Multipor Mineraldämmplatte

# Was ist Kapillaraktivität?

multipor

# Vorwort

Die vorliegende Broschüre widmet sich der in der modernen Bauphysik häufig gestellten Frage nach der sicheren Anwendung von Innendämmsystemen. Dass die Innendämmung heute schon längst eine allgemein anerkannte Art der Verbesserung der energetischen Qualität von alten Konstruktionen ist, deren Fassadenantlitz möglichst erhalten bleiben soll, ist unbestritten. Genauso ist aber der Umstand gegenwärtig, dass mit dieser Dämmungsart neue Herausforderungen an eine dauerhafte und schadensfreie Konstruktion gestellt werden. Diese Broschüre wird sich vor allem auf den hygrischen Teil dieser Herausforderungen konzentrieren. Während sich der erste Teil vor allem um die bestehenden normativen Grundlagen der Innendämmung kümmert und die dabei zu beachtende Notation eingrenzt, sind die dann folgenden Abschnitte darauf konzentriert, einen fachlich offenen und zugleich streitbaren Beitrag zur Frage der erforderlichen Kapillaraktivität von Innendämmungen zu leisten. Warum gerade die Kapillaraktivität? In der fachlichen Diskussion der Frage, welches Innendämmsystem denn nun das dauerhafteste und sicherste sei, hat sich sehr schnell für all die Systeme, die ohne raumseitig dampfsperrende Maßnahmen auskommen können, eine Kernfrage herausgestellt: Wie umfangreich kann Feuchtigkeit gespeichert und zu einem trockneren Bereich transportiert werden. Da es noch keine allgemein anerkannte Regel der Technik dazu gibt, sind die Antworten darauf genauso vielfältig wie in vielen Fällen auch falsch. So sind Versuche zur Wasseraufnahme von Dämmstoffen teils völlig unkritisch zur Beurteilung ihrer Fähigkeit, Wasser im Inneren des Materials zu transportieren, benutzt worden. Hohe Werte des kapillaren Wassertransportes sind recht schnell und unkritisch zu einer Qualitätseigenschaft von Dämmsystemen hochstilisiert worden, ohne dass ein kritischer Blick auf die maßgebenden baulichen Verhältnisse vorweggeschickt wurde.

**Broschüre** Was ist Kapillaraktivität?

**Autoren** Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft GmbH:
Dipl.-Ing. T.Schoch
Dr. Gregor A. Scheffler
TU Dresden:
Dr. Rudolf Plagge

# Inhalt


**1. Einleitung 4**

**2. Innendämmung und Bauphysik 5**

**2.1 Dampfdruck, Temperatur und relative Luftfeuchte ... 5**
**2.2 Diffusionsbremsende Innendämmung ... 6**
**2.3 Diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmung ... 7**
**2.4 Rechnerischer Nachweis ... 8**

**3. Fachtermini im Kontext der Innendämmung 9**

**3.1 Analyse der Wortbedeutung ... 10**
3.1.1 Kondensat, Taupunkt und Tauebene ... 10
3.1.2 Kapillaraktivität ... 12

**3.2 Begriffskontext Innendämmung ... 13**
3.2.1 Kondensat, Taupunkt und Tauebene ... 13
3.2.2 Kapillaraktivität und kapillarer Rücktransport ... 14

**3.3 Weiterführende Diskussion ... 15**
3.3.1 Wieviel Kapillaraktivität ist erforderlich? ... 15
3.3.2 Woran lässt sich Kapillaraktivität messen? ... 16

**4. Anwendungsbeispiel 18**

**4.1 Ungestörte Wand stationär ... 18**
**4.2 Fensteranschluss stationär und instationär ... 20**

**5. Zusammenfassung 22**

**6. Referenzen 23**

# 1. Einleitung

Die Reduzierung des Gebäudeenergiebedarfes und der damit verbundenen $CO_2$-Emmissionen steht in zentralem Interesse unserer heutigen Gesellschaft. Im Bereich von Energieerzeugung und Anlagentechnik wurden in den zurückliegenden Jahren zahlreiche Entwicklungen zur Effizienzsteigerung erfolgreich umgesetzt und am Markt etabliert. Beispiele finden sich in der Solarthermie, der Photovoltaik, dem Einsatz von Wärmepumpen, mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder auch in der Kraft-Wärme-Kopplung.

Noch wichtiger als die effiziente Energieerzeugung ist die Reduzierung des Energieverbrauches von Gebäuden. Die energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle von Neubauten sind aus diesem Grund in den vergangenen Jahren deutlich verschärft worden. Eine weitere Verschärfung der gesetzlichen Regelungen ist anhand der Europäischen Energieeffizienzrichtlinie (EPBD) bis 2020 absehbar.

Mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2002 wurden erstmals auch energetische Anforderungen an den Gebäudebestand formuliert, womit dem enormen Potenzial der energetischen Bestandssanierung hinsichtlich der Reduktion von Energieverbrauch und $CO_2$-Emmissionen Rechnung getragen wurde. Bild 1 zeigt dieses Potenzial auf der Grundlage einer Studie, die 2007 veröffentlicht wurde [1].

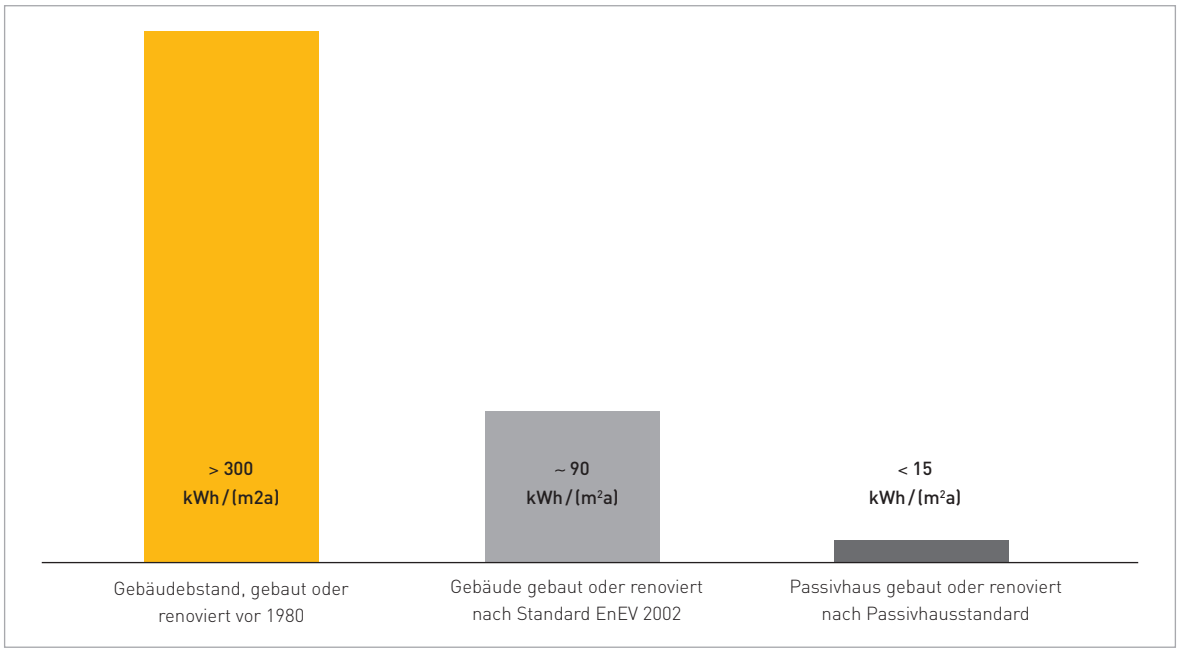


**Bild 1: Typischer Gebäudeenergiebedarf in Abhängigkeit der zur Bau-, bzw. Sanierungszeit gültigen energetischen Anforderungen (nach [1])**

Durch entsprechende Maßnahmen zur Wärmedämmung können die Energieverluste erheblich reduziert und damit verbunden eine Entlastung der Umwelt erzielt werden. Dies geht einher mit Kosteneinsparungen bei der Gebäudenutzung, denen Investitionen in die Bausubstanz gegenüberstehen. In den meisten Fällen überwiegen die finanziellen Vorteile einer thermischen Sanierung, so dass sich die Umsetzung von Wärmedämmmaßnahmen für den Bauherrn rentiert.

Die Dämmung von Bestandsgebäuden wird in der Praxis zum Teil nach wie vor kontrovers diskutiert, da Fehler bei der Planung oder eine unsachgemäße Ausführung in der Vergangenheit zu Bauschäden wie Feuchte, Algenbildung, Korrosion, Fäulnis, Frostschäden oder Schimmelbildung geführt haben.

Besonders kontrovers wird dabei die Innendämmung diskutiert, die dann zur Anwendung kommt, wenn aus verschiedenen Gründen eine Dämmung von außen nicht möglich oder nicht sinnvoll ist.

Viele Architekten und Planer scheuen sich noch immer, eine Innendämmung auszuführen, sei es aufgrund der Vielfalt und raschen Entwicklungen im Bereich der Innendämmsysteme, oder sei es aufgrund historisch gewachsener Vorbehalte gegenüber dieser Bauweise, die auf unzureichende rechnerische Nachweisformen in den 70er und 80er Jahren zurückgehen.

Fakt ist, dass die Innendämmung einen enormen Beitrag zur gesellschaftlichen Aufgabe der Energieverbrauchsreduktion leisten kann und wird. Fakt ist aber auch, dass es Ängste und Vorbehalte bei Planern, Ausführenden und Bauherren gegenüber der Innendämmung gibt. Hier aufzuklären und für Anwendungssicherheit zu sorgen ist Aufgabe sowohl der Industrie, als auch der Bildungseinrichtungen und Hochschulen.

# 2. Innendämmung und Bauphysik

Eine Innendämmung wird häufig kritisch betrachtet, weil sie zu Feuchteproblemen führen kann. Die klassische Ursache dafür ist der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Dampfdruck bzw. der relativen Luftfeuchte, der dazu führt, dass sich im Winter ein Dampfdiffusionsstrom in die Dämmung hinein einstellt, der entweder unterbunden oder vom Dämmsystem aufgenommen werden muss.

Dieser Abschnitt gibt zunächst eine Einführung in die bauphysikalischen Hintergründe, stellt die beiden Hauptgruppen von Innendämmsystemen vor und zeigt die Grundzüge rechnerischer Nachweismöglichkeiten auf.

## 2.1. Dampfdruck, Temperatur und relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte ist definiert als das Verhältnis aus aktueller Feuchtemasse in der Luft zur maximal möglichen Feuchtemasse. Die maximal von der Luft aufnehmbare Feuchtemasse hängt exponentiell von der Temperatur ab, so dass Luft bei 20 °C deutlich mehr Feuchte aufnehmen kann als Luft bei beispielsweise 0 °C, nämlich 17,5 g Wasser/m³ Luft im Vergleich zu 4,8 g Wasser/m³ Luft.

Die thermodynamische Größe, mit der dieser Zusammenhang häufig dargestellt wird, ist der Partialdruck des Wasserdampfes, kurz Dampfdruck. Der Partialdampfdruck ergibt sich dabei relativ zum maximal möglichen Sättigungsdampfdruck. Der Sättigungsdampfdruck wiederum ist eine exponentielle Funktion der Temperatur und beschreibt die Feuchtemenge, die bei jeweiliger Temperatur maximal von der Luft aufgenommen werden kann. Skaliert man diese Funktion, ergeben sich die entsprechenden Dampfdrucklinien für unterschiedliche relative Luftfeuchten, wie in Bild 2 dargestellt.

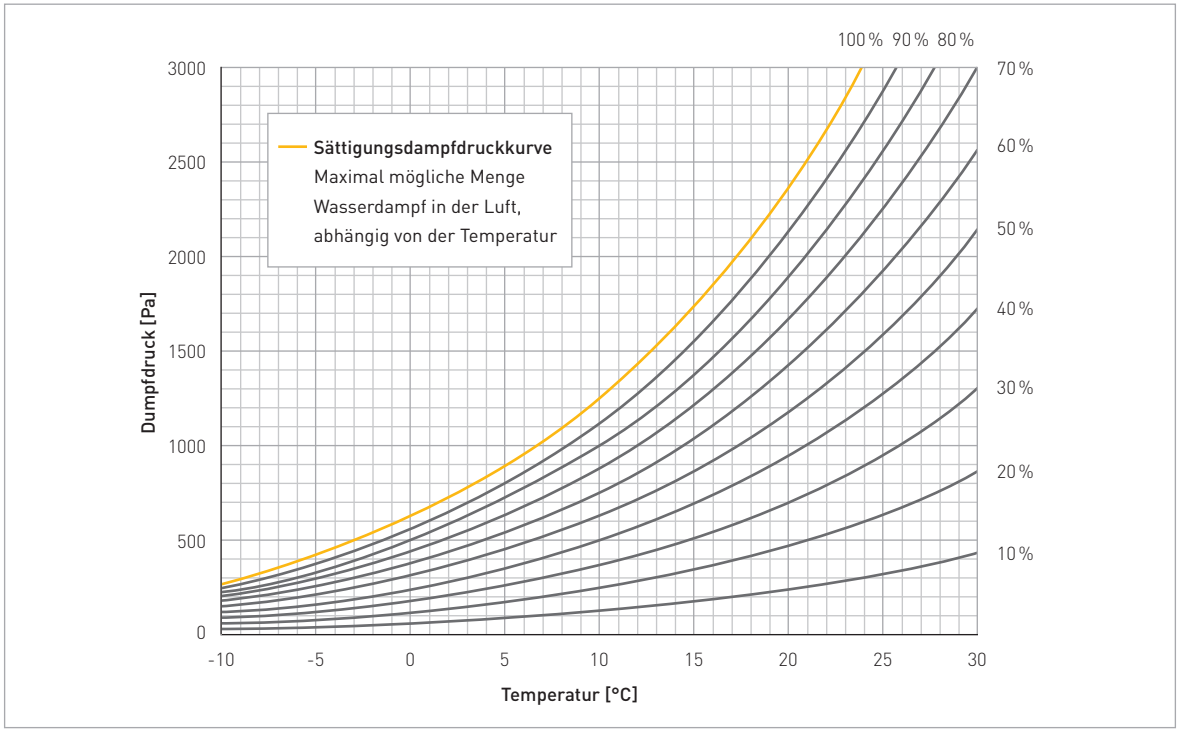


**Bild 2: Sättigungsdampfdruck als Funktion der Temperatur und entsprechende Dampfdruckverläufe für verschiedene relative Luftfeuchten.**

Für die Dampfdiffusion ist der Dampfdruckunterschied die treibende Kraft, wobei sich der Wasserdampf von hohen zu niedrigen Dampfdrücken bewegt. Bei konstanter Temperatur hängt der Dampfdruck linear von der relativen Luftfeuchte ab. Besteht zusätzlich ein Temperaturunterschied, kommt die in Abb. 2 dargestellte exponentielle Abhängigkeit hinzu. Diese führt dazu, dass sich ein Dampfdiffusionsstrom von hohen zu niedrigen Temperaturen einstellt, selbst wenn die relative Luftfeuchte auf der warmen und kalten Seite identisch ist (vgl. in Bild 2 die Dampfdrücke bei 50 % relativer Luftfeuchte bei 20 °C und bei 0 °C).

Bei einer Innendämmung liegt die Schicht mit dem größten Temperaturgradienten – die Wärmedämmung – an der Innenseite der Wand und ist damit dem Raumklima ausgesetzt. Schon allein aufgrund des großen Temperaturunterschiedes stellt sich ein dem Temperaturverlauf folgendes Dampfdruckgefälle ein, das einen Diffusionsstrom in die Wand hinein zur Folge hat.

Entsprechend gibt es für die Ausführung einer Innendämmung zwei prinzipielle Möglichkeiten, diesem Phänomen zu begegnen:

1. Diffusionsbremsende Systeme, wie beispielsweise Mineralwolle mit Dampfbremsfolie oder nahezu diffusionsdichte Kunststoffschäume. Diese Innendämmsysteme verhindern einen Dampfdiffusionsstrom in die Wand hinein. Sie verhindern dadurch jedoch auch eine Austrocknung der bestehenden Wandkonstruktion nach innen.
2. Diffusionsoffene, sogenannte kapillaraktive Innendämmsysteme. Diese Systeme erlauben im Winter einen Dampfdiffusionsstrom in die Wand hinein, nehmen die anfallende Feuchtigkeit auf und transportieren sie in flüssiger Form in Richtung Innenoberfläche zurück. Dadurch wird einerseits das Feuchteniveau in der Wand dauerhaft auf ein unkritisches Maß reduziert, andererseits bleibt die Wand diffusionsoffen und kann damit sowohl Feuchtespitzen aus der Raumluft abpuffern, als auch erhöhte Feuchtelasten der Bestandskonstruktion nach innen austrocknen.

Beide Varianten werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Wirkmechanismen vorgestellt.

## 2.2. Diffusionsbremsende Innendämmung

Das Prinzip der diffusionsbremsenden Innendämmung ist in Bild 3 dargestellt. Angedeutet ist eine Mauerwerkswand, auf die eine Innendämmung, beispielsweise mit Mineralwolle, aufgebracht wurde. Um den Dampfdiffusionsstrom in die Dämmung zu unterbinden, muss ein solches System mit einer dampfbremsenden Folie auf der Rauminnenseite ausgeführt werden. Den raumseitigen Abschluss bildet in der Regel eine mit Bauplatten (z. B. Gipsfaserplatten) hergestellte Schicht, die gleichfalls eine Schutzfunktion gegen mechanische Beschädigung der Folie übernimmt.

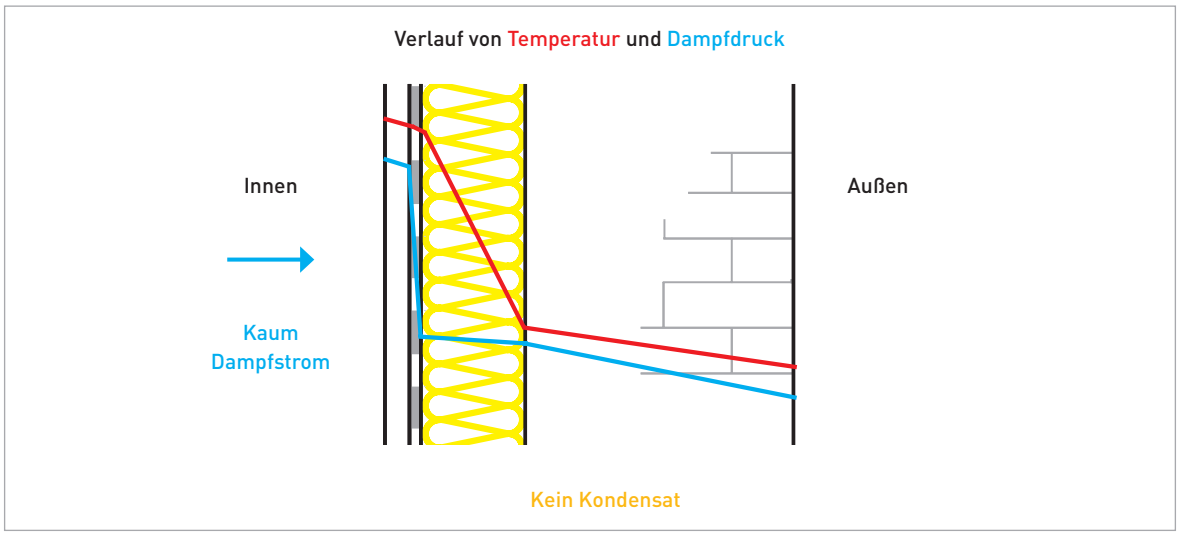


**Bild 3: Prinzipskizze zur Funktionsweise einer diffusionsbremsenden Innendämmung. Der Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein wird durch die Dampfbremsfolie weitestgehend unterbunden. Eine Austrocknung nach innen ist damit kaum möglich.**

Anhand von Bild 3 wird deutlich, dass der Diffusionswiderstand der Dampfbremsfolie ausreichend groß sein muss, damit es nicht zu einer Kondensatbildung an der kalten Seite der Dämmung und damit zu einer möglichen Beeinträchtigung sowohl der Bestandskonstruktion, als auch des Dämmstoffes und dessen Dämmwirkung kommen kann. Ein solches System erfordert deshalb sehr große Sorgfalt bei der Ausführung, insbesondere bei Folienstößen, Anschlüssen (Fenster, Fußboden, Decke) und Durchbrüchen (Rohrleitungen, Steckdosen, etc.).

Nachteilig ist die gleichzeitig gewünschte diffusionsbremsende Eigenschaft. Denn zum einen kann eine so ausgeführte Wandkonstruktion kaum zur Abpufferung von Raumluftfeuchteschwankungen beitragen, was zu einer in Spitzenzeiten erhöhten relativen Raumluftfeuchte führt. Zum anderen verhindert ein derartiger Aufbau auch eine mögliche Austrocknung der Bestandskonstruktion nach innen, wie sie insbesondere bei Ziegel- oder Fachwerkkonstruktionen benötigt wird.

## 2.3. Diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmung

Das Prinzip einer diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung ist in Bild 4 dargestellt. Auf einer bestehenden Mauerwerkswand wird das Innendämmsystem aufgebracht, das aus den kapillaraktiven Dämmplatten und einem Klebemörtel zur Befestigung auf der Bestandskonstruktion besteht. Den inneren Wandabschluss bildet in der Regel ein Dünnputz oder eine Verspachtelung. Aber auch eine raumseitige Ergänzung mit Gipsfaserplatte (z. B. zur Aufnahme von Wandfliesen) ist möglich.

Kapillaraktive Dämmplatten, wie beispielsweise Multipor Mineraldämmplatten, erfüllen drei bauphysikalische Eigenschaften. Sie sind wärmedämmend, diffusionsoffen und besitzen die Eigenschaft, Wasser schon bei geringen Feuchtegehalten auch in flüssiger Form transportieren zu können. Diese sogenannte Kapillaraktivität ist der Schlüssel zur Funktionsweise des Dämmsystems.

Während bei der diffusionsbremsenden Innendämmung entweder ein System (Faserdämmstoff und Dampfbremsfolie) oder ein einzelner Baustoff (Kunststoffschaum) die Eigenschaften für Wärmedämmung und Diffusionswiderstand mitbringen, funktioniert die kapillaraktive Innendämmung immer als Baustoffsystem. Dieses besteht aus dem diffusionsoffenen, kapillaraktiven Dämmstoff und dem zugehörigen Klebemörtel. Der Klebemörtel muss im Vergleich zum Dämmstoff eine höhere Wärmeleitfähigkeit, einen größeren Diffusionswiderstand und eine geringere Flüssigwasserleitfähigkeit besitzen.

Der Hintergrund für diese Eigenschaftskombination ist das Prinzip der kapillaraktiven Innendämmung. Im Winter stellt sich, wie oben bereits erläutert, ein deutliches Temperaturprofil über der Dämmschicht ein. Dieses sorgt für einen Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein. In dessen Folge nimmt die relative Luftfeuchte zu und es lagert sich verstärkt Feuchtigkeit innerhalb der Dämmung an. Der Taupunkt (100 % Luftfeuchte) wird für die meisten kapillaraktiven Dämmstoffe gar nicht erreicht, weil sich die Feuchtigkeit aufgrund der sorptiven Materialeigenschaften bereits vorher anlagert und damit einen Flüssigwasserfilm auf den inneren Materialoberflächen bildet. Mit zunehmendem Wassergehalt ermöglicht dieser Wasserfilm einen Flüssigtransport.

Die Veränderung der Materialeigenschaften beim Übergang von Dämmstoff zu Klebemörtel – die im Vergleich zum Dämmstoff größere Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit dem größeren Diffusionswiderstand des Klebemörtels – sorgen dafür, dass die Feuchteanlagerung in jedem Fall innerhalb der Dämmung stattfindet. Auf diese Weise kann die Feuchtigkeit vom Dämmstoff aufgenommen und in flüssiger Form zur raumseitigen Wandoberfläche zurücktransportiert werden.

Die treibende Kraft für den Flüssigwassertransport ist der Kapillardruckunterschied. Innerhalb eines Materials ist dies vereinfachend gleichbedeutend mit dem Wassergehaltsunterschied. Der Transport findet von höheren Feuchtegehalten in Richtung niedrigerer Feuchtegehalte statt. In Bild 4 ist das als Flüssigtransport von der kalten Seite der Dämmung zurück zur Raumseite hin angedeutet.

Die treibende Kraft für den Dampftransport ist der Konzentrations- bzw. Dampfdruckunterschied, der von der relativen Luftfeuchte, vor allem aber von der Temperatur abhängt. Der Transport findet von höheren Temperaturen in Richtung niedrigerer Temperaturen statt. In Bild 4 ist der Dampftransport von der Raumseite (innen) in die Konstruktion hinein angedeutet.

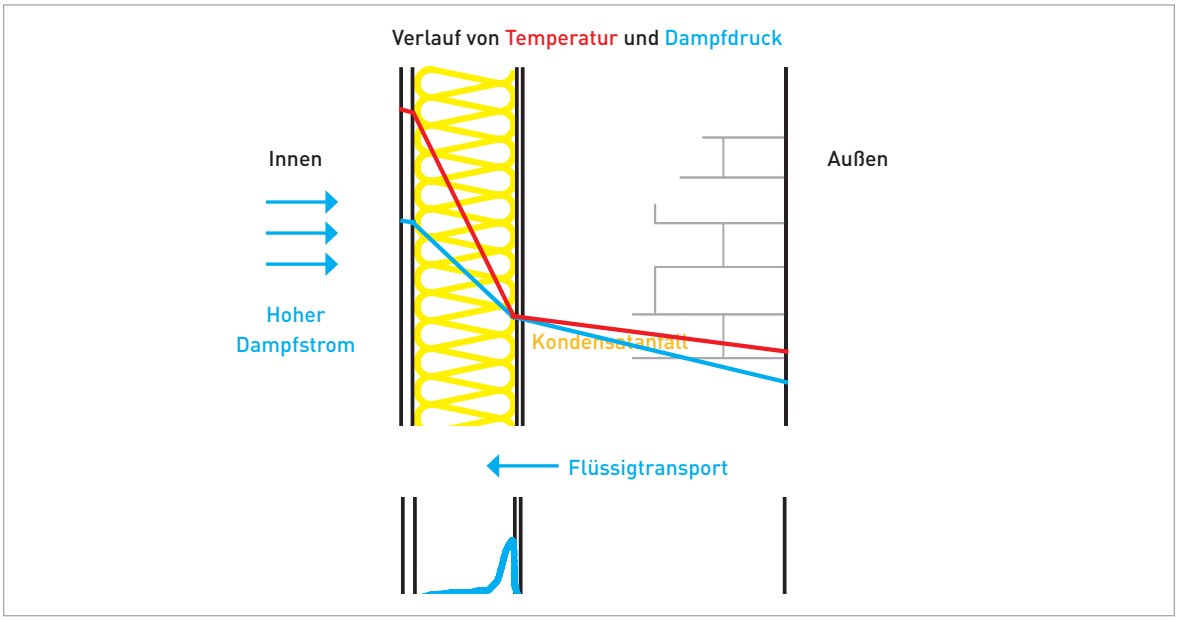


**Bild 4: Prinzipskizze zur Funktionsweise einer diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung. Der Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein wird explizit erlaubt. Die Feuchtigkeit lagert sich sorptiv im Dämmsystem an und wird in flüssiger Form (kapillar) zurück an die raumseitige Oberfläche transportiert. Das Feuchteniveau wird dauerhaft gering gehalten und eine Austrocknung nach innen ist problemlos möglich.**

Aufgrund der Tatsache, dass beide Transportmechanismen unterschiedlichen Gradienten folgen, können sie gleichzeitig entgegengesetzt ablaufen.

Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Dampfdiffusion in die eine und dem Flüssigtransport in die andere Richtung ein. Auf diese Weise wird das Feuchteniveau in der Wand gering gehalten und gleichzeitig das Raumklima positiv beeinflusst.

Der Diffusionswiderstand des Klebemörtels ist größer als jener der Dämmung. Die Größenordnung einer Dampfbremse hat er jedoch nicht. Denn damit ist es möglich, dass die Bestandskonstruktion im Sommer nicht nur nach außen, sondern auch durch das Innendämmsystem hindurch nach innen abtrocknen kann.

Die zweite wichtige Eigenschaft, die der Klebemörtel mitbringt, ist die Flüssigwasserleitfähigkeit. Diese muss geringer sein als jene der Dämmung, damit die an der Grenze von Kleber und Dämmung akkumulierte Feuchtigkeit von der Dämmung, und nicht vom Klebemörtel aufgenommen wird.

Bei diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmsystemen ist es demnach wichtig, dass Dämmstoff und Klebemörtel aufeinander abgestimmt sind. Beim Innendämmsystem mit Multipor ist dies der Fall, wie sowohl anhand rechnerischer Nachweise, als auch anhand vielfältiger und langjähriger Praxiserfahrung erwiesen ist.

## 2.4. Rechnerischer Nachweis

Wandkonstruktionen bedürfen laut DIN 4108-3 eines Feuchteschutznachweises zur Begrenzung des Tauwasserausfalles innerhalb der Konstruktion. Dieser kann entfallen, wenn bestimmte, in der Norm definierte Kriterien eingehalten sind. Bei Wänden mit Innendämmung ist dies eine Begrenzung des thermischen Widerstandes auf $R \leq 1{,}0$ m²K/W (entspricht einer Dämmstoffdicke von ca. 4–5 cm), bei gleichzeitigem Diffusionswiderstand der inneren Schichten (Dämmung + raumseitiger Abschluss) von $s_d \geq 0{,}5$ m. Bei Innendämmung mit Holzwolle-Leichtbauplatten ist der thermische Widerstand der Dämmschicht sogar auf $R \leq 0{,}5$ m²K/W begrenzt.

Bei einer energetisch motivierten Innendämmung werden heute deutlich größere thermische Widerstände erzielt. Aus diesem Grund wird für die meisten Anwendungen einer Innendämmung der Dampfdiffusionsnachweis nach dem in DIN 4108-3 genormten Glaserverfahren geführt. Mit diesem Verfahren kann berechnet werden, ob und wo es unter stationären Winterbedingungen zu einem Tauwasseranfall innerhalb der Konstruktion kommt und wie groß die ausfallende Tauwassermenge ist.

Die Norm fordert, dass die anfallende Tauwassermenge innerhalb der Konstruktion auf 1,0 kg/m² beschränkt wird (bei feuchtesensitiven Untergrundmaterialien auf 0,5 kg/m²) und dass gleichzeitig im Winter ausgefallenes Kondensat im Sommer vollständig verdunsten kann.

Das in DIN 4108-3 genormte Glaserverfahren ist ein vereinfachtes Rechenverfahren, das nur Wärmeleitung und Dampfdiffusion und nur stationäre, d.h. zeitlich konstante klimatische Randbedingungen berücksichtigt. Wärme- und Feuchtespeicherung werden ebenso vernachlässigt wie der Flüssig- oder Kapillartransport. Der Nachweis zweidimensionaler Konstruktionsdetails ist ebenso wie die Berücksichtigung veränderlicher Klimabedingungen nicht möglich. Zudem wurden die für die Kondensat- und Trocknungsperiode anzusetzenden Klimabedingungen sehr ungünstig, d.h. sehr weit auf der sicheren Seite liegend, angenommen.

Daraus ergibt sich als Konsequenz, dass Konstruktionen, bei denen feuchtetechnisch nur die Dampfdiffusion relevant ist, mit dem Glaserverfahren nach DIN 4108-3 nachgewiesen werden können. Diffusionsbremsende Innendämmsysteme fallen unter diese Kategorie.

Dagegen lassen sich Konstruktionen, bei deren Funktionsweise die Feuchtespeicherung und der Flüssigtransport eine Rolle spielen, mit dem Glaserverfahren nach DIN 4108-3 nicht nachweisen. Dies ist insbesondere für kapillaraktive Innendämmsysteme der Fall. Für solche Konstruktionen müssen Verfahren angewendet werden, die zusätzlich die genannten Phänomene berücksichtigen.

DIN 4108-3 lässt derartige genauere Verfahren – es handelt sich dabei zumeist um numerische Simulationsverfahren – explizit zu. Der Nachweis mit einem Simulationsverfahren auf der Basis von Klimadaten am tatsächlichen Standort des Gebäudes ist demnach normkonform und ist dem Glaserverfahren insbesondere für kapillaraktive Innendämmsysteme stets vorzuziehen.

Genauere Anforderungen an die zu verwendenden Simulationsprogramme und die zu verwendenden Randbedingungen werden in der DIN 4108-3 nicht spezifiziert.

Die WTA hat eine Reihe von Merkblättern zu diesem und ähnlichen Themen erarbeitet ([14]-[17]). Die Merkblätter 6-1 und 6-2 enthalten Anforderungen und Regelungen zur Anwendung numerischer Berechnungsverfahren. Merkblatt 6-4 gibt Planungshilfen für die Innendämmung. Aktuell in Arbeit ist das Merkblatt 6-5 zum rechnerischen Nachweis kapillaraktiver Innendämmung. Die Entwurfsfassung wurde Anfang 2013 veröffentlicht.

Der rechnerische Nachweis kapillaraktiver Innendämmsysteme ist demnach zeitintensiver und ein genormtes Verfahren steht nicht zur Verfügung. Die WTA-Merkblätter geben allerdings definierte Kriterien für die Verfahren und einen klaren Rahmen für deren Anwendung vor. Verfahren, die diesen Kriterien entsprechen, sind u.a. verfügbar nach [8] und [10].

Die Anwendung der beschriebenen Simulationsverfahren unter Beachtung der in den WTA-Merkblättern aufgezeigten Randbedingungen führt zu einem erfolgreichen Nachweis kapillaraktiver Innendämmsysteme wie Multipor. Erfolgreich im Sinne des Nachweises bedeutet dabei, dass die anfallenden Feuchtemengen begrenzt sind (siehe Kriterium von DIN 4108-3), diese Feuchtigkeit wieder austrocknen kann und sich die Konstruktion über mehrere Jahre hinweg nicht hygrisch „aufschaukelt".

Darüber hinaus lässt sich mit diesen Verfahren auch das feuchtetechnische Verhalten angrenzender Bauteile, wie beispielsweise einbindende Holzbalkendecken, in die Nachweisführung einbeziehen. Auf diese Weise kann Planungssicherheit nicht nur für den ungestörten Wandaufbau, sondern auch für die oft viel sensibleren Konstruktionsdetails erreicht werden.

# 3. Fachtermini im Kontext der Innendämmung

Es gibt einige Vokabeln, die im Kontext der Innendämmung immer wieder gebraucht werden. Dazu gehören beispielsweise die Begriffe Kondensat, Tauwasser, Tauebene und Taupunkt, aber auch Kapillaraktivität, kapillarer Rücktransport oder Kapillarleitung. Gemein ist all diesen Begriffen, dass mit ihnen physikalische Zusammenhänge oder Prozesse beschrieben werden und dass dabei auf vereinfachende Modellvorstellungen zurückgegriffen wird, deren vereinfachende Annahmen dem Anwender häufig jedoch nicht mehr vertraut sind.

Dadurch werden nach und nach die vereinfachenden Modellannahmen als physikalische Realität verstanden, was zu einer Einengung der wirkenden Mechanismen und zu mitunter unzulässigen Pauschalannahmen oder –aussagen führt.

Ursache für das Ableiten von Fachtermini aus vereinfachenden Modellvorstellungen ist zunächst das menschliche Bestreben, physikalische Zusammenhänge oder Abläufe mit Hilfe von einfach greifbaren Begriffen und Modellen zu beschreiben. Hinzu kommt ein zeitabhängiger Prozess, bei dem der vereinfachende Modellcharakter, der zunächst in Begrifflichkeiten Ausdruck findet, mit der Zeit aus der Wahrnehmung jener verschwindet, die diese Begriffe verwenden. So werden durch die Begriffe vereinfachte Modellvorstellungen zur (absoluten) physikalischen Realität erhoben. Bei genauem Hinsehen wird jedoch offensichtlich, dass der Begriff unzureichend und ggf. sogar irreführend ist.

Fatal ist dies insbesondere für jene, die fachlich nicht zwischen Modellvorstellung und physikalischer Realität unterscheiden können. Entscheidungsträger werden so durch die Begrifflichkeiten verunsichert und in ihren Entscheidungen manipuliert.

Einmal im breiten Fachjargon etabliert, ist es nur schwer möglich, unsaubere Begrifflichkeiten durch physikalisch saubere, meist dadurch etwas komplexere oder weniger geläufige, zu ersetzen. Es wäre wohl vermessen, in diesem Abschnitt das Ziel zu verfolgen, die genannten Begriffe durch präzisere zu ersetzen. Ziel ist jedoch, diese Termini zu beleuchten, nach ihrer Herkunft zu fragen und ihren fachlichen Kontext zu analysieren. Es soll die Semantik und der fachlich assoziierte Inhalt aufgetrennt und gegenüber gestellt werden. Schließlich ist es das Ziel, den Kontext des fachlich assoziierten Inhaltes tiefgreifend zu analysieren und zu diskutieren.

## 3.1. Analyse der Wortbedeutung

Unabhängig von der Innendämmung haben die genannten Begriffe eine Wortbedeutung, die aus physikalischen Zusammenhängen oder Modellvorstellungen herrührt. Diese werden im Folgenden analysiert.

### 3.1.1. Kondensat, Taupunkt und Tauebene

Luft kann Wasser in Form von Wasserdampf aufnehmen. Mit steigender Temperatur nimmt die aufnehmbare Wassermenge exponentiell zu, siehe auch Abschnitt 2.1 und Bild 2. Die relative Luftfeuchte ist auf die – temperaturabhängige – maximal aufnehmbare Wassermenge bezogen. Kühlt sich warme Luft ab, sinkt die maximal aufnehmbare Wassermenge. Bleibt die Wassermenge in der Luft konstant, nimmt in diesem Fall die relative Luftfeuchte zu. Erreicht die relative Luftfeuchte einen Wert von 100 %, ist genau die Menge an Wasser in der Luft enthalten, die diese aufnehmen kann. Die Luft ist wassergesättigt. Eine weitere Abkühlung führt zu Übersättigung, in deren Folge die Luft Wasser ausscheiden muss.

Dies geschieht durch die Änderung des Aggregatzustandes des Wassers von gasförmig nach flüssig, der als Kondensation bezeichnet wird. Das flüssige Wasser bildet dabei feine Tröpfchen, die sich entweder in der Luft ausbilden, oder an kalten Oberflächen niederschlagen.

**Kondensat und Tauwasser**

Die Begriffe Tauwasser und Kondensat werden synonym verwendet. Sie bezeichnen das infolge der Abkühlung aus der Luft abgeschiedene, flüssige Wasser, das sich zumeist an verschiedenen Oberflächen niederschlägt.

Die folgenden typischen Beispiele für dieses Phänomen werden in Bild 5 illustriert:

- Flaschen oder Gläser mit kalten Getränken, die im Sommer aus dem Kühlschrank an die Luft gestellt werden. Nach kurzer Zeit schlägt sich an ihnen Kondensat nieder, da sich die warme und feuchte Luft in ihrer Nähe so weit abkühlt, dass sie übersättigt ist.

- Fenster mit geringem thermischen Widerstand im Winter. Aufgrund der niedrigen Außentemperaturen ist die Innenoberfläche der Fensterscheiben so kalt, dass die Raumluft, die sich in ihrer Nähe abkühlt, ebenfalls übersättigt wird und sich das überschüssige Wasser an der Scheibe niederschlägt.
- In klaren Nächten kühlt die Erdoberfläche infolge Wärmeabstrahlung deutlich ab. In der Folge wird vorbeiströmende Luft soweit abgekühlt, dass sie übersättigt ist und sich das überschüssige Wasser wiederum an den kalten Oberflächen niederschlägt. Die kalten Oberflächen können dabei sowohl Pflanzen und Gräser, als auch Straßen und Autoscheiben sein.

**Bild 5: Kondensat an einer kalten Getränkeflache (links), an einer Fensterscheibe im Winter (Mitte) und morgendlicher Tauniederschlag auf einer Wiese (rechts).**

**Taupunkt**

Der Begriff Taupunkt ist die Kurzform von Taupunkttemperatur. Beide bezeichnen die Temperatur, bei welcher die Wassersättigung der Luft erreicht wird und bei welcher der Prozess der Kondensation einsetzt.

Der Taupunkt bzw. die Taupunkttemperatur sind jeweils von den konkret vorliegenden Bedingungen abhängig: von der Lufttemperatur und von der relativen Luftfeuchte. Sind beide bekannt, lässt sich rechnerisch, oder anhand von Diagrammen wie Bild 2 grafisch, die Taupunkttemperatur ermitteln.

Beispielsweise kann der Taupunkt für die Kombination 20 °C und 50 % Luftfeuchte anhand von Bild 2 abgelesen werden, indem man von diesem Punkt im Diagramm eine Linie horizontal nach links zieht, bis die Sättigungsdampfdruckkurve erreicht ist. Die zu diesem Schnittpunkt auf der Abszisse ablesbare Temperatur ist die zur gewählten Kombination gehörige Taupunkttemperatur. In diesem Beispiel sind dies rund 9,2 °C.

Innerhalb von Baukonstruktionen wird der Begriff Taupunkt oft auch synonym für Tauebene verwendet.

**Kondensatebene / Tauebene**

Der Begriff Kondensat- bzw. Tauebene nimmt Bezug auf eine Schicht oder ein Bauteil, worüber ein Temperaturunterschied anliegt. Die gedachte Ebene innerhalb dieser Schicht bzw. des Bauteils, in der sich die Taupunkttemperatur einstellt, wird als Tauebene bezeichnet.

Wie die Taupunkttemperatur, hängt die genaue Position der Tauebene von Temperatur und relativer Feuchte der Luft auf der warmen Seite ab. Sie hängt jedoch zusätzlich auch ab von der Temperatur auf der kalten Seite sowie von der Wärmeleitfähigkeit, dem Dampfdiffusionswiderstand und der Schichtdicke der betrachteten Schicht bzw. der verschiedenen Schichten des betrachteten Bauteils.

Während die Begriffe Kondensat und Taupunkt für sich allein stehen und einen sachlich-fachlichen Kontext beschreiben, ist der Begriff der Kondensat- bzw. Tauebene stets mit einer Modellvorstellung verknüpft. Es handelt sich dabei um das Modell des Glaserschemas , mit dessen Hilfe die stationäre Dampfdiffusion vereinfacht beschrieben und visualisiert werden kann. Da die vereinfachenden Annahmen, die dieser Modellvorstellung zugrunde liegen, nur in sehr wenigen Anwendungsfällen tatsächlich gegeben sind, ist der Begriff der Kondensat- bzw. Tauebene in den meisten Fällen irreführend. Dies wird im Begriffskontext der Innendämmung weiter ausgeführt.

## 3.1.2. Kapillaraktivität

Innerhalb poröser Medien kann Wasser sowohl in flüssiger, als auch in gasförmiger Form transportiert werden.

Wassertransport in der Gasphase findet statt, wenn ein Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes innerhalb der Luft vorliegt. Gasmoleküle sind stets bestrebt, ein vorhandenes Konzentrationsgefälle auszugleichen, so dass sich Moleküle von Bereichen hoher Konzentration in Bereiche niedrigerer Konzentration bewegen. Der zugehörige Transportprozess wird als Diffusion bezeichnet. Beim Wasserdampftransport spricht man daher von der Dampfdiffusion. Sie findet im luftgefüllten Porenraum des porösen Mediums statt. Ihre Geschwindigkeit hängt von der Größe des Konzentrationsunterschiedes, von der Temperatur und von der Durchlässigkeit des Mediums ab.

Wassertransport in flüssiger Form findet in den wassergefüllten Porenbereichen und an den wasserbenetzten inneren Oberflächen poröser Medien statt. Treibende Kraft für den Flüssigtransport sind räumliche Unterschiede im Druck der Flüssigphase. Man spricht auch vom Saugspannungsgefälle, das dafür sorgt, dass Wasser in flüssiger Form von Bereichen höherer Wassergehalte in Bereiche geringerer Wassergehalte geleitet bzw. gesaugt wird.

Es gibt mehrere Mechanismen, die den Flüssigtransport innerhalb poröser Medien bestimmen. Einer dieser Mechanismen ist die Kapillarleitung, deren Bezeichnung aus dem einfachen, aber sehr anschaulichen Modell der Kapillare abgeleitet wurde.

**Kapillaraktivität und Kapillarleitung**

Der Begriff Kapillarleitung bezeichnet streng genommen den Flüssigtransport innerhalb von Kapillarröhrchen. Dies sind kreisrunde Röhrchen mit kleinem Radius, in denen es aufgrund der Krümmung der Wassermenisken zu einem Flüssigtransport kommt, siehe Bild 6.

Ursache dafür ist die Oberflächenspannung des Wassers. Sie sorgt dafür, dass sich eine spezifische Randkrümmung, der sogenannte Meniskus, ausbildet, wenn Wasser mit einem festen Stoff in Kontakt kommt. In Bild 6 ist dies links für verschiedene Flüssigkeiten schematisch illustriert. Der Meniskus kann sich innerhalb kleiner Kapillarröhrchen nicht mehr frei ausbilden. Aufgrund der engen Platzverhältnisse nimmt der Meniskus dann eine Krümmung an, die stärker gespannt ist. Dies führt zu einem Unterdruck, der sogenannten Saugspannung, die einen Transportprozess bewirkt, der in Bild 6 rechts als kapillare Steighöhe dargestellt ist. In Abhängigkeit vom Radius der Kapillaren können die Saugkräfte sehr groß werden, was einen sehr leistungsfähigen Flüssigtransport zur Folge hat.

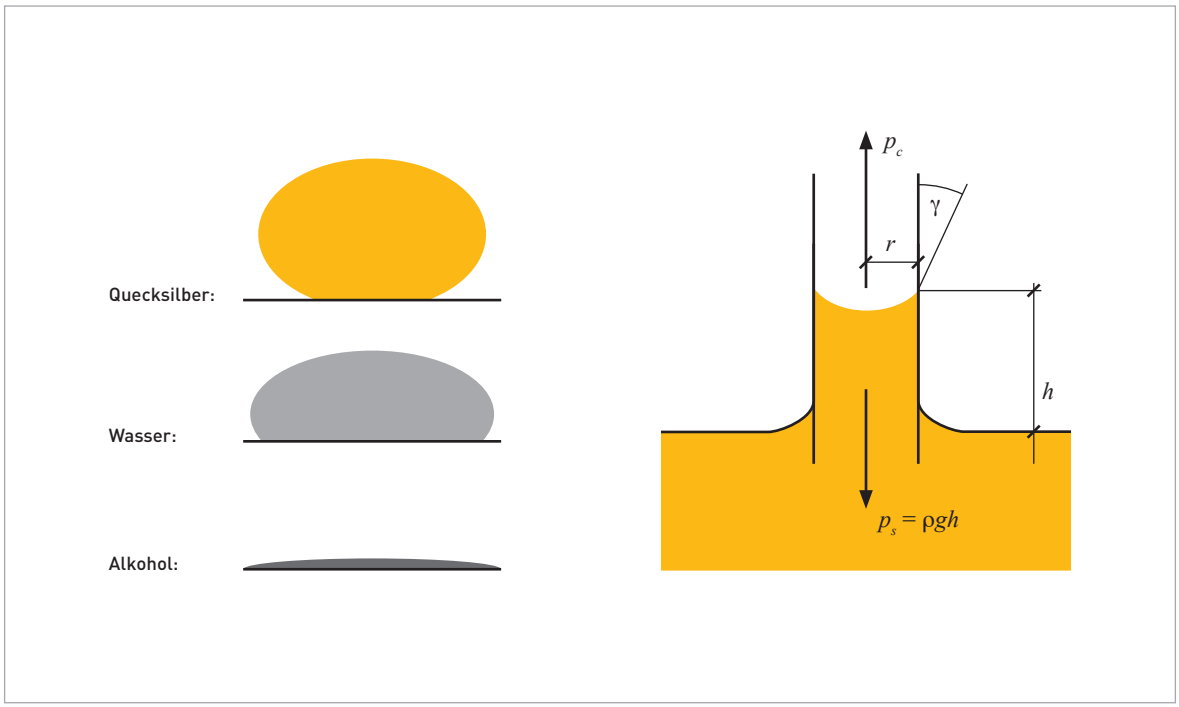


**Bild 6: Oberflächenspannung verschiedener Flüssigkeiten (links) und kapillare Steighöhe in Abhängigkeit vom Kapillarradius (rechts).**

Der Begriff Kapillarleitung hat sich als Synonym für Flüssigtransport innerhalb poröser Medien etabliert. Er geht auf den beschriebenen, sehr leistungsfähigen Flüssigtransportmechanismus zurück. Kapillaraktivität bedeutet in diesem Kontext die Fähigkeit eines Materials, Wasser in flüssiger Form transportieren zu können. Das Wort „leistungsfähig" wird hier in der Regel mit unterstellt.

**Kapillarer Rücktransport**

Unter nicht isothermen Bedingungen, d.h. bei Anliegen eines Temperaturunterschiedes über einem porösen Medium, ist es möglich, dass Wasserdampf- und Flüssigtransport gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen stattfinden. Ursache dafür sind die unterschiedlichen treibenden Kräfte für beide Transportmechanismen: der (temperaturabhängige) Dampfdruckunterschied für den Dampftransport und der (wassergehaltsabhängige) Kapillardruckunterschied für den Flüssigtransport, siehe oben.

Der Begriff kapillarer Rücktransport bezieht sich auf diesen Prozess. Er bezeichnet den Flüssigtransport, der dann auftritt, wenn Wasser dampfförmig auf der warmen Seite in ein Material hinein diffundiert, sich im kalten Bereich anlagert und in Folge der Anlagerung in flüssiger Form zurück in Richtung der warmen Materialseite transportiert wird.

## 3.2. Begriffskontext Innendämmung

Die vorgestellten Termini werden im Kontext der Innendämmung häufig verwendet. Zum Teil geschieht dies nicht ganz korrekt, wie die folgenden Ausführungen darlegen.

In allen Fällen beziehen sich diese Begriffe auf den Winterfall, wo auf der Innenseite der Außenwand eine deutlich höhere Temperatur anliegt, als auf ihrer Außenseite. In der Folge kommt es zu dem eingangs beschriebenen Dampftransport in die Wand hinein, der von den Innendämmsystemen entweder aufgenommen, oder unterbunden wird. Siehe auch Bild 3 und Bild 4.

Die Bewertung der Wandkonstruktion bezüglich dieser winterlichen Dampfdiffusion erfolgte in der Vergangenheit stets mit Hilfe des Glaserschemas [6], das zu diesem Zweck auch in DIN 4108 Teil 3 genormt wurde [3].

Das Glaserverfahren kennt allerdings nur konstante Randbedingungen und auch nur den Dampftransport. Prozesse der Feuchteanlagerung (Sorption) im Baustoff werden ebenso vernachlässigt, wie der Flüssigtransport. Siehe auch Abschnitt 2.4.

Als Folge daraus werden viele aus dem Glaserverfahren entlehnte Begriffe auf das (vermeintlich) tatsächliche Konstruktionsverhalten angewendet. Dies ist in den meisten Fällen jedoch nicht korrekt, da die vom Verfahren vernachlässigten Prozesse in der Realität das Material- und Konstruktionsverhalten ganz anders abbilden.

### 3.2.1. Kondensat, Taupunkt und Tauebene

Bezüglich der Begriffe Kondensat, Taupunkt und Tauebene muss zwischen Innendämmsystemen mit und ohne Feuchtespeicherfähigkeit unterschieden werden.

Findet keine nennenswerte Anlagerung von Feuchtigkeit an den inneren Oberflächen des Dämmstoffes statt, gibt es weder eine Feuchtespeicherung, noch einen Flüssigtransport. Die Vereinfachungen des Glaserverfahrens wirken sich kaum aus. In der Folge lässt sich das stationäre, winterliche Systemverhalten mit Hilfe des Glaserschemas gut beschreiben. In Abhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit und Dampfdiffusionswiderstand der inneren Bauteilschichten kommt es zu einem Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein. Wird in einer bestimmten Ebene innerhalb der Konstruktion der Sättigungsdampfdruck erreicht, kommt es zum Kondensatausfall. Rechnerisch ist dies zumeist an der Grenzschicht zwischen Wärmedämmung und Bestandskonstruktion der Fall. Die Begriffe Kondensat, Taupunkt und Tauebene werden entsprechend korrekt angewendet.

Dämmstoffe ohne nennenswerte Feuchtespeicherfähigkeit sind beispielsweise Mineral- oder Naturfasern niedriger Rohdichte.

Für den Großteil der Innendämmsysteme sind Feuchtespeicherung und Flüssigtransport jedoch wesentliche Prozesse der Feuchteregulierung. Das führt dazu, dass sich bei den meisten Innendämmsystemen im beschriebenen winterlichen Kontext keine klare Tauebene ausbildet. Es kommt hier häufig zu gar keiner Taupunktunterschreitung und damit auch nicht zu einem Kondensatausfall innerhalb der Konstruktion im klassischen Sinne. Die Begriffe der Kondensatebene und des Tauwasserausfalls sind in diesen Fällen physikalisch falsch und dadurch irreführend.

Unbestritten ist, dass es infolge des Temperaturgradienten auch zu einem Dampfdruckgradienten und in dessen Folge zu einem Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion hinein kommt. Unbestritten ist auch, dass die Größe dieses Dampfdiffusionsstromes über die Eigenschaften der am System beteiligten Materialien angepasst werden kann – bis dahin, dass er für dampfdichte Materialien zu null wird.

Es muss jedoch kritisch betrachtet werden, was mit dem einströmenden Wasserdampf innerhalb der Konstruktion geschieht. Tatsächlich führt er zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte im Material, in dessen Folge sich das Wasser an den inneren Oberflächen anlagert und dort einen dünnen Flüssigwasserfilm bildet. Diese sogenannte Feuchtesorption reduziert einerseits die Wasserdampfmenge, die weiter in die Konstruktion hinein diffundiert. Andererseits führt sie zu einem Anstieg des Feuchtegehaltes im betrachteten Material. Es handelt sich um einen zeitabhängigen Prozess, der dazu führt, dass die im Material gespeicherte Feuchtigkeit zunimmt. Gleichzeitig wird der Diffusionsprozess abgepuffert.

Es ist an dieser Stelle essentiell ins Bewusstsein zu rücken, dass 100 % relative Luftfeuchte in einem Baustoff gleichbedeutend ist mit dem Erreichen des Sättigungsfeuchtegehaltes. Das bedeutet, dass es innerhalb eines feuchtespeicherfähigen Materials nie zu einer relativen Porenluftfeuchte von 100 % kommen kann, solange das Material nicht wassergesättigt ist.

Bevor es also innerhalb der Konstruktion zum Erreichen des Taupunktes kommen kann, muss sich im Baustoff schon so viel Feuchtigkeit angelagert haben, dass dieser gesättigt ist. Es wird deutlich, dass dies bei Materialien, die keine Feuchtespeicherfähigkeit haben, durchaus der Fall sein kann. Gleichzeitig wird klar, dass es für feuchtespeicherfähige Materialien zu solch großen Feuchteeinträgen aufgrund winterlicher Dampfdiffusion nicht kommen kann. Der Taupunkt wird hier nie erreicht, weil die Feuchtigkeit zuvor bereits im Baustoff angelagert wird. Die inneren Oberflächen werden mit einem Wasserfilm zunehmender Dicke bedeckt, sehr kleine Poren z.T. ganz mit Wasser gefüllt. Durch diese Anlagerung wird sowohl der weitere Dampfdiffusionsstrom in die Konstruktion, als auch die relative Luftfeuchte innerhalb der Konstruktion verringert.

Die im Baustoff angelagerte Feuchtigkeit wird zunächst einfach gespeichert. Ändern sich die Temperaturbedingungen, kann das angelagerte Wasser wieder verdunsten, durch Dampfdiffusion zurück transportiert und an die Raumluft abgegeben werden.

In Abhängigkeit von Baustoff und Feuchtegehalt kommt zur reinen Speicherung noch ein beträchtlicher Flüssigtransport. Die Feuchteanlagerung sorgt dafür, dass sich ein Wassergehaltsprofil ausbildet. Dieses Wassergehaltsprofil erzeugt einen Gradienten in der Saugspannung, infolgedessen es zu einem Flüssigwasserstrom von Bereichen höheren in Bereiche niedrigeren Feuchtegehaltes kommt. Dieser Flüssigwassertransport wirkt dem Dampfdiffusionsstrom entgegen und sorgt zusätzlich zu einer Reduktion der in die Konstruktion einströmenden Feuchtemenge.

Dieser Prozess wird auch als kapillarer Rücktransport bezeichnet.

## 3.2.2. Kapillaraktivität und kapillarer Rücktransport

Der Begriff Kapillarleitung hat sich als Synonym für Flüssigtransport innerhalb poröser Medien etabliert. Im Kontext der Innendämmung ist dies von daher irreführend, da infolge des beschriebenen Mechanismus für den Flüssigtransport in einer Kapillare der Begriff des „Kapillartransportes" im Allgemeinen mit „sehr leistungsfähiger Flüssigtransport" gleichgesetzt wird.

Tatsächlich findet dieser Flüssigtransport meist nicht in feinen Kapillarröhrchen statt, noch werden große Feuchtemengen in kurzer Zeit über weite Strecken transportiert.

Es handelt sich hier um Feuchtetransport bei sehr geringen Feuchtegehalten. Entsprechend sind zwar die inneren Materialoberflächen mit Wasser benetzt und sicher auch kleinere Poren bzw. Porenbereiche wassergefüllt, es ist jedoch kaum von einer über weite Bereiche durchgängigen Flüssigphase auszugehen. Der Transportprozess setzt sich aus Komponenten wie dem Ausgleich kleinerer Feuchtegehaltsunterschiede durch Oberflächentransport [1] oder der Flüssigleitung in sehr kleinen Poren bzw. Porenbereichen und in Porenzwickeln [13] zusammen. Dieser Flüssigtransport ist stets kleiner bzw. maximal gleich groß wie der einströmende Dampftransport.

Daraus wird deutlich, dass die Begriffe Kapillaraktivität und kapillarer Rücktransport zwar prinzipiell das Richtige – nämlich einen bei geringen Feuchtegehalten einsetzenden Flüssigtransport – meinen, aufgrund des Bezuges zum Mechanismus der Kapillarleitung jedoch eine falsche Vorstellung hinsichtlich der Größenordnung dieses Flüssigtransportes erzeugen.

Im Falle der Innendämmung wirkt dieser Flüssigtransport der Feuchteakkumulation an der kalten Seite der Dämmung entgegen. Infolge des in die Dämmung gerichteten Dampfdiffusionsstromes und der einsetzenden Feuchteanlagerung im Baustoff baut sich ein Feuchteprofil auf. Gleichzeitig wird dieses Feuchteprofil durch den zur Wandinnenseite gerichteten Flüssigwasserstrom abgebaut. In Abhängigkeit von den Materialeigenschaften ist zunächst der Dampfdiffusionsstrom größer als der Flüssigwasserstrom, so dass sich das Profil weiter aufbaut. Irgendwann ist der Punkt erreicht, wo der Flüssigtransport die gleiche Größenordnung annimmt, wie der Dampftransport. Dann stehen beide im Gleichgewicht, eine weitere Auffeuchtung ist nicht mehr möglich.

Die Fähigkeit von Innendämmstoffen, Feuchte bereits bei geringen Feuchtegehalten in flüssiger Form transportieren zu können, sorgt demnach dafür, dass die in die Wand eindringende Feuchtemenge begrenzt ist und sich keine deutlich erhöhten Feuchtegehalte im Dämmstoff einstellen. Gleichzeitig werden die gute Feuchtepufferung von Feuchtespitzen in der Raumluft sowie das Trocknungspotential der Bestandskonstruktion nach innen beibehalten bzw. verbessert.

## 3.3. Weiterführende Diskussion

Vor diesem Hintergrund ergeben sich zwei nachgereichte Fragestellungen, die im Folgenden diskutiert werden. Dies ist zum einen die Frage, wieviel Kapillaraktivität bzw. wieviel Flüssigwasserleitfähigkeit denn tatsächlich erforderlich ist, damit ein solches diffusionsoffenes Innendämmsystem funktioniert. Zum anderen schließt sich daran die Frage an, woran sich diese Kapillaraktivität bzw. Flüssigwasserleitfähigkeit möglichst einfach messen lässt – und woran ggf. nicht.

### 3.3.1. Wieviel Kapillaraktivität ist erforderlich?

Der Flüssigtransport, der für das Wirkprinzip der kapillaraktiven Innendämmung sorgt, setzt bereits bei sehr geringen Feuchtegehalten ein. Er spielt sich damit im niederfeuchten, häufig auch als ungesättigt bezeichneten Feuchtebereich ab. Siehe auch [1] und [2], sowie [11] und [12].

Gleichzeitig sind die Wassermengen, die in flüssiger Form transportiert werden, sehr gering – sie bewegen sich in derselben Größenordnung wie der Dampftransport.

Das bedeutet, dass absolut gesehen wenig Flüssigwasserleitfähigkeit gebraucht wird, diese allerdings schon bei geringen Feuchtegehalten.

Die Flüssigwasserleitfähigkeit ist eine Materialeigenschaft, die stark vom Porenfüllungsgrad, also dem Wassergehalt abhängt. Eine stärkere Vernetzung der Flüssigphase im Porensystem hat einen besseren Austausch und damit einen schnelleren Transport zur Folge. Die Flüssigwasserleitfähigkeit nimmt deshalb mit steigendem Feuchtegehalt über mehrere Größenordnungen zu.

In Bild 7 ist die Flüssigwasserleitfähigkeit über dem Feuchtegehalt für drei Baustoffe dargestellt: die Multipor Mineraldämmplatte, eine Calciumsilikatdämmplatte und ein Altbauziegel. Die Kurven enden jeweils bei den maximalen Feuchtegehalten, die diese Materialien ohne Anliegen eines äußeren Druckes aufnehmen können.

In diesem Diagramm sind mehrere Bereiche markiert. Die gestrichelten Ellipsen zeigen die für die einzelnen Materialien jeweils relevanten Bereiche von Feuchtegehalt und Leitfähigkeit, die beim Wasseraufnahmeversuch zum Tragen kommen. Der grüne, durchlaufende Rahmen markiert den Feuchtegehalts- und Flüssigleitfähigkeitsbereich, der für die diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmung relevant ist.

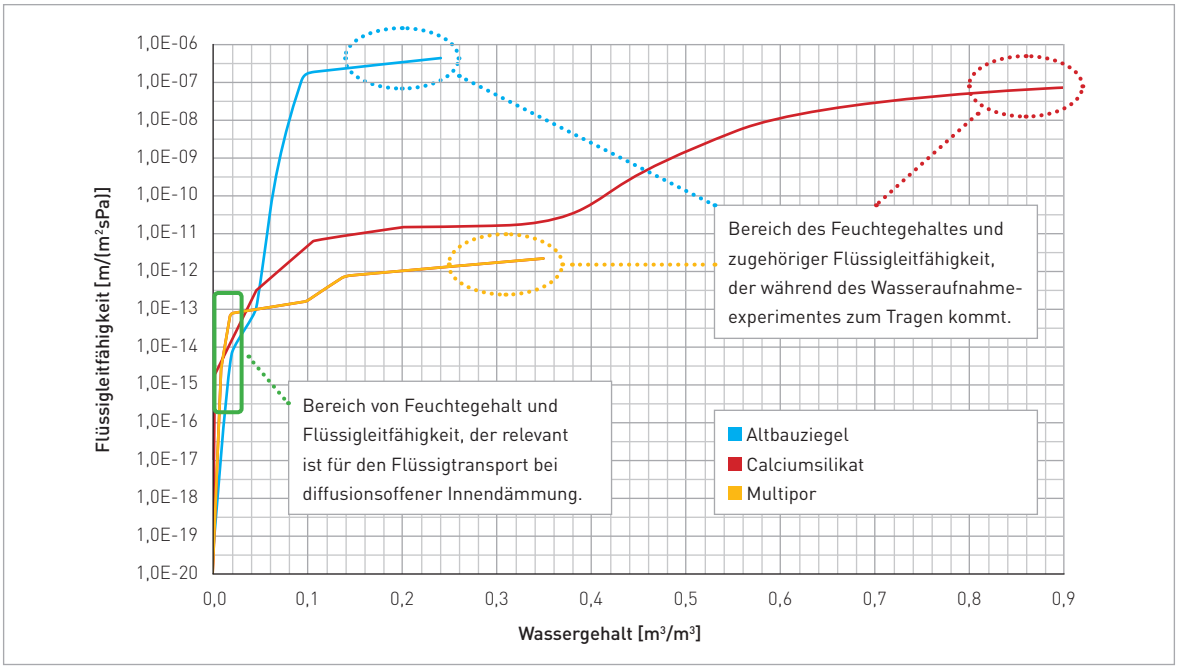


**Bild 7: Vergleich der Flüssigwasserleitfähigkeit verschiedener Baustoffe mit Markierung der für die kapillaraktive Innendämmung und für das Wasseraufnahmeexperiment relevanten Feuchtebereiche.**

Es ist ersichtlich, dass die beiden kapillaraktiven Innendämmstoffe im grün umrahmten, niederfeuchten Bereich einen steilen Anstieg der Leitfähigkeit aufweisen.

Das bedeutet, für das Wirkprinzip der kapillaraktiven Innendämmung ist absolut gesehen wenig Flüssigleitfähigkeit erforderlich. Entscheidend ist, dass bereits bei sehr geringen Feuchtegehalten ein merklicher Flüssigtransport einsetzt.

## 3.3.2. Woran lässt sich Kapillaraktivität messen?

Es stehen zwei einfache Transportexperimente zur Verfügung, die Aufschluss über das Flüssigtransportvermögen von Baustoffen geben. Diese sind einerseits das Wasseraufnahmeexperiment und andererseits der Trocknungsversuch.

Bei der Wasseraufnahme wird gemessen, wie schnell das Material unter andauerndem Wasserkontakt Wasser aufnehmen und transportieren kann. Es steht als Randbedingung mehr Wasser zur Verfügung als aufgenommen werden kann. Der Feuchtetransport findet im nahe gesättigten Feuchtebereich statt.

Anhand der Messdaten aus dem Wasseraufnahmeexperiment lässt sich deshalb auf die Flüssigwasserleitfähigkeit bei freier Sättigung schließen. In Bild 7 sind jeweils die für die Wasseraufnahme relevanten Bereiche durch gestrichelte Ellipsen gekennzeichnet.

Im Gegensatz dazu wird bei der Trocknung das Feuchtetransportvermögen im niederfeuchten Bereich gemessen. Das Trocknungsexperiment deckt den gesamten praktisch relevanten Feuchtebereich von freier Sättigung bis zur Ausgleichsfeuchte ab. Gemessen wird die Kombination aus Dampfdiffusion und Flüssigtransport bei abnehmenden Feuchtegehalten. Es kann dabei nur das Wasser transportiert werden, das bereits im Material vorhanden ist. Damit

bildet das Trocknungsexperiment auch die Feuchtezustände ab, die bei der diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung zum Tragen kommen.

Bild 8 zeigt eine Übersicht dieser Zusammenhänge. Die verschiedenen Transportexperimente sind darin den entsprechenden Feuchtebereichen zugeordnet. Zudem ist mit einigen Stichpunkten deren praktische Relevanz erläutert.

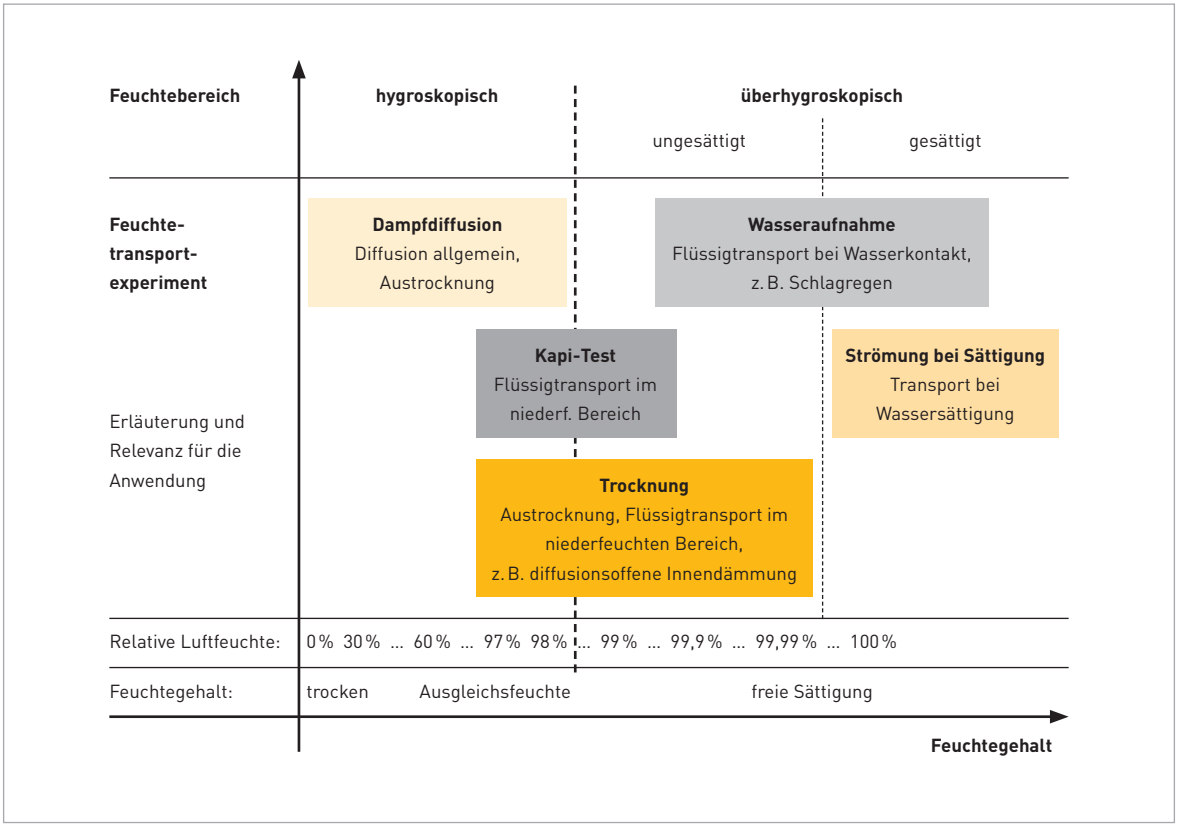


**Bild 8: Gegenüberstellung von Feuchteeinwirkung bzw. anwendbarem Feuchtetransportexperiment und Feuchtegehalt von Baustoffen.**

Da aus der Leitfähigkeit im Bereich der freien Sättigung nicht auf die Leitfähigkeit im niederfeuchten Bereich geschlossen werden kann, bedeutet dies, dass das Wasseraufnahmeexperiment bzw. der daraus abgeleitete Wasseraufnahmekoeffizient völlig ungeeignet sind, als Bewertungsgröße für die Wirksamkeit eines kapillaraktiven Innendämmstoffes herangezogen zu werden.

Die Trocknung bildet den Transportprozess im niederfeuchten Bereich ab. Sie ist damit als Bewertungsgröße für die Wirksamkeit eines kapillaraktiven Innendämmstoffes geeignet. Für die Anpassung der hygrischen Materialfunktionen für die numerische Simulation sind Trocknungsverläufe sehr gut geeignet und werden dafür auch seit Jahren herangezogen (siehe auch [7] und [11]). Trocknungsverläufe sind in der Auswertung hinsichtlich des direkten Vergleiches von verschiedenen Baustoffen jedoch nicht ganz einfach. Einen Vorschlag für einen einfachen Trocknungskoeffizienten gibt es bereits [12], allerdings hat sich dieser bislang noch nicht in der Praxis niederschlagen können.

Ein komplexeres Experiment, das ebenfalls Aufschluss auf die Flüssigtransporteigenschaften im relevanten Feuchtebereich gibt, ist der Kapi-Test [1], [2]. Er stellt den Winterfall der Innendämmung nach, indem ein Temperaturgradient über dem Dämmstoff und ein Feuchtestrom in das Material hinein erzeugt werden. In regelmäßigen Abständen wird die Feuchteverteilung mittels Kernspintomographie gemessen, anhand derer sich auf die Flüssigtransporteigenschaften rückschließen lässt. Auch dieses Experiment wird zur Feinjustierung der Transportkoeffizienten für die numerische Simulation herangezogen.

Als Fazit ist festzuhalten, dass die für die diffusionsoffene Innendämmung relevante Kapillaraktivität bzw. Flüssigwasserleitfähigkeit relativ einfach aus dem Trocknungsexperiment bzw. aus Trocknungsdaten abgeleitet werden kann. Die Ergebnisse des Kapi-Tests sind ebenfalls gut zur diesbezüglichen Bewertung von Dämmstoffen geeignet. Völlig ungeeignet ist hingegen das Wasseraufnahmeexperiment bzw. der Wasseraufnahmekoeffizient.

# 4. Anwendungsbeispiel

Abschließend sollen die diskutierten Zusammenhänge anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht werden. Es handelt sich hierbei um Details eines Schulgebäudes, das im Zuge der Sanierung energetisch ertüchtigt wurde. Aufgrund der Bestandskonstruktion aus Klinker-Ziegel-Sichtmauerwerk kam hinsichtlich der Wärmedämmung nur eine Innendämmung in Frage. Aufgrund der positiven Eigenschaften sollte ein diffusionsoffenes Innendämmsystem aufgebracht werden.

Das hygrothermische Bauteilverhalten wurde zum Nachweis der Funktionstauglichkeit mit Hilfe der numerischen Simulation analysiert, wobei zunächst die ungestörte Wand unter stationären (d.h. konstanten), und anschließend ein Konstruktionsdetail unter stationären und unter instationären (d.h. realen) Klimarandbedingungen untersucht wurde.

Dabei galt es einerseits die Frage zu beantworten, ob die gedämmte Konstruktion bezüglich des Tauwasserausfalls innerhalb der Konstruktion die Anforderungen gemäß DIN 4108-3 erfüllt. Für den stationären Fall wurden deshalb die Randbedingungen nach Norm entsprechend Tabelle 1 angesetzt. Andererseits sollte auch betrachtet werden, wie sich die Konstruktion unter realen Klimabedingungen über mehrere Jahre hinweg verhält und dabei insbesondere, ob es zu unzulässigen Durchfeuchtungen infolge Schlagregenbelastung oder zu einer hygrischen Aufladung der Konstruktion über die Jahre hinweg kommen kann.

**Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Klimarandbedingungen**

| Randbedingung | Temperatur [°C] | Relative Luftfeuchte [%] | Dauer |
|---|---|---|---|
| **Innen, stationär** | 20 | 50 | 60 d / 10 a |
| **Außen, stationär** | -10 | 80 | 60 d |
| **Außen, instationär** | Klima Mitteldeutschland mit stündlichen Werten für Temperatur, Relative Luftfeuchte, solare Strahlung, Wind und Regen | | 10 a |

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe der Software Delphin für gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport nach [10] durchgeführt. Das Programm erlaubt es, das Wärme- und Feuchteverhalten von ein- und zweidimensionalen Konstruktionsdetails unter stationären und instationären klimatischen Bedingungen zu berechnen. Die Untersuchungen wurden gemäß WTA Merkblatt 6-1-01/D und 6-2-01/D durchgeführt ([14] und [15]).

## 4.1. Ungestörte Wand stationär

Im ersten Schritt wurde die ungestörte Wand unter stationären, d.h. konstanten Randbedingungen betrachtet. Die Konstruktion bestand aus 495 mm dickem Ziegelmauerwerk, in dessen Außenbereich eine Lage Klinker ausgeführt wurde. Auf dem Bestandsinnenputz wurden 120 mm Mineraldämmplatten mit entsprechendem Klebe- und raumseitigem Armierungsmörtel aufgebracht.

Als Ergebnis der Berechnung sind in Bild 9 die Wassergehaltsprofile über der Konstruktion zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Links ist dabei außen und rechts innen. Die vertikalen schwarzen Linien deuten die Materialgrenzen im Diagramm an.

Es ist deutlich erkennbar, dass sich nach und nach Feuchtigkeit im kälteren Bereich des Dämmstoffes anlagert. Der Feuchtegehalt nimmt zu. Gleichzeitig beginnt ein Rücktransport von Wasser in Richtung der inneren Wandoberfläche, der dafür sorgt, dass es nicht zu einer übermäßigen Feuchteakkumulation an der Grenze zum Klebemörtel kommt, sondern sich ein breit verteiltes Feuchteprofil über dem Dämmstoff einstellt. Der maximale Feuchtegehalt liegt im Bereich von 2 Vol-%.

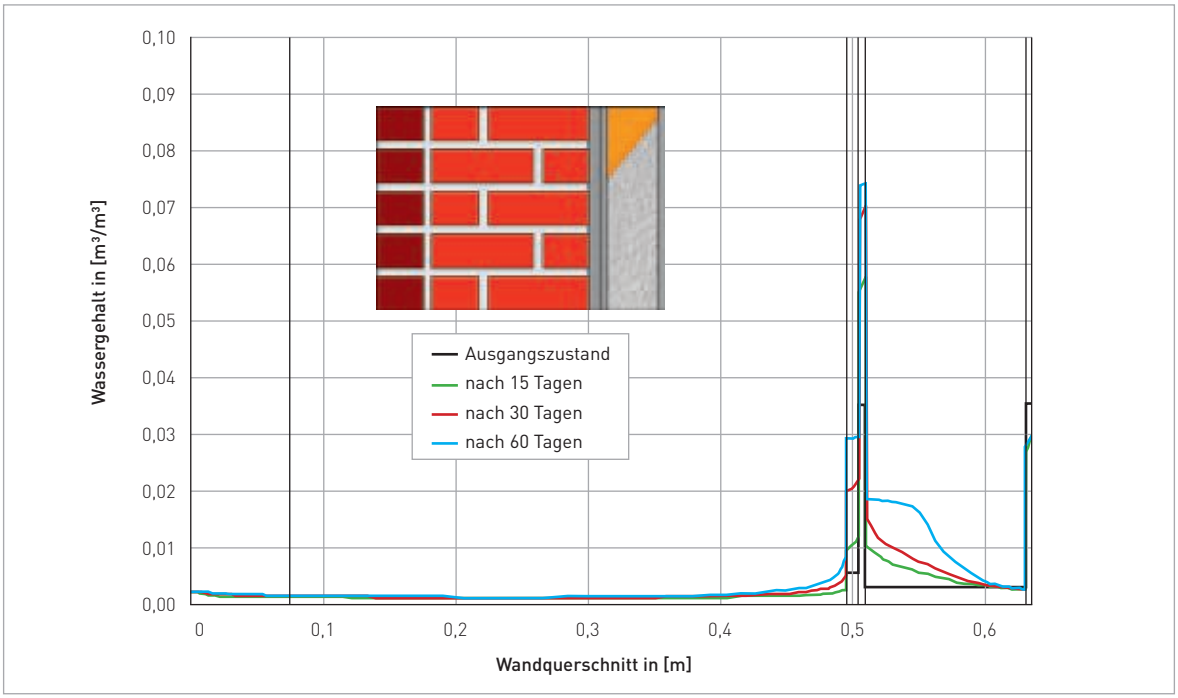


**Bild 9: Entwicklung des Feuchtegehaltes innerhalb der Konstruktion bei konstanten winterlichen Randbedingungen nach DIN 4108-3.**

Gibt man die gleichen Ergebnisse nicht als Wassergehalt, sondern als relative Luftfeuchte über der Konstruktion aus, ergibt sich die Darstellung von Bild 10. Es ist klar erkennbar, dass es selbst nach 60 Tagen nicht zu einer Taupunktunterschreitung innerhalb der Konstruktion kommt. Die maximal erreichte relative Luftfeuchte beträgt ca. 94 % nach 60 Tagen an der kalten Seite der Dämmung. Zu einem Kondensatausfall innerhalb der Konstruktion, der ja 100 % relative Luftfeuchte erfordern würde, kommt es zu keinem Zeitpunkt.

Im Vergleich dazu weist die stationäre Dampfdiffusionsberechnung gemäß DIN 4108-3 (Glaser) für diese Konstruktion eine Kondensatmenge von ca. 1,6 kg/m² aus, weil weder die Feuchtespeicherung, noch der leistungsfähige Flüssigtransport darin berücksichtigt werden.

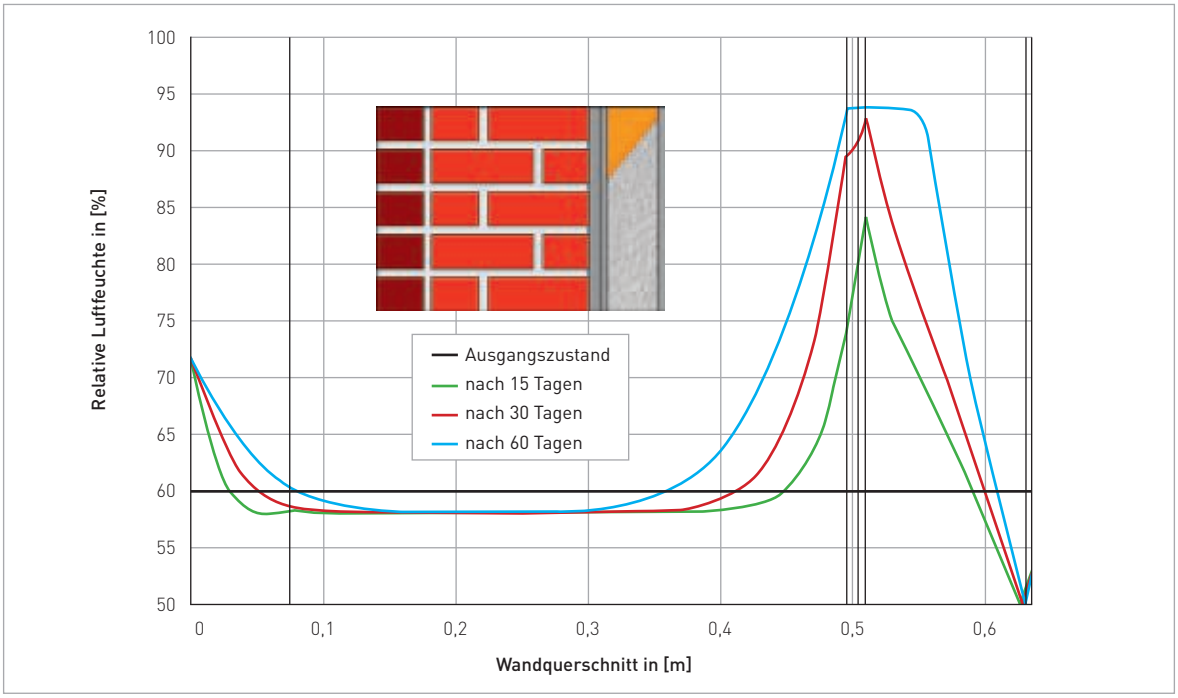


**Bild 10: Entwicklung des Profils der relativen Luftfeuchte innerhalb der Konstruktion bei konstanten winterlichen Randbedingungen nach DIN 4108-3.**

Auf Grundlage der genaueren Simulationsberechnung kann der Nachweis der Tauwasserfreiheit innerhalb der Konstruktion nach DIN 4108-3 erbracht werden. Es fällt kein Tauwasser an. Die maximalen relativen Luftfeuchten innerhalb der Konstruktion sind völlig unkritisch. Die geplante Dämmmaßnahme ist im ungestörten Wandbereich funktionstüchtig.

## 4.2. Fensteranschluss stationär und instationär

Nach dem prinzipiellen Nachweis der Funktionsfähigkeit der vorgesehenen diffusionsoffenen Innendämmung am ungestörten Wandaufbau wurde das Detail des Fensteranschlusses untersucht. Hierbei wurde im ersten Schritt eine Berechnung unter den gleichen konstanten Randbedingungen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Bild 11 dargestellt.

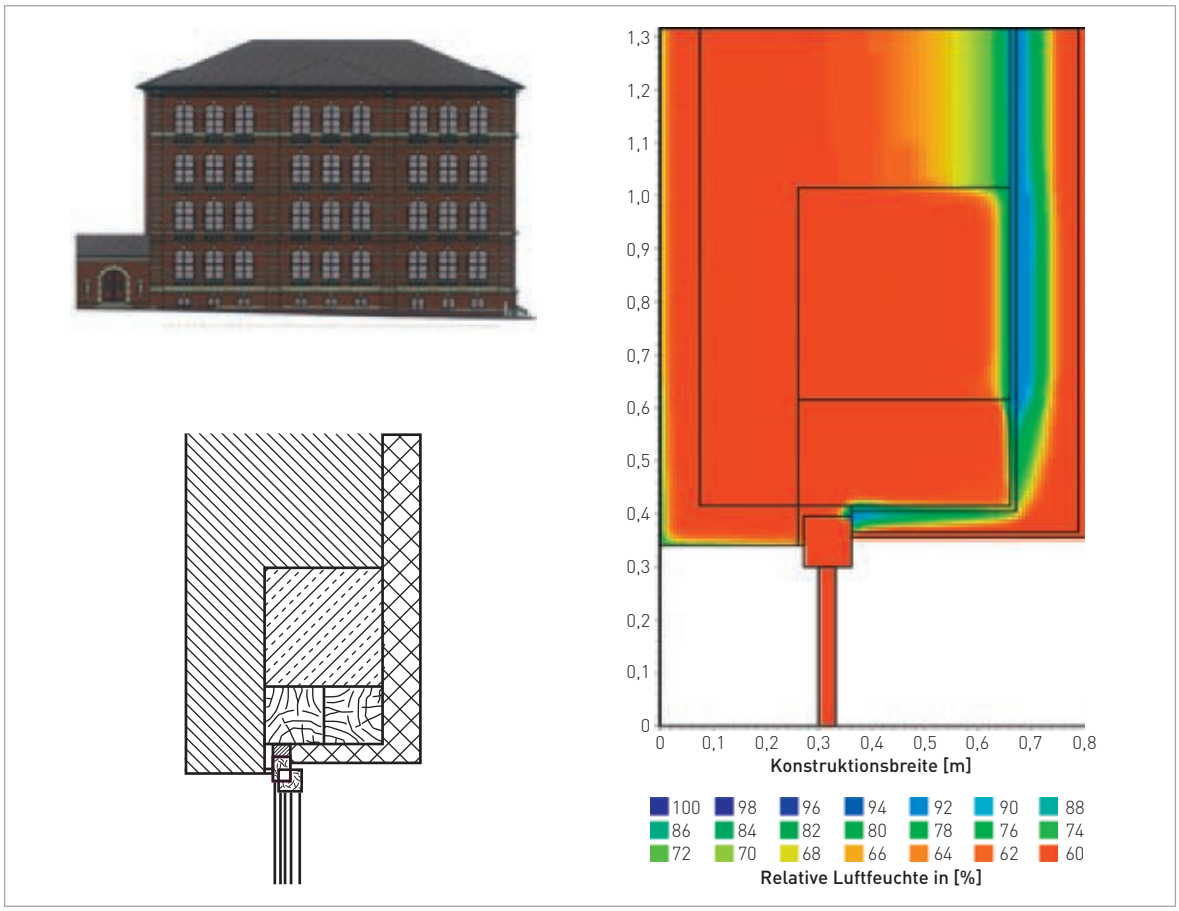


**Bild 11: Energetische Sanierung eines Schulgebäudes: Ansicht der Schule mit Detail des Fenstersturzes (links) und stationäre Verteilung der relativen Luftfeuchte in [%] über dem Detail nach 60 Tagen unter konstanten winterlichen Randbedingungen gemäß DIN 4108-3 (rechts).**

Ähnlich den Ergebnissen des ungestörten Wandaufbaus ist eine Zunahme der relativen Luftfeuchte im Bereich der Innendämmung auf Werte von bis zu 94 % erkennbar. Im Bereich des Betonsturzes (großes Rechteck in der Mitte) kommt es aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Betons zu einer größeren Feuchteakkumulation innerhalb der Dämmung. Es ist auch hier erkennbar, dass die Luftfeuchte auf der kalten Seite nicht überproportional zunimmt, sondern dass die Feuchtigkeit aufgrund der guten Flüssigtransporteigenschaften des Dämmstoffes in Richtung der inneren Wandoberfläche geleitet wird. Es entsteht ein breites Feuchteprofil innerhalb der Dämmung.

Für die instationäre Berechnung wurde auf der Außenseite der Konstruktion Realklima mit stündlichen Werten von Temperatur, relativer Luftfeuchte, solarer Ein- und Abstrahlung, sowie Windrichtung, -geschwindigkeit und Regen angesetzt. Auf der Innenseite wurden konstante Bedingungen angenommen (siehe Tabelle 1).

Anhand der stationären Ergebnisse können die möglicherweise kritischen Punkte ausgewählt werden, die bei der instationären Berechnung genauer analysiert werden sollen. Dies sind der Anschluss des Fensterrahmens an die Dämmung und der Anschluss der Holzsturzelemente an die Dämmung. Zudem wird als Referenz der obere Rand zur ungestörten Wand mit betrachtet.

Als Ergebnis der instationären Berechnung sind die zeitlichen Verläufe der relativen Luftfeuchte an den ausgewählten drei Stellen innerhalb der Konstruktion in Bild 12 dargestellt.

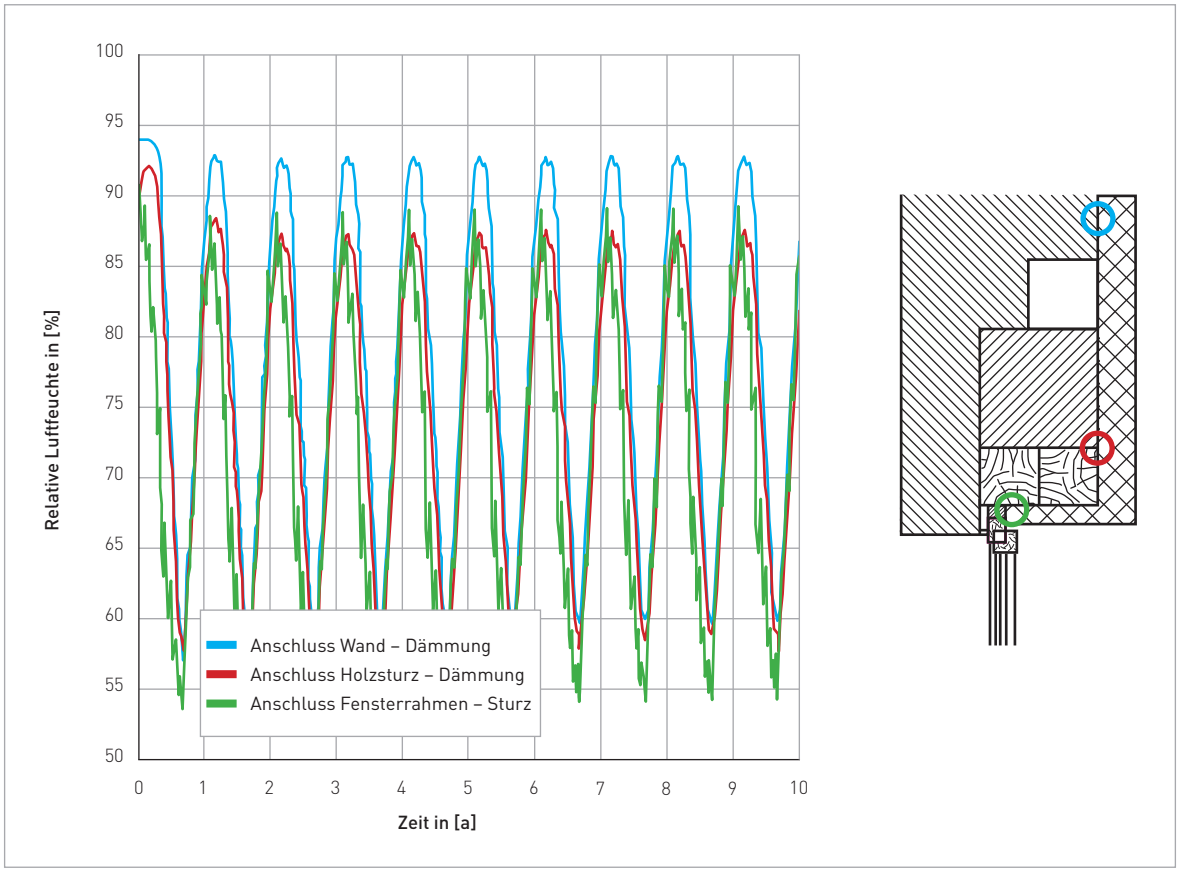


**Bild 12: Verlauf der relativen Luftfeuchte an verschiedenen Stellen innerhalb der Konstruktion über 10 Jahre.**

Schon innerhalb von zwei Jahren stellt sich ein quasistationärer, d.h. jedes Jahr wiederkehrender Feuchtezustand ein. Eine hygrische Aufladung der Konstruktion findet nicht statt. Die relative Luftfeuchte im Bereich der Holzbauteile erreicht jeweils im Winter Maximalwerte von 89 % und geht im Sommer stets auf Werte von unter 60 % zurück. Unter diesen Bedingungen kann eine Beeinträchtigung oder gar Schädigung der Konstruktion ausgeschlossen werden. Die Konstruktion ist funktionstüchtig und wird zur Ausführung empfohlen.

# 5. Zusammenfassung

Der Gebäudebestand ist vor dem Hintergrund der Reduktion des Energiebedarfs in den vergangenen Jahren immer stärker in den Fokus geraten. Vor allem die Dämmung von Bestandsgebäuden kann einen großen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs leisten, häufig – wenn aus verschiedenen Gründen eine Außendämmung nicht möglich oder sinnvoll ist – als Innendämmung. Allerdings scheuen sich noch immer viele Baubeteiligte, eine Innendämmung auszuführen, was häufig an bauphysikalischen Vorbehalten und an unzureichenden rechnerischen Nachweisformen liegt.

Hier aufzuklären ist der Anknüpfungspunkt der vorliegenden Broschüre. Es wurden die grundsätzlichen Möglichkeiten, eine Innendämmung auszuführen, vorgestellt und diskutiert. Der bauphysikalische Hintergrund wurde erläutert und mögliche Nachweisformen im Kontext der Normen und Regelwerke aufgezeigt.

Darüber hinaus wurden die im Kontext der Innendämmung häufig verwendeten Begrifflichkeiten beleuchtet und in ihrem fachlichen Kontext analysiert. Es wurden Semantik und fachlich assoziierter Inhalt aufgetrennt und gegenüber gestellt. Und schließlich wurden anhand der Begriffe die physikalischen Wirkmechanismen der diffusionsoffenen Innendämmung diskutiert.

Als Fazit daraus ist festzuhalten, dass für das Wirkprinzip der diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung absolut gesehen wenig Flüssigleitfähigkeit erforderlich ist. Vielmehr ist entscheidend, dass eine merkliche Flüssigtransportfähigkeit bereits bei geringen Feuchtegehalten einsetzt. Diese Kapillaraktivität bzw. Flüssigwasserleitfähigkeit lässt sich relativ einfach aus dem Trocknungsexperiment bzw. aus Trocknungsdaten ableiten. Hingegen ist das Wasseraufnahmeexperiment bzw. der Wasseraufnahmekoeffizient für die Charakterisierung dieser Eigenschaft völlig ungeeignet.

Schließlich wurde anhand eines Beispiels veranschaulicht, dass auf Grundlage numerischer Simulationsberechnungen, welche die Feuchtespeicherung und die Flüssigleitfähigkeit berücksichtigen, der Nachweis der Tauwasserfreiheit innerhalb der Konstruktion nach DIN 4108-3 und darüber hinaus erbracht werden kann. Es wurde deutlich, dass bei diffusionsoffenen, kapillaraktiven Systemen überhaupt kein Tauwasser anfällt. Die maximalen relativen Luftfeuchten innerhalb der Konstruktion bewegen sich üblicher Weise im Bereich von 90 % bis 95 % und sind damit meist unkritisch. Selbst für komplexere Details mit eingebundenen Holzbauteilen konnte am konkreten Beispiel der Nachweis der Funktionstauglichkeit erbracht werden.

Die vorliegende Broschüre liefert damit einerseits Informationen, vermittelt Hintergrundwissen und gibt Anwendungsbeispiele. Sie liefert andererseits die Grundlage für eine weitergehende Diskussion rund um das Thema Innendämmung. Damit liegt es nun an den Bauherren, Planern und Architekten, aber auch an den Herstellern und den Ausführenden, die Diskussion aufzunehmen und die Begrifflichkeiten im richtigen Kontext anzuwenden. Im besten Fall könnte es damit gelingen, die weithin vorhandenen Ängste und Vorbehalte rund um das Thema Innendämmung abzubauen, einen fairen Wettbewerb zu ermöglichen und letztlich zu einer gesamtgesellschaftlichen Aufgabe, nämlich einer nachhaltigen energetischen Sanierung des Gebäudebestandes, einen wesentlichen Beitrag zu leisten.

# 6. Referenzen


[1] Binder, A., Zirkelbach, D., Künzel, H.M.: Test method to quantify the wicking properties of materials designed to prevent interstitial condensation. Buildings XI Conference, Clearwater Beach, FL, 2010.

[2] Binder, A., Zirkelbach, D., Künzel, H.M., Fitz, C.: Praxisgerechte Beurteilung und Quantifizierung der Kapillaraktivität von Innendämmmaterialien. IBP-Mitteilung 514, Fraunhofer Institut für Bauphysik 2011.

[3] DIN 4108-03: 2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. Beuth Verlag Berlin.

[4] DIN EN 15026: 2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Beuth Verlag Berlin.

[5] DIN EN ISO 13788: 2001-11: Wärme- und Feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen. Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren. Berechnungsverfahren. Beuth Verlag Berlin.

[6] Glaser, H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958), H. 11, S. 358-364 und H. 12, S. 386-390

[7] Krus, M., Holm, A.: Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte. Beitrag zum 11. Bauklimatischen Symposium in Dresden, Band 2, 423–432, Eigenverlag TU Dresden, Institut für Bauklimatik, 1999.

[8] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1994.

[9] Marin, C.: Atlas Environment du Monde Diplomatique, 2007: La Maison écologique, Nr. 37, Feb-Mar 2007.

[10] Nicolai, A., Grunewald, J., Fechner, H.: DELPHIN: Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransport. www.bauklimatik-dresden.de/delphin, eingesehen am 03.08.2012.

[11] Scheffler, G., Plagge, R., Häupl, P.: Hygrische Materialmodellierung und ihre Abhängigkeit vom Prozess und der Prozessdynamik, Bauphysik 29 (2007) 164-177.

[12] Scheffler, G.A., Plagge, R.: Ein Trocknungskoeffizient für Baustoffe. Bauphysik 31 (2009) 125-138.

[13] Tuller, M., Or, D.: Unsaturated hydraulic conductivity of structured porous media – A review of configuration-based models. Vadoze Zone Journal 1: 14-37 (2002).

[14] WTA Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2002.

[15] WTA Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2002.

[16] WTA Merkblatt 6-4-01/D: Innendämmung nach WTA-I – Planungsleitfaden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2009.

[17] WTA Merkblatt 6-5-13/E: Innendämmung nach WTA-II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, Entwurfsveröffentlichung 2013.

Hinweis: Diese Broschüre wurde von der Xella Porenbeton Schweiz AG herausgegeben. Wir beraten und informieren in unseren Druckschriften nach bestem Wissen und dem neuesten Stand der Technik bis zum Zeitpunkt der Drucklegung.

Da die rechtlichen Regelungen und Bestimmungen Änderungen unterworfen sind, bleiben die Angaben ohne Rechtsverbindlichkeit. Eine Prüfung der geltenden Bestimmungen ist in jedem Einzelfall notwendig.

Stand 02/2014/SYT-001-00068/2.000/06.15

**Xella Porenbeton Schweiz AG**
Steinackerstrasse 29
8302 Kloten

**Xella Kundeninformation**

043 388 35 35
043 388 35 88
info.ch@xella.com
**www.ytong.ch**

Ytong, Silka and Multipor are registered trademarks of the Xella Group