Untersuchungen zur

Feuchte auf Fassadenoberflächen durchgeführt [12], von denen einige Ergebnisse hier exemplarisch dargestellt werden. Betrachtet werden nach Westen orientierte Versuchswänden mit Wärmedämmverbundsystem ( $U = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und unterschiedlichen Anstrichen auf Dünnputz. Als Vertreter von wasserabweisenden mineralischen Systemen wurde eine Dispersionssilikatfarbe gewählt. Die Silikonharzfarbe kann als repräsentativ für stark hydrophobe Anstriche angesehen werden. Außerdem wurde eine Beschichtung mit mikrostrukturierter Oberfläche in die Untersuchung einbezogen, die sich neben einer starken Hydrophobie durch eine schmutzabweisende Wirkung (Herstellerangabe) auszeichnet. An diesen Versuchswänden wurde zu bestimmten Zeitpunkten die Menge des anhaftenden Oberflächenwassers mit Hilfe spezieller Saugtücher ermittelt. Bild 14 zeigt beispielhaft die Ergebnisse, die während einer morgendlichen Regenperiode im Abstand von 20 bis 30 Minuten durch Beprobung mit den definierten Saugtücher erzielt wurden.

Die höchste Oberflächenfeuchte zeigt die Silikonharzfarbe. Aufgrund der starken Hydrophobie wird das Niederschlagswasser nicht vom Untergrund aufgesaugt sondern verbleibt auf der Fassade, wo es gegen Ende der Regenperiode langsam wieder abtrocknet. Sowohl die Dispersionssilikatfarbe als auch die mikrostrukturierte Beschichtung weisen nur wenig Oberflächenwasser auf – allerdings aus unterschiedlichen Gründen. Im ersten Fall wird das überschüssige – d.h. das nicht ablaufende – Wasser vom Untergrund aufgesaugt, im zweiten Fall perlt es wegen der speziellen Mikrostruktur von der Oberfläche ab und fällt zu Boden.

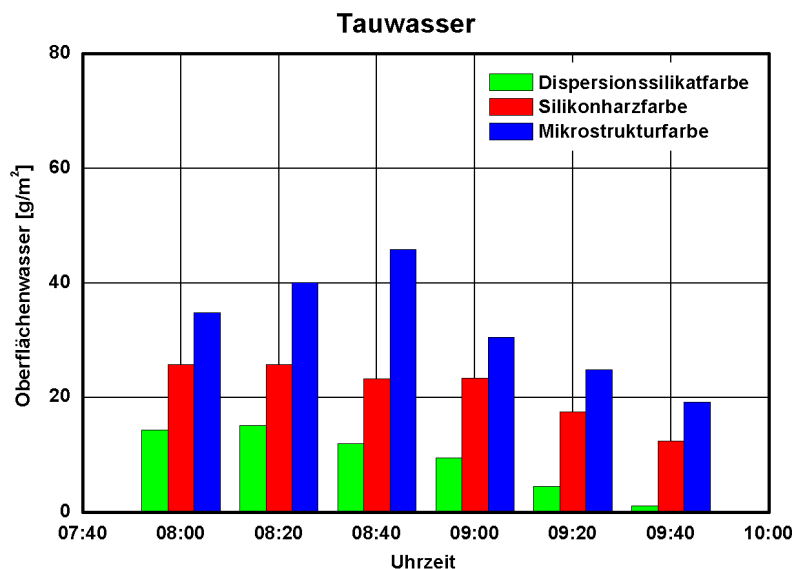


Bild 15: Bestimmung des anhaftende Oberflächenwassers bei WDVS-Versuchswänden mit unterschiedlichen Anstrichen während der morgendlichen Betauung mit Hilfe von speziellen Saugtüchern [12].

Etwas anders liegen die Verhältnisse, wenn das Oberflächenwasser nicht von relativ großen Regentropfen herrührt, sondern durch Dampfdiffusion mit anschließendem Phasenwechsel (Betauung) verursacht wird. In Bild 15 sind die Ergebnisse der Oberflächenfeuchtemessung

während einer morgendlichen Btauungsperiode dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Oberflächenfeuchte kurz nach 8<sup>00</sup> Uhr morgens (nach Sonnenaufgang) noch zunimmt. Dies lässt sich durch den bereits in Bild 1 gezeigten Anstieg der absoluten Luftfeuchte unmittelbar nach Sonnenaufgang erklären. Diesmal ist die Oberflächenfeuchte bei der mikrostrukturierten Beschichtung am höchsten. Im Gegensatz zu den Regentropfen perlen die kleineren Tauwassertropfchen nicht ab, sondern verbleiben auf der Oberfläche. Nicht wesentlich besser ist die Situation bei der Silikonharzfarbe, während die Dispersionssilikatfarbe am schnellsten eine trockene Oberfläche aufweist. Dies ist auf ihre etwas geringere Hydrophobie zurückzuführen, so dass ein Teil des Oberflächentauwassers durch Kapillartransport vom Untergrund aufgenommen wird.

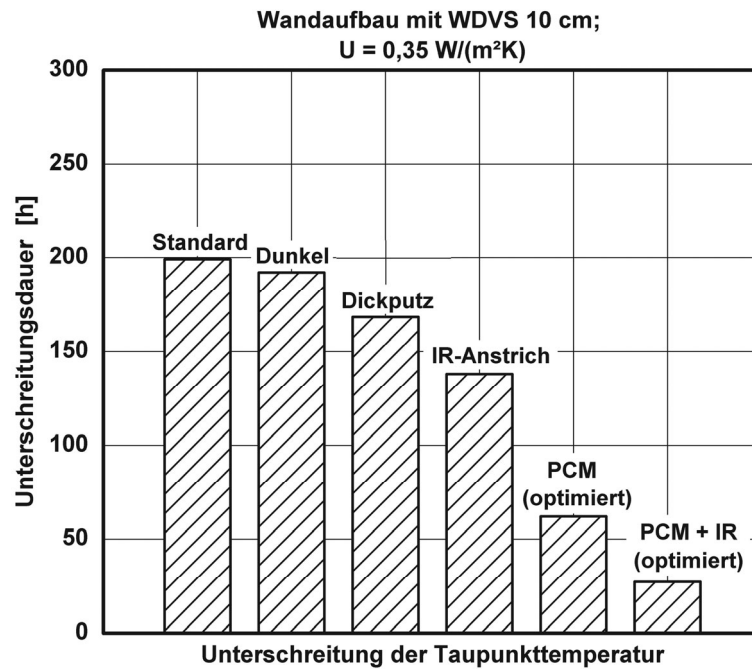


Bild 16: Mit Hilfe der hygrothermischen Simulation ermittelte Btauungszeiten in den Monaten September und Oktober an der Oberfläche eines WDVS in Abhängigkeit von der Ausrüstung von Putz und Anstrich [12].

## **5. Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die bauphysikalischen Beanspruchungen und die hygrothermischen Eigenschaften von Putz- und Anstrichsystemen haben einen großen Einfluss auf das Feuchteverhalten und damit die Dauerhaftigkeit von Außenwänden. Der Schlagregen sowie bei gut gedämmten, leichten Fassaden auch die Oberflächenbetaung stellen dabei die wichtigsten Feuchtebeanspruchungen dar. Eine Feuchtebelastung von innen ist mit Ausnahme der Austrocknungsphase von Baufeuchte eher selten. Während sich die Bauphysik schon seit Jahrzehnten mit dem Schlagregenschutz von Putz- und Anstrichsystemen beschäftigt, hat der Schutz vor Oberflächentauwasser erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Entsprechend rudimentär sind die Kenntnisse darüber, wie diesem Problem am besten zu begegnen ist. Putz- und Anstrichsysteme, die einen hervorragenden Schlagregenschutz bieten, sind häufig ziemlich wirkungslos, wenn es um die Vermeidung von Oberflächentauwasser geht. D.h. es müssen in Zukunft neue Ansätze entwickelt werden.

In [12] wurden einige dieser neuen Ansätze, wie z.B. die Erhöhung der Wärmekapazität des Putzes durch Phasenwechselmaterialien, sog. PCM (Phase Change Material) oder die Verringerung der langwelligen Abstrahlung durch Infrarot wirksame Anstriche, rechnerisch und messtechnisch untersucht. Ein Ergebnis daraus, das mit Hilfe der hygrothermischen Simulation unter Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches gewonnen wurde ist in Bild 16 dargestellt. Ausgehend von einer Fassade mit Wärmedämm-Verbundsystem mit EPS-Dämmung und Dünnputz (Standardfall) wurde die Dauer der Betaung (Bildung von Oberflächentauwasser bei Unterschreiten der Oberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur der Außenluft) für unterschiedliche Varianten berechnet. Während ein dunkler Anstrich kaum Vorteile bietet, ist die etwas höhere Wärmespeicherfähigkeit eines Dickputzes schon spürbar. Noch deutlicher ist die Verminderung der Betaungsdauer bei Verwendung eines IR-wirksamen Anstrichs. PCM im Putz können bei entsprechender Menge die mittlere Betaungsdauer am effektivsten verkürzen. Allerdings wurde hier vorausgesetzt, dass ihr Schmelzpunkt optimal an die klimatischen Randbedingungen angepasst wurde. Durch eine Kombination von IR-Wirksamkeit und PCM lässt sich naturgemäß das beste Ergebnis erzielen. Obwohl die neuen Ansätze zur Reduzierung der Oberflächentauwasserbildung ein viel versprechendes Potential besitzen, sind bis zu ihrer Praxisreife noch eine ganze Reihe von Hürden zu nehmen. Bis dahin bleibt nur die Bekämpfung der Symptome, die das Oberflächentauwasser nach sich zieht, wie z.B. die Filmkonservierung von Anstrichen zur Vermeidung von vorzeitiger Algen- oder Schwärzepilzbildung.

---

## 6. Literatur

- [1] Sedlbauer, K. und Künzel, H.M.: *Frostschäden im Winter – Analyse durch feuchte-technische Berechnungen am Beispiel einer Kalksandsteinwand*. IBP-Mitteilung 26 (1999), Nr. 351
- [2] Riedl, G. und Kießl, K.: *Untersuchungen an natürlich bewitterten Prüfkörpern und Versuchswänden mit unterschiedlich aufgebauten Wärmedämmverbundsystemen*. IBP-Bericht FtB-27/1994.
- [3] Arnold, A.: *Salze: Lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache?* Jahresbericht Steinzerfall - Steinkonservierung 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992
- [4] Krus, M., Künzel, H.M. und Kießl, K.: *Feuchtetransport in Stein und Mauerwerk*. Bau-forschung für die Praxis Band 25, IRB-Verlag, Stuttgart 1996.
- [5] Schwarz, B.: *Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden*. HLH 24 (1973), H. 12, S.376-384.
- [6] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Universität Stuttgart 1994.
- [7] Künzel, H.M. und Sedlbauer, K.: *Algen auf Wärmedämm-Verbundsystemen*. IBP-Mitteilung 28 (2001) Nr. 382.
- [8] Kießl, K.: *Wie beeinflussen IR-wirksame Beschichtungen das thermische Verhalten von Außenwänden?* Bauphysik-Symposium zum 60. Geburtstag von Prof. Gertis, Sindelfingen 1998.
- [9] Leonhardt, H. und Sinnesbichler, H.: *Untersuchungen des langwelligen Wärmestrahlungsverhaltens von Fassadenanstrichen im Winter*. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik RK-ES-05/2000.
- [10] Venzmer, H., Lesnych, N. und Kots, L.: *Nicht bestellt und dennoch frei Haus: Grüne Fassaden nach der Instandsetzung durch Wärmedämmverbundsysteme?* Tagungsband Altbauinstandsetzung 3, Verlag Bauwesen Berlin 2001, S. 48-58.
- [11] Blaich, J.: *Außenwände mit Wärmedämm-Verbundsystem, Algen- und Pilzbewuchs*. Deutsches Architektenblatt 31 (1999), H.10, S.1393-1394.
- [12] Fitz, C. et al.: *Prognoseverfahren zum biologischen Befall durch Algen, Pilze und Flechten an Bauteiloberflächen auf Basis bauphysikalischer und mikrobieller Untersuchungen*. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik HTB-03/2005.
- [13] Sedlbauer, K.: *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [14] Künzel, H.M.: *Bauphysik der Außenwände - Austrocknung unter WDVS*. Kongreß-Handbuch zum 2. IBK-Jubiläumskongreß Wärmedämmverbundsysteme, S. 29/1-29/9, Darmstadt 1997.
- [15] Sedlbauer, K. und Krus, M.: *Schimmelpilze auf WDVS infolge Baufehler?* IBP-Mitteilung 28 (2001), Nr. 391.

- 
- [16] Künzel, H.: *Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen im Zusammenhang mit Anstrichen auf Außenputzen*. Zement-Kalk-Gips 19 (1966), H. 1, S. 17-29.
- [17] DIN 4108-3: *Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Juli 2001, Berichtigung 1 April 2002.