

Sanierungs-Studie

Lösungen für die Luftdichtheit bei energietechnischen Sanierungen von Dachkonstruktionen

Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen

Sub-and-Top: Vergleich des Bauschadensfreiheitspotentials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d -Wert

Computergestützte Simulationsberechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports von verschiedenen Möglichkeiten bei der Dachsanierung unter Berücksichtigung der natürlichen Klimabedingungen und innerbaustofflichen Flüssigkeitstransporte



Literatur

- [1] DIN 4108-7: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele“, Beuth-Verlag, Berlin, 08/2001
- [2] DIN 4108-3: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“, Beuth-Verlag, Berlin, 07/2001
- [3] Tagung Schimmelpilze im Wohnbereich: „Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht – Beurteilung durch aw-Werte oder Isoplethensysteme?“, Klaus Sedlbauer, Martin Krus, Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 26.06.2002
- [4] DIN EN 15026: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“, Beuth-Verlag, Berlin, 07/2007
- [5] WUFI Pro 4.2: „Berechnung des eindimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen“, Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 08/2008
- [6] WUFI 2D 3.2: „Berechnung des zweidimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen“, Fraunhofer IBP, Holzkirchen
- [7] Delphin 5: „Numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport“, Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden, Dresden
- [8] DIN EN ISO 12572: „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit“, Beuth-Verlag, Berlin, 09/2001
- [9] WTA Merkblatt 6-2-01/D: „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. –WTA-Referat 6 Physikalisch-Chemische Grundlagen, München, 05/2002
- [10] Studie: „Berechnung des Bau-schadensfreiheitspotential von Wärmedämmkonstruktionen in Holz- und Stahlbauweise“, Moll bauökologische Produkte GmbH, 08/2006
- [11] Deutsche Bauzeitung; Heft 12/89 Seite 1639 ff.

Sanierungslösungen mit hoher Sicherheit

Literatur	2
Einführung	4
Teil A. Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen	4
Goldene Regel 1/3 zu 2/3	4
Quellen für einen Feuchtigkeitseintrag	4
Berechnungsmodelle für Diffusionsvorgänge	5
Berechnung nach DIN 4108-3 [2]	5
a) Verfahren nach Glaser	5
b) Verfahren nach Glaser mit Jenisch-Klimadaten	5
Berechnung nach DIN EN 15026 [4]	5
Berechnungsmodelle für konvektiven Eintrag	6
Anreicherung der Feuchtigkeitsmenge infolge innerer Konvektion	6
Eisschichten sind Dampfsperren	6
s_a -Wert und μ -Wert	6
Messunsicherheiten bei hochdiffusionsoffenen Materialien	7
Bewertung der Feuchtigkeitseinflüsse. Definition des Bauschadensfreiheitskriteriums	7
Untersuchte Konstruktionen	
Fall 1: Außen liegende Luftdichtung	8
Fall 2: Mittig liegende Luftdichtung	8
Fall 3: Innen liegende Luftdichtung	8
Ergebnisdiskussion	9
Berechnungen	
Konstruktionen mit außen liegender Luftdichtungsebene	9
Mangelhafte bzw. fehlende innere Luftdichtheit (Innenbekleidung) (Fall 1a)	9
Vollflächig vorhandene innenseitige Luftdichtung (Innenbekleidung) (Fall 1b)	9
Konstruktionen mit mittig liegender Luftdichtungsebene	
ohne Innenbekleidung (Fall 2)	10
Konstruktionen mit innen liegender Luftdichtungs- und Dampfbremsebene	
ohne Innenbekleidung (Fall 3)	10
Fazit Vergleich Luftdichtung außen zu Luftdichtung und Dampfbremse innen	11
10 Punkte führen zur dauerhaft sicheren Konstruktion	11
Teil B. Sub-and-Top-Vergleich des Bauschadensfreiheitspotentials	
bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_a -Wert	12
Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials	13
Untersuchte Konstruktionen	13
Fall 1: Diffusionsoffenes Unterdach	13
Fall 2: Unterdachplatte aus 60 mm Holzweichfaser	13
Fall 3: Unterdachplatte aus 35 mm Polyurethan	13
Ergebnisdiskussion	14
Fazit Vergleich von Sub-and-Top-verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen	14
Ziel des Bauens	15
8 Punkte führen zu dauerhaft sicherer Konstruktion und Verarbeitung	15

Luftdichtheit bestehender Dachkonstruktionen – welche Möglichkeiten der Verbesserung bieten sich?

Einführung:

Es ist allgemein bekannt, dass Luftdichtheit die Voraussetzung für die Funktion einer Wärmedämmkonstruktion ist. Luftdichte Konstruktionen sorgen für ein behagliches Innenraumklima und helfen Bauschäden durch Auffeuchtung infolge Kondensation zu vermeiden. Insbesondere konvektive Feuchtströme können große Mengen an Feuchtigkeit innerhalb kürzester Zeit in eine Wärmedämmebene eintragen und damit sowohl die Tragkonstruktion als auch die Wärmedämmung in ihrer Funktion gefährden. Nicht selten führt dies zu Schimmelbildung und Beeinträchtigung der Funktion der Konstruktion.

Bei bestehenden Dachkonstruktionen stellt sich die Frage, mit welchen Möglichkeiten die im Regelfall mangelhafte Luftdichtheit bei der energetischen Sanierung in Kombination mit einer erhöhten Dämmstärke aufgewertet werden kann.

Dabei sind zunächst die verschiedenen Möglichkeiten hinsichtlich des Einbaortes zu prüfen.

In der aktuell gültigen DIN 4108-7 [1] wird in den Planungsempfehlungen angegeben, dass die Luftdichtheitsschicht „in der Regel [...] raumseitig der Dämmebene und möglichst auch raumseitig der Tragkonstruktion anzuordnen“ ist. Diese Empfehlung der Norm setzt den idealtypischen Zustand eines Neubauvorhabens voraus bzw. bei einer Dachsanierung ist dieser nur unter großem Aufwand zu erreichen und mit großen Unannehmlichkeiten für die Bewohner des zu sanierenden Objekts verbunden. Dementsprechend kann gemäß der Normung die Luftdichtheit von Gebäuden in jeder Ebene des Bauteils realisiert werden.

Bei der Wahl der Lage einer Luftdichtungsebene muss der Tauwasserausfall in der Konstruktion entsprechend den

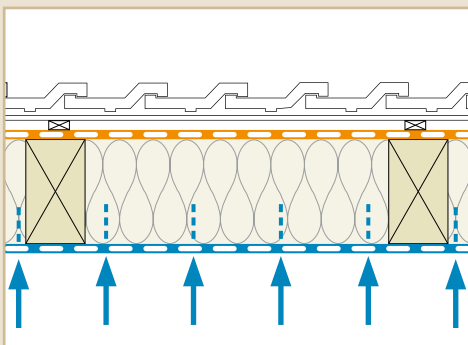
Anforderungen der DIN 4108-3 [2] betrachtet werden. Verfügt eine innenseitig angeordnete Luftdichtungsebene über einen zu geringen Diffusionswiderstand (s_d -Wert), kann ggf. zuviel Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringen und in Abhängigkeit der folgenden Bauteilschichten als Tauwasser ausfallen – ist eine Luftdichtungsebene außenseitig mit einem zu hohen Sperrwert vorhanden, kann es bei niedrigen Widerständen innen ebenfalls zu einer Feuchteakkumulation in der Konstruktion kommen.

Ziel dieser Studie ist es, die einzelnen Varianten zu untersuchen, zu bewerten und Empfehlungen für nachhaltig sichere Konstruktionen aufzuzeigen, die über ein möglichst großes Bauschadensfreiheitspotential verfügen. Fehlertolerante Aufbauten sind beim Bauen im Bestand besonders wichtig.

A. Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen

Diffusionsvorgänge in der Konstruktion lassen sich zuverlässig bewerten

1. Feuchteinwirkung auf eine Dämmkonstruktion im Winter



Über eine Dampfbrems- und Luftdichtungsebene mit einem s_d -Wert von 3 m gelangen lediglich 5 g Wasser pro Quadratmeter am Tag in die Konstruktion

Goldene Regel 1/3 zu 2/3

Die DIN 4108-3 [2] gibt einen Verweis auf die sogenannte 20 %-Regel, die besagt, dass ohne rechnerischen Nachweis 20 % des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes (bei gleich bleibenden Wärmeleitgruppen innerhalb der Konstruktion ist das 1/5 der Gesamtwärmedämmstärke) unterhalb der diffusionshemmenden Bauteilschicht angeordnet werden darf. Wird diese Vorgabe überschritten ist ein rechnerischer Nachweis zu führen.

Hintergrund ist, dass bei Berücksichtigung der Normklimabedingungen bei Konstruktionen mit Dämmstoffen gleicher Wärmeleitgruppe von innen gesehen nach ca. 1/3 der Gesamtdämmstärke die Taupunkttemperatur ($9,2^\circ\text{C}$) unterschritten wird. Liegt die Luftdichtungsebene hinter dem Taupunkt kann es zu einem Tauwasserausfall in unbekannter Höhe kommen. Kritische Feuchtigkeitsgehalte können bereits ab einer rel. Luftfeuchtigkeit von über 80 % erreicht werden. Ab diesem Feuchteniveau sind zwischen 0°C und 50°C Wachstumsbedingungen für fast alle Schimmelpilze erreicht [3].

Darüber hinaus kann die Bildung von Tauwasser an Luftdichtungsbahnen, die im Frostbereich einer Konstruktion angeordnet werden, zur Bildung einer Eisschicht führen. Diese verhindert jede Art von Feuchtetransport durch die Luftdichtungsebene (z. B. Diffusion oder Gasaustausch durch Poren), da Eis praktisch dampfdicht ist. Als Folge können weitere bauteilschädigende Feuchtigkeitsmengen anfallen.

Quellen für einen Feuchtigkeitseintrag

Zwei grundlegende Ursachen für einen Feuchteintrag in Wärmedämmkonstruktionen werden unterschieden:

- Eintrag durch Diffusion
- Eintrag durch Konvektion

Feuchtigkeitstransporte aus Diffusionsvorgängen lassen sich berechnen durch Anwendung pauschaler stationärer Klimadaten (z. B. gemäß DIN 4108-3 [2]) oder als realitätsnahe instationäre Berechnung der Feuchtetransporte durch Anwendung realer Klima- und Baustoffkenndaten gemäß DIN EN 15026 [4].

Feuchtigkeitstransporte durch Konvektion sind nicht berechenbar und führen

oft zu einer Feuchtigkeitsmenge in der Konstruktion, die im Vergleich zur Diffusion mehrere hundert mal größer sein kann.

Berechnungsmodelle für Diffusionsvorgänge

Für die Berechnung der Feuchtetransporte durch Diffusion innerhalb der Konstruktion stehen verschiedene Berechnungsmodelle mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Verfügung.

In der DIN 4108-3 [2] wird die Tauwasser- bzw. Verdunstungsmenge, die durch Diffusion in das betrachtete Bauteil hinein- bzw. herausgelangen kann, mit standardisierten Klimabedingungen errechnet. Für die Berechnung stehen 2 Blockklimata (Winter- bzw. Sommerklima) zur Verfügung.

Als Option ist in der DIN 4108-3 das Verfahren nach Jenisch enthalten. Dieses liefert differenziertere Ergebnisse aufgrund regional angepasster Klimarandbedingungen.

Die beiden in der DIN 4108-3 genannten Ansätze erlauben keine detaillierte Betrachtung der Wärme- und Feuchteströme. Es ist nicht möglich, den genauen Feuchtegehalt eines der eingesetzten Materialien zu bestimmen. Das Glaserverfahren dient seit Jahrzehnten im Baubereich ausschließlich der groben Abschätzung von Tauwasser- bzw. Verdunstungsmengen.

Die instationären Berechnungsmodelle gemäß DIN EN 15026 [4], wie sie im WUFI pro [5] bzw. WUFI 2D [6] oder im Delphin [7] enthalten sind, simulieren die Feuchte- und Wärmeströme innerhalb von Konstruktionen. Werden stündlich ermittelte Klimadaten zur Berechnung verwendet, liefern diese mit weitem Abstand die genauesten Ergebnisse.

Alle beschriebenen Berechnungsmodelle gehen davon aus, dass die Schichten im Bauteil luftdicht sind.

Berechnung nach DIN 4108-3 [2]

a) Verfahren nach Glaser

Der Feuchtigkeitsströme werden bei einem pauschalierten Klima von 60 Tagen Winter (-10°C außen / 80 % rel. Luftfeuchte und 20°C innen / 50 % rel.

Luftfeuchte) und 90 Tagen Sommer ($+12^{\circ}\text{C}$ innen und außen / 70 % rel. Luftfeuchte, im Dachbereich 20°C außen) berechnet.

Die Konstruktionen müssen folgende Grenzen einhalten:

Die Tauwassermenge darf bei nicht kapillar aufnahmefähigen Bauteilschichten (z. B. bei Folien) 500 g/m^2 nicht überschreiten. Die Tauwassermenge in der Winterperiode muss geringer sein als die Verdunstungsmenge im Sommer.

b) Verfahren nach Glaser mit Jenisch-Klimadaten

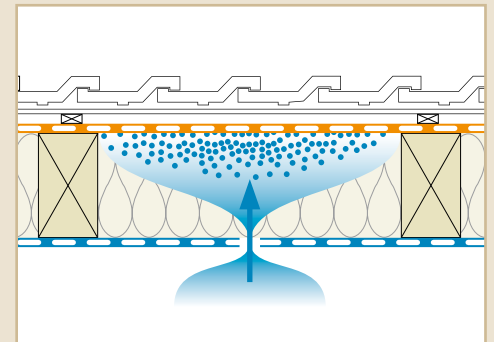
Das Verfahren nach Jenisch rechnet je nach Region mit 12 pauschalen Klimadatensätzen, für jeden Monat einen Klimaansatz mit einer gemittelten Temperatur außen und innen. Im Winter liegen die Temperaturansätze außen nur um 0°C (und nicht wie beim Verfahren nach Glaser bei -10°C) und im Sommer je nach Region bei 18°C (und nicht wie beim Verfahren nach Glaser bei 12°C). Die Konstruktionen werden also ohne außenseitige Frostperiode berechnet und zeigen demnach deutlich unkritischere Ergebnisse als beim Verfahren nach Glaser. Die Ergebnisse sind dementsprechend zu werten. Das Verfahren nach Jenisch ist zwar noch in der DIN 4108-3 erwähnt, wird heute praktisch aber nicht mehr eingesetzt. Für genaue Ergebnisse werden instationäre Rechenverfahren verwendet.

Berechnung nach DIN EN 15026 [4]

Wirklich realistische Ergebnisse liefern die instationären Berechnungsverfahren wie WUFI pro [5], WUFI 2D [6] oder Delphin [7]. Sie berechnen den Feuchte- und Wärmetransport in der Konstruktion basierend auf realen Klimadaten (Temperatur, Luftfeuchte, (Schlag-) Regen, Sonne, Wind usw.) bzw. Baustoffeigenschaften (Diffusion, Wasseraufnahme, -speicherung und -transport usw.) und der geographischen Ausrichtung der Gebäudeteile (Neigung, Himmelsrichtung). Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur können für jeden Punkt der betrachteten Konstruktion ausgegeben werden.

Unwägbarkeiten: Feuchteinträge durch Fugen (Konvektion) können derzeit nur hilfswise berechnet werden

2. Feuchteintrag in die Dämmung durch Leckagen



Über eine 1 mm breite Fuge sind Feuchteinträge von bis zu 800 g Wasser pro Quadratmeter am Tag möglich

Genauere Ergebnisse mit instationären Berechnungsmodellen

Stationäre Modelle

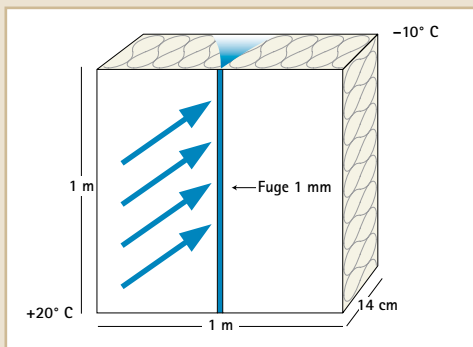
- Verfahren nach Glaser
- Verfahren nach Glaser mit Jenisch-Klimadaten
- => liefern grobe Anhaltswerte

Instationäre Modelle

- WUFI pro / WUFI 2D
- Delphin
- => liefern genaueste Werte für Feuchtegehalte für jede Position im Bauteil - ideal für die Berechnung der Bauteilsicherheit

Feuchteintrag in die Konstruktion durch Undichtheiten in der Dampfbremse

3. 1 mm Fuge = 800 g/24 h pro m Fugenlänge



Feuchtetransport
 durch Dampfbremse: $0,5 \text{ g/m} \times 24 \text{ h}$
 durch 1 mm Fuge: $800 \text{ g/m} \times 24 \text{ h}$
Erhöhung Faktor: 1.600

Randbedingungen:
 Dampfbremse s_d -Wert = 30 m
 Innentemperatur = $+20^\circ \text{ C}$
 Außentemperatur = -10° C
 Druckdifferenz = 20 Pa
 entsprechend
 Windstärke 2-3
 Messung: Institut für Bauphysik, Stuttgart [11]

Konvektion und Simulation

Konvektionsströme durch Leckagen können nur annäherungsweise berechnet werden. Wird die Innenbekleidung bei der Berechnung weggelassen, erfolgt der Feuchteintrag ausschließlich durch Diffusion. Die wahren Einträge durch Konvektion sind höher. Hohe μ -Werte begünstigen Tauwasserausfall.

Berechnungsmodelle für konvektiven Eintrag

Feuchtigkeitseinträge in Konstruktionen durch Konvektion (Strömung feuchtwarmer Luft) lassen sich derzeit noch nicht mit kommerziellen Softwarelösungen simulieren. Der Antrieb der Konvektion ist der Druckunterschied zwischen dem Inneren eines Gebäudes und der Außenluft. Dieser Druckunterschied resultiert aus der Windanströmung des Gebäudes von außen und dem Aufsteigen der beheizten Luft innerhalb des bewohnten Raums. Als Annäherung kann der Feuchtetransport durch Leckagen in eine Konstruktion berechnet werden, indem diffusionshemmende innere Bauteilschichten (z. B. Dampfbremsebenen oder Innenbekleidungen) unberücksichtigt bleiben.

Da es sich hier nur um Diffusionsströme handelt und der Antrieb der Druckunterschiede fehlt sind in der Realität die Feuchtigkeitsbelastungen durch Konvektion wesentlich höher. Bei Luftströmungen durch Leckagen konzentriert sich der Feuchteintrag auf eine kleine Fläche. Dadurch ist dieser um ein Vielfaches höher, als es die Rechenergebnisse darstellen können. Durch Konvektion kann durch eine Fuge von 1 mm Breite und 1 m Länge (= $1/1000 \text{ m}^2$) eine Feuchtigkeitsmenge von 800 g/m und Tag durch Konvektion in die Wärmedämmkonstruktion gelangen.

Soviel Feuchtigkeit kann auch die diffusionsoffenste Unterspannbahn nicht austrocknen lassen, zumal der Diffusionsstrom eines dünnen Bauteils bei einer geringen/fehlenden Druckdifferenz in der Praxis viel niedriger ist, als die s_d -Werte dies vermuten lassen (siehe Absatz s_d -Wert und μ -Wert).

Anreicherung der Feuchtigkeitsmenge infolge innerer Konvektion

Konvektionsströme können auch innerhalb von Konstruktionen auftreten. Durch die Erwärmung der Konstruktion von außen beim direkten Bescheinen durch die Sonne kann Feuchtigkeit innerhalb des Bauteils aufsteigen und sich ggf. an Stellen sammeln, an denen weitere Konvektionsvorgänge, z. B. durch Wechsel, unterbrochen sind.

Eisschichten sind Dampfsperren

Kommt es zu einem Tauwasserausfall an Materialschichten, die im Frostbereich liegen (z. B. an außen liegenden Luftdichtungsbahnen), kann sich dort bei Minustemperaturen eine Eisschicht bilden. Infolge der verhinderten Austrocknung nach außen aus der Konstruktion heraus kommt es zur weiteren Bildung von sehr großen Kondensatmengen, die wiederum gefrieren. Das Resultat ist eine verringerte Dämmwirkung des eingesetzten Dämmstoffes sowie eine starke Gefährdung der in der Konstruktion enthaltenen Materialien.

s_d -Wert und μ -Wert

Entscheidend für die Tauwasserbildung ist zunächst der μ -Wert (Dampfdiffusionswiderstandszahl [-]). Er beschreibt die „Qualität“ des Baumaterials hinsichtlich einer Sperrwirkung. Der s_d -Wert (äquivalente Luftschichtdicke [m]) berücksichtigt zusätzlich die Stärke eines Baustoffes. Mit zunehmender Materialstärke verlängert sich die Zeitdauer, die ein Wassermolekül für den Transportvorgang durch den Baustoff benötigt.

Unterspannbahnen sind diffusionsoffen und haben einen niedrigen s_d -Wert. Aufgrund der geringen Schichtdicke ist der μ -Wert jedoch vergleichsweise hoch.

In Zahlen: Eine Unterdachbahn mit einem mikroporösen Funktionsfilm hat bei einem s_d -Wert von $0,02 \text{ m}$ und einer Dicke von $0,50 \text{ mm}$ einen μ -Wert von 40. Im Vergleich mit einem faserförmigen Wärmedämmstoff (μ -Wert = 1) hat die Bahn eine um den Faktor 40 höhere Diffusionsdichtheit. Dadurch kann es auch an diffusionsoffenen Unterdachbahnen zu einem Tauwasserausfall kommen.

Diffusionsoffene Unterdachbahnen/äußere Luftdichtungsbahnen lassen außerdem wesentlich weniger Feuchtigkeit austrocknen, als der μ -Wert und s_d -Wert vermuten lassen. Grund ist die geringe/fehlende Druckdifferenz eines dünnen Bauteils unter den klimatisch bedingten Situationen.

Hintergrund: Antrieb für einen Diffusionsstrom sind immer Druckdifferenzen. Befindet sich auf beiden Seiten das gleiche Klima (z. B. 10° C und 80 % rel. Luftfeuchtigkeit), dann findet kein Feuchtigkeitstransport statt. Erst wenn Temperatur oder rel. Feuchtigkeit auf den beiden Seiten des Bauteils unterschiedlich sind, wollen sich Moleküle über Diffusion von einer Seite zur anderen bewegen.

Bei einer Unterspannbahn/äußeren Luftdichtungsbahn bestehen wegen der geringen Dicke des Materials keine Temperaturunterschiede, so dass man sich auf die Differenzen der relativen Luftfeuchtigkeiten konzentrieren kann. Diese sind im Winter bei Tauwassergefahr an der Unterspannbahn/äußeren Luftdichtung denkbar gering, wenn innenseitig der Bahn 80 % relative Luftfeuchtigkeit und mehr bestehen und außenseitig ähnliche Feuchtigkeitssituationen vorhanden sind.

Sicherheitsvorteile bieten hier Unterdachbahnen mit monolithischen Funktionsfilmen. Im Falle eines Kondensatenausfalls an der Innenseite der Bahn innerhalb der Konstruktion wird Feuchtigkeit aktiv durch Diffusion entlang der Molekülketten aus dem Bauteil heraus transportiert. Unter Feuchteeinfluss verringert sich der Diffusionswiderstand von pro clima SOLITEX-Bahnen – die Gefahr von Eisbildung sinkt. Bei mikroporösen Membranen hingegen kommt es bei durch Tauwasserbildung auf der Bahn zu einer verringerten Diffusionsfähigkeit. Feuchtigkeit kann ausschließlich passiv im gasförmigen Zustand durch die Bahnen hindurchgelangen – die Gefahr von Eisbildung ist höher als bei monolithischen Membranen.

Messunsicherheiten bei hochdiffusionsoffenen Materialien

Eine für die Bestimmung des Diffusionswiderstandes maßgebliche Norm, die DIN EN ISO 12572 [8], enthält im Abschnitt 9 „Messgenauigkeit“ eine Auflistung über mögliche Fehlerquellen. Es werden neben der Qualität der Prüfkörper sowie der Genauigkeit der Messeinrichtungen auch die Klimarandbedingungen während der Messung (Luftdruckschwankungen) als mögliche

das Messergebnis fehlerhaft beeinflussende Ursachen angegeben. Die DIN EN ISO 12572 ist entsprechend den Angaben unter Abschnitt 9.8 nicht für die Messung der Eigenschaften von hohen Wasserdampfdurchlasskoeffizienten (d. h. mit $s_d < 0,1$ m) geeignet. Aus den beschriebenen Gründen ist in der DIN 4108-3 für Messungen nach DIN EN ISO 12572 bei der Diffusionsberechnung auf diffusionsoffeneren Materialien ein s_d -Wert von 0,1 m anzusetzen.

Bewertung der Feuchtigkeitseinflüsse. Definition des Bauschadensfreiheitskriteriums

Die in Abb. 1. + 2. beschriebenen Feuchtigkeitseinträge können innerhalb von Bauteilen zu einer erhöhten rel. Luftfeuchtigkeit bis hin zur Kondensatbildung führen. In Kombination mit einer ausreichend hohen Temperatur an der Stelle des erhöhten Feuchtegehaltes kann es bei ausreichend langer Einwirkung und einer geeigneten Nahrungsquelle zur Auskeimung von Schimmelpilzsporen kommen. Schimmelpilze gelten als so genannte „Erstkolonisierer“, da sie auch „unter biologisch ungünstigen Umgebungsbedingungen“ [3] gedeihen können.

Sedlbauer und Krus [3] geben für das Erreichen von Wachstumsbedingungen für fast alle im Baubereich relevanten Schimmelpilze eine rel. Luftfeuchtigkeit von 80 % an. Der optimale Bereich liegt je nach Spezies bei 90 bis 96 % rel. Luftfeuchtigkeit. Die in den Zeiträumen erhöhter Feuchtegehalte vorhandene Temperatur muss für die Auskeimung der Sporen, bzw. für das Wachstum des Pilzes im Bereich zwischen 0 und 50° C liegen. Die ideale Wachstumstemperatur liegt bei etwa 30° C.

Bei dieser Temperatur können auf Mineralwolle ab einer rel. Luftfeuchtigkeit von 92 % Schimmelpilze auskeimen und wachsen. Ist die Temperatur geringer, sind erhöhte rel. Luftfeuchten für die Besiedelung erforderlich.

„Verunreinigungen durch Staub, Fingerabdrücke und Luftverschmutzung (Küche, Rückstände beim Duschen usw.) oder Ausdünstungen des Menschen“ reichen aus, um auf weniger geeigneten Untergründen die Voraussetzungen für

Feuchteintrag in die Konstruktion kann zu Bauschäden und Schimmel führen

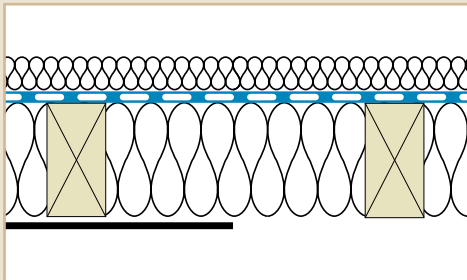
4. Schimmelpilze wachsen auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen



Sedlbauer und Krus [3] geben für das Erreichen von Wachstumsbedingungen für fast alle im Baubereich relevanten Schimmelpilze ein rel. Luftfeuchtigkeit von 80 % an. Der optimale Bereich liegt je nach Spezies bei 90 bis 96 % rel. Luftfeuchtigkeit.

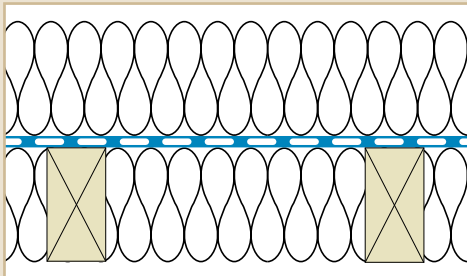
Drei Konstruktionen im Vergleich

5. Fall 1: Luftdichtung außen mit luftundichter Innenbekleidung (1a) und mit luftdichter Innenbekleidung (1b)



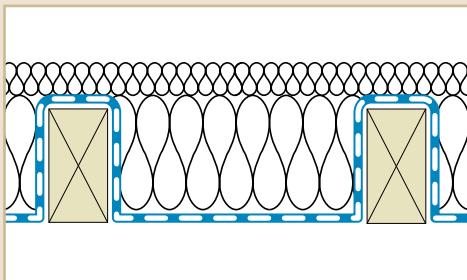
- Holzweichfaser 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

6. Fall 2: Luftdichtung mittig



- Holzweichfaser 120 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

7. Fall 3: Luftdichtung innen



- Holzweichfaser 35 mm
- Luftdichtung, Sub-and-Top-verlegt ($s_d =$ feuchtevariabel 0,05-2,0 m).
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

einen Bewuchs mit Schimmelpilzen zu verbessern. Diese Randbedingungen haben einen Einfluss auf die Höhe der erforderlichen rel. Luftfeuchtigkeit bzw. Temperatur, die für das Auskeimen erforderlich ist.

Temperaturen unterliegen im Tag-Nacht-Wechsel Schwankungen, die dazu führen können, dass zeitweise keine Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum vorliegen. In [3] wird nach Zöld angegeben, dass bei Temperaturen unter 20°C Schimmelpilzgefährdung vorliegt, wenn über 5 Tage an mehr als 12 Stunden eine rel. Luftfeuchtigkeit oberhalb von 75 % in der Konstruktion herrscht.

Das Kriterium für eine durch mögliches Schimmelpilzwachstum gefährdete Konstruktion kann wie folgt definiert werden:

1. Temperatur im Tagesmittel über 0°C
2. Rel. Luftfeuchtigkeit im Tagesmittel dauerhaft über 90 %
3. Temperatur und rel. Luftfeuchte müssen über lange Zeit in diesem Bereich vorhanden sein.

Untersuchte Konstruktionen

In ersten Teil dieser Studie werden auf Grundlage der formulierten Kriterien folgende Konstruktionen auf ihre mögliche Schimmelwahrscheinlichkeit hin untersucht. Diese werden mit WuFi pro [5] des Fraunhofer-Institutes mit dem Klimadatensatz für Holzkirchen verglichend für folgende Konstruktionen durchgeführt:

1. Steildach mit 40° Dachneigung nach Norden orientiert, Dacheindeckung aus grauen Dachziegeln
2. Sparrenhöhe Bestand: 12 cm mit Vollsparrendämmung aus faserförmigen Dämmstoffen, z. B. Mineralwolle

Das Innenklima wird entsprechend den Annahmen des WTA-Merkblatts 6-2-01/D [9] (in WUFI enthalten) mit normaler Feuchtebelastung festgelegt, wie es in Räumen bewohnter Häuser (Schlaf- und Wohnräume, Bäder und Küchen) vorhanden ist.

Die angegebenen Konstruktionen werden zur Abschätzung des Einflusses der Dichtheit der Innenbekleidung mit vollflächig vorhandener Gipsbauplatte (Stärke 10 mm) und ohne Gipsbauplatte berechnet, um den Einfluss von Profildrehschalungen bzw. mangelhaft luftdichten Innenbekleidungen zu berücksichtigen.

Fall 1: Außen liegende Luftdichtung:

Überdämmung der Sparren mit Holzweichfaser 35 mm, darunter außen liegende diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m).

(Abweichend von den Empfehlungen der DIN EN ISO 12572 bzw. der DIN 4108-3 wird die Berechnung mit einem s_d -Wert von 0,02 m (statt der in der Norm festgelegten 0,10 m) durchgeführt)

Fall 2: Mittig liegende Luftdichtung:

Überdämmung der Sparren mit Holzweichfaser 120 mm, darunter außen liegende diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m).

(Abweichend von den Empfehlungen der DIN EN ISO 12572 bzw. der DIN 4108-3 wird die Berechnung mit einem s_d -Wert von 0,02 m durchgeführt.)

Fall 3: Innen liegende Luftdichtung:

Überdämmung der Sparren mit Holzweichfaser 35 mm, innen liegende Luftdichtung, Sub-and-Top verlegt ($s_d =$ feuchtevariabel 0,05 - 2,0 m).

Ergebnisdiskussion:

Untersucht wird die Feuchtigkeitssituation an der Grenzfläche der Luftdichtungsbahn. Dazu wird

- die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur im Grenzbereich zur Luftdichtungsbahn (Fall 1 & 3) bzw. zur Holzweichfaserplatte (Fall 2) berechnet.
- der Wassergehalt der Wärmedämmung in der Grenzschicht berechnet.

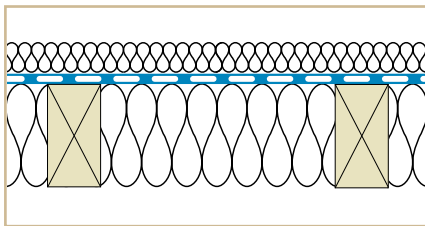
Ziel:

Innerhalb von wärmegeprägten Konstruktionen treten die höchsten rel. Luftfeuchtigkeiten bzw. Feuchtigkeitsgehalte an der Grenzschicht beim Wechsel von Materialien mit unterschiedlichen μ -Werten auf. Der Wassergehalt der Wärmedämmung in der äußersten Schicht (1 mm) und die relative Luftfeuchtigkeit sollen nicht signifikant erhöht sein.

Berechnungen:

Konstruktionen mit außen liegender Luftdichtungsebene

Mangelhafte innerseitige Luftdichtungsebene (Innenbekleidung) (Fall 1a)



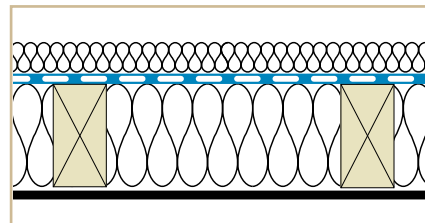
- Holzweichfaser 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02 \text{ m}$)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

Dieser Fall simuliert Konstruktionen mit nicht perfekter Luftdichtung bei Gipsbauplatten, verputzten Flächen, und Profilholzschalungen.

Derartige Konstruktionen erhalten gemäß dem in Abb. 8. + 9. dargestellten Berechnungsergebnis an der Grenzschicht zwischen Wärmedämmstoff und außen liegender Luftdichtungsebene sehr hohe rel. Luftfeuchtigkeiten weit über 90 % bis hin zum Tauwasserausfall. An 157 Tagen pro Jahr liegt die rel. Luftfeuchtigkeit an der Grenzschicht über 90 % - an 15 Tagen kommt es sogar zur Bildung von Tauwasser. Es besteht eine sehr hohe Gefahr von Schimmelpilzbildung, da die hohen rel. Luftfeuchten in einem zeitlichen Zusammenhang mit Temperaturen weit über 0° C stehen. Der Wassergehalt in der Grenzschicht steigt bis über 150 kg/m³ an.

Bei derartigen Konstruktionen mit nicht perfekter Luftdichtung besteht die Gefahr eines Bauschadens.

Perfekte innerseitige Luftdichtungsebene (Innenbekleidung) (Fall 1b)

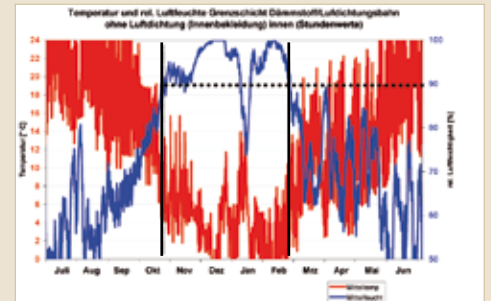


- Holzweichfaser 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02 \text{ m}$)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm
- Gipsbauplatten

Ist im Bestand eine vollflächige Innenbekleidung aus Gipsbauplatten vorhanden, wird diese in der Berechnung als luftdicht angesehen. Der Feuchtigkeits-eintrag in die Konstruktion erfolgt ausschließlich durch Diffusion.

Diese Konstruktion weißt an 84 Tagen pro Jahr sehr hohe rel. Luftfeuchtigkeiten oberhalb von 90 % auf - an 6 Tagen kommt es sogar zum Ausfall von Tauwasser. Die Wärmedämmung wird kurzfristig an der Grenzschicht zur Luftdichtungsbahn mit über 150 kg/m³ an Feuchtigkeit belastet. In dieser Konstruktion gibt es trotz der funktionsfähigen luftdichten Innenbekleidung eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Schimmelbildung an der Grenzschicht Dämmstoff - Luftdichtungsbahn.

8. + 9. Ergebnis für Fall 1a: Luftdichtung außen, luftundichte Innenbekleidung

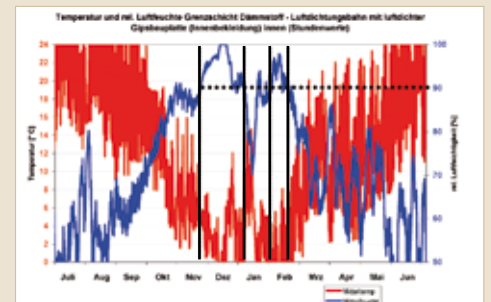


Feuchte an 157 Tagen > 90 %, an 15 Tagen Tauwasser
=> Schimmel sehr wahrscheinlich

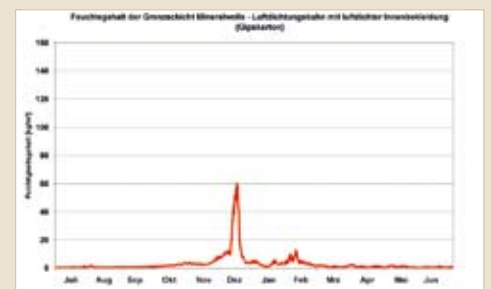


Max. Feuchtegehalt an der Grenzschicht während
=> mehrerer Monate erhöht - über 150 kg/m³

10. + 11. Ergebnis für Fall 1b: Luftdichtung außen, perfekte Luftdichtungsebene

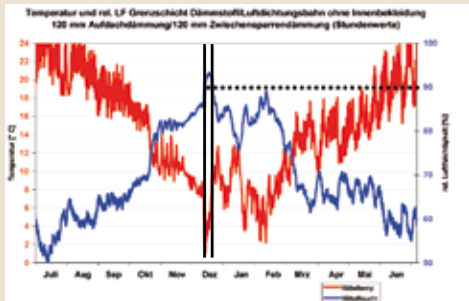


Feuchte an 84 Tagen > 90%, an 6 Tagen Tauwasser
=> Erhöhte Schimmelwahrscheinlichkeit



Max. Feuchtegehalt an der Grenzschicht während
=> mehrerer Monate erhöht - über 150 kg/m³

12. + 13. Ergebnis für Fall 2: Luftdichtung mittig, ohne Luftdichtung innen

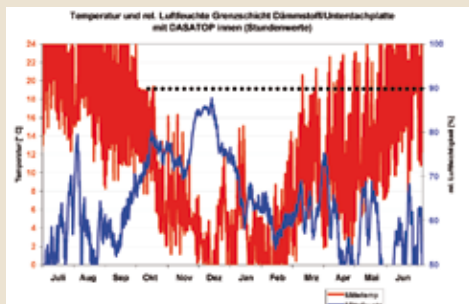


Feuchte an 7 Tagen > 90 %, kein Tauwasser
=> Geringe Schimmelwahrscheinlichkeit



Nur sehr geringe Feuchtegehalte an der Grenzschicht

14. + 15. Ergebnis für Fall 3: Luftdichtung innen, ohne Luftdichtung innen

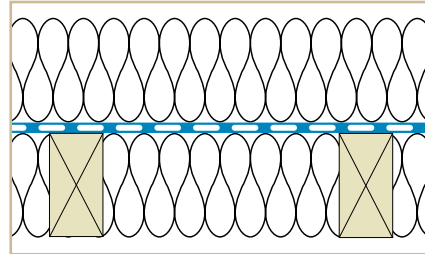


Keine Feuchte > 90 %, kein Tauwasser
=> Schimmel sehr unwahrscheinlich



Unkritische Feuchtegehalte in der Grenzschicht

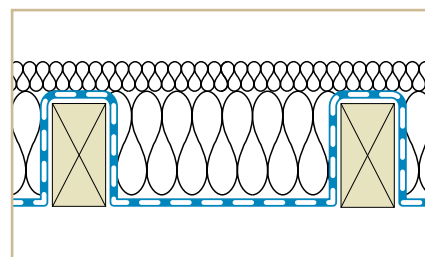
Konstruktionen mit mittig liegender Luftdichtungsebene ohne Innenbekleidung (Fall 2)



- Holzweichfaser 120 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02 \text{ m}$)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

Werden bei 50 % der Wärmedämmung (des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes) vor der Luftdichtungsebene angeordnet, treten rel. Luftfeuchtigkeiten oberhalb von 90 % nur eine Woche innerhalb der Winterperiode auf. Tauwasserbildung findet dabei nicht statt. Ist eine intakte Innenbekleidung vorhanden, liegt die rel. Luftfeuchtigkeit an der Grenzschicht Dämmstoff – Luftdichtungsbahn ganzjährig unterhalb von 90 %. Schimmelpilzwachstum ist hier entsprechend [3] nicht möglich, auch wenn die innere Luftdichtungsebene (Innenbekleidung) Fehlstellen aufweist.

Konstruktionen mit innen liegender Luftdichtungsebene ohne Innenbekleidung (Fall 3)



- Holzweichfaser 35 mm
- Luftdichtung, Sub-and-Top-verlegt ($s_d = \text{feuchtevariabel } 0,05\text{--}2,0 \text{ m}$)
- Faserförmiger Dämmstoff (Mineralwolle) 120 mm

Die Sub-and-Top-Verlegung der Sanierungs-Dampfbremse DASATOP stellt die sichere Luftdichtheit her und schützt durch den feuchtevariablen s_d -Wert die Wärmedämmung in allen Schichten vor

bauteilschädigenden erhöhten Feuchtigkeitsgehalten.

Eine Luftdichtungsbahn oberhalb der Zwischensparrendämmung ist dabei nicht erforderlich. Durch den Einsatz der DASATOP liegt das Feuchtigkeitsniveau in der Wärmedämmung unmittelbar unter der Holzweichfaserplatte im unschädlichen Bereich. Die Feuchtigkeitspitze von 85 % tritt nur sehr kurz bei Temperaturen um den Gefrierpunkt auf. Unter diesen Randbedingungen können Schimmelpilze bei den verwendeten Materialien weder auskeimen, noch ist ein weiteres Schimmelpilzwachstum möglich.

Konstruktionen mit der DASATOP sind bei luftdichter Verlegung und Verklebung keiner Gefahr von Schimmelpilzbildung im Bauteil ausgesetzt. Sie bieten damit die größte Sicherheit für Dämmstoff und Konstruktion.

Fazit Vergleich Luftdichtung außen zu Luftdichtung und Dampfbremse innen

Berechnungen mit instationären Simulationsverfahren unter realen Klimabedingungen ermöglichen eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der tatsächlichen Vorgänge in der Konstruktion. Sie können Risiken der Tauwasserbildung darstellen und lassen Rückschlüsse auf das Bauschadensfreiheitspotential einer Konstruktion zu. Werden Konstruktionen mit außen liegenden Luftdichtungen ohne ausreichende Überdämmung betrachtet, zeigt das Ergebnis rel. Luftfeuchtigkeiten oberhalb von 90 % und große Tauwasserbildung an den Grenzschichten der Wärmedämmung zur Luftdichtung. Als Folge besteht bei Konstruktionen, wie in Fall 1 dargestellt, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Schimmelbildung in der Konstruktion.

Sind Innenbekleidungen nicht vollflächig fugenfrei vorhanden, kann es zu einem hohen Tauwasserausfall innerhalb der Konstruktion kommen. Die innere Dämmschicht kann im Bereich von Zwischenwänden z. B. bei Undichtheiten im Giebelmauerwerk luftdurchströmt werden – in den kalten Jahreszeiten können sich große Mengen Tauwasser bilden. Die Wahrscheinlichkeit von Schimmelpilzwachstum steigt nochmals.

Die Bestimmung der s_d -Werte hochdiffusionsoffener Materialien kann entsprechend den Anmerkungen der DIN EN ISO 12572 einem hohen Messfehler unterliegen. Die Erhöhung des Diffusionswiderstandes der Luftdichtungsbahn um 0,01 m (von 0,02 auf 0,03 m) verursacht eine Erhöhung des max. Feuchtegehaltes an der Grenzschicht Dämmstoff/Luftdichtungsbahn in der Berechnung von Fall 1 mit Innenbekleidung

um mehr als 60 %. Steigt der Wert auf 0,04 m erhöht sich der max. Feuchtegehalt um über das Doppelte (120 %) des Ausgangswertes. Leichte Abweichungen des Diffusionswiderstandes erhöhen also die Gefahr von Schimmelpilzbildung enorm.

Wird die Luftdichtungsebene in die Mitte der Wärmedämmebene verlegt, sinken die rel. Luftfeuchten an der Grenzschicht unterhalb kritische Werte.

Die sicherste Lösung stellt im Vergleich die Konstruktion mit der Sub- and-Top-verlegten Dachsanierungs-Dampfbremse DASATOP dar. Die Wärmedämmung ist durch die innenseitig verlegte Dampfbremse mit einem s_d -Wert bis zu 2 m ausreichend vor der Befeuchtung aus dem Innenraum geschützt. An keiner Stelle innerhalb der Konstruktion treten schimmelkritische Feuchtigkeiten auf.

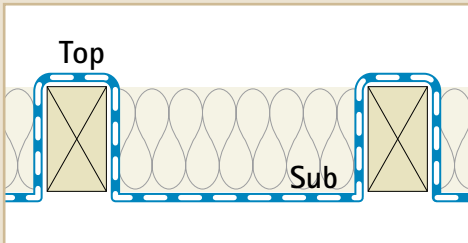
10 Punkte führen zur dauerhaft sicheren Konstruktion

1. Optimal sicher gelten Konstruktionen, die mit Dampfbremse- und Luftdichtungsebenen die 1/3 zu 2/3 Regel einhalten.
2. Je weiter die Luftdichtungsebene in Richtung Innenraum liegt, umso sicherer werden die Konstruktionen. Je weiter außen sich die Luftdichtungsebene befindet, umso problematischer ist die Konstruktion: Das Bauschadensfreiheitspotential ist dann verringert.
3. Vollflächige fugenfreie Innenbekleidungen verhindern bei außen verlegten Luftdichtungsbahnen Feuchteintrag durch Konvektion.
4. Sub- and-Top-Lösungen mit feuchtevariablen Dampfbremse- und Luftdichtungsebenen verringern das Risiko eines Bauschadens, da sich diese unterhalb der Wärmedämmung im warmen Bereich befindet (wärmer als die Taupunkttemperatur). Im Bereich der Sparrendämmung können sie den Diffusionswiderstand einer Unterspannbahn annehmen.
5. Konstruktionen können gemäß den instationären Berechnungsmethoden als sicher angesehen werden, wenn die Luftdichtungsebene raumseitig von 50 % des Gesamtdurchlasswärmewiderstandes liegt. Schädliche Feuchtegehalte in der Grenzschicht werden dann vermieden.
6. Vorteilhaft als Luftdichtungsbahn außen ist eine diffusionsoffene Dachunterspannbahn mit monolithischer Membran (SOLITEX Unterdachbahnen), welche die Feuchtigkeit aktiv entlang der Molekülketten transportieren kann. Dadurch wird die Gefahr von Eisbildung bei unvorhergesehenem Feuchteintrag verringert.
7. Der Einsatz von Zwischensparrendämmungen aus Feuchte absorbierenden Fasern ist bei der Verlegung nach Punkt 5 & 6 von Vorteil, da sich die Feuchtemengen in der Konstruktion verringern und das Bauschadensfreiheitspotential erhöht.
8. Empfehlenswert ist immer die Durchführung einer baubegleitenden Qualitätssicherung. Bei der Sanierung von außen kann die Luftdichtheit mittels Überdrucktest, kombiniert mit künstlichem Nebel, durchgeführt werden. Leckagen lassen sich dann aufspüren und abdichten.
9. Der Diffusionswiderstand von diffusionsoffenen Luftdichtungsbahnen muss äußerst genau eingehalten werden und auch bei hoher relativer Feuchtigkeit gelten.
10. Die Luftdichtung sollte sich möglichst im frostfreien Bereich befinden.

B. Sub-and-Top-Vergleich des Bauschadensfreiheitspotentials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d -Wert

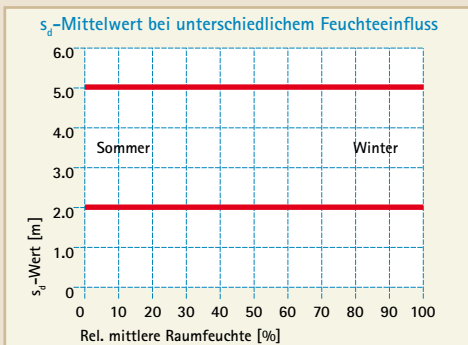
Besondere Sicherheit bei der Sanierung mit feuchtevariablen Sub-and-Top-Bahnen

16. Sub-and-Top-Prinzip



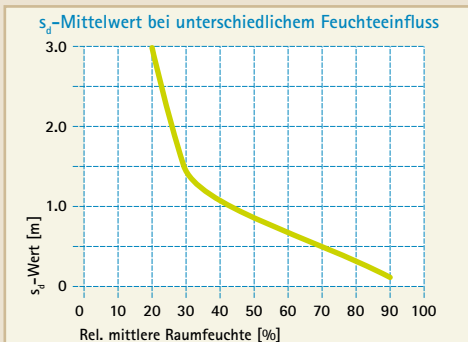
Im Gefach (Sub) diffusionsdichter: Schutz vor Feuchte.
Auf den Sparren (Top) hochdiffusionsoffen: Schnelle Trocknung nach außen.

17. Bahn s_d -Wert 2 m und 5 m



Im trockenen Bereich:
 s_d -Wert 2 bzw. 5 m: Entspricht einer Dampfbremse
Im feuchten Bereich:
 s_d -Wert 2 bzw. 5 m: Entspricht einer Dampfbremse

18. DASATOP s_d -Wert 0,05–2 m



Im trockenen Bereich:
 s_d -Wert 2 m: Entspricht einer Dampfbremse
Im feuchten Bereich:
 s_d -Wert 0,05 m: Entspricht einer Unterdachbahn

In dem ersten Teil dieser Studie wurde zwischen Sanierungssystemen unterschieden, die für die Dachsanierung von außen geeignet sind. Dabei wurden diffusionsoffene Bahnen zur Herstellung der Luftdichtheit verglichen mit Systemlösungen, die zugleich leicht diffusionshemmend sind.

In der folgenden Ausarbeitung werden reine Sub-and-Top-Lösungen betrachtet, die sowohl unterhalb der Wärmedämmung, als auch über die Tragkonstruktion der Konstruktion verlegt werden.

Dabei sind zwei grundlegende Varianten zu unterscheiden:

1. Systeme aus Dampfbrems- und Luftdichtungsbahnen mit feuchtevariablem (veränderlichem) Diffusionswiderstand

Diese verfügen über einen in Abhängigkeit von der umgebenden mittleren rel. Luftfeuchtigkeit variablen Diffusionswiderstand. Bei der Dachsanierungsdampfbremse DASATOP kann dieser Werte zwischen 0,05 und 2 m (siehe Abb. 18) annehmen, je nachdem welche mittlere rel. Luftfeuchtigkeit sich in unmittelbarer Nähe der Bahn einstellt. Informationen zur genauen Wirkungsweise der Feuchtevariabilität enthält die Studie „Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials von Wärmedämmkonstruktionen im Holz- und Stahlbau“ [10].

2. Systeme aus Dampfbrems- und Luftdichtungsbahnen mit konstantem (unveränderlichem) Diffusionswiderstand

Bei diesem Bahnenkonzept werden Funktionsfilme eingesetzt, die keine Veränderung des Diffusionswiderstandes bei unterschiedlicher rel. Luftfeuchtigkeit aufweisen. Beispielhaft sind die Diffusionswiderstände zweier Bahnen mit dem s_d -Wert von 2 m bzw. 5 m in Abb. 17 dargestellt.

Vergleichende Betrachtung der Rücktrocknungsreserven

Werden Bahnen Sub-and-Top-verlegt, ist klar, dass diese oberseitig der Tragkonstruktion einen möglichst geringen Diffusionswiderstand annehmen sollten. Werte unterhalb von 0,1 m sind ideal, damit durch hohe Diffusionsoffenheit möglichst große Mengen an Feuchtigkeit vom Sparren abtrocknen können. Feuchtevariable Dampfbremsen für Zwischensparrendämmungen erreichen einen s_d -Wert im feuchten Bereich von ca. 0,25 m. Sie bieten daher ein geringeres Bauschadensfreiheitspotential als die DASATOP.

Wird der Diffusionsstrom durch ein Material nach DIN 4108-3 [2] im stationären Zustand mittels Berechnung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte g [$\text{kg}/\text{m}^2 \times \text{h}$] erfasst, wird die Leistungsfähigkeit unterschiedlich dichter Bahnen deutlich.

Die Wasserdampfdiffusionsstromdichte wird ermittelt durch die Differenz der Wasserdampfteildrücke p_i (innen) [Pa] und p_a (außen) [Pa] dividiert durch den Wasserdampfdurchlasswiderstand Z [$\text{m}^2 \times \text{h} \times \text{Pa}/\text{kg}$]. Durch Multiplikation mit 24 erhält man den Wasserdampfdurchgang (W_{DD}) [$\text{g}/\text{m}^2 \times 24 \text{ h}$].

Beispielhaft wird der Diffusionsstrom bei Erreichen des Taupunktes kombiniert mit einer winterlichen Außentemperatur berechnet. Für p_i wird ein Wert von 1.163 Pa (9,2° C / 100 % rel. Luftfeuchtigkeit (Taupunkttemperatur bei Normklima)) und für p_a ein Wert von 208 Pa (-10° C / 80 % rel. Luftfeuchtigkeit) zugrunde gelegt.

W_{DD} -Werte für verschiedene s_d -Werte

s_d -Wert [m]	W_{DD} [$\text{g}/\text{m}^2 \times 24 \text{ h}$]
0,05	~ 320
0,10	~ 160
0,50	~ 32
2,0	~ 8
5,0	~ 3
50,0	~ 0,3

Deutlich reduzieren sich die möglichen Wasserdampfdurchgänge bereits bei geringen Erhöhungen der s_d -Werte. Dies hat Auswirkungen auf die Sicherheit einer Konstruktion.

Diese Betrachtung kann nicht unmittelbar auf instationäre Berechnungen übertragen werden, da sich p_i und p_a durch das in der Berechnung verwendete reale Klima und in Abhängigkeit von der Lage in der Konstruktion ständig ändern. Für die Austrocknungssituation sind die Werte beispielsweise aufgrund der geringeren Druckdifferenzen auf beiden Seiten der Bahnen geringer.

Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials

Für die Berechnung von Konstruktionen mit Sub-and-Top-verlegten Bahnen ist die Betrachtung der Entfeuchtungsleistung der Tragkonstruktion (hier Sparren) maßgebend. Bei nicht eng an den Sparren anliegenden Bahnen kann es während der kalten Jahreszeit zu einer Tauwasserbildung oberseitig der Sparren kommen. Diese muss durch das Bahnenmaterial aus der Konstruktion heraustrocknen können. Dafür ist es erforderlich, die Wärme- und Feuchteströme zweidimensional zu betrachten. Wärme- und Feuchteströme erfolgen nicht ausschließlich von innen nach außen. Diffusionsströme können auch innerhalb der Konstruktion stattfinden, z. B. von den Sparrenflanken durch geeignete Dampfbrems- und Luftdichtungsbahnen in die Wärmedämmebene.

Um die Entfeuchtungsleistung darzustellen, wird über die Holzfeuchte der Sparren die zusätzliche Feuchtigkeitsmenge eingebracht. Diese wird mit einem Materialfeuchtegehalt von 80 % (= 2.300 g Wasser pro lfm Sparren) in der Berechnung berücksichtigt und simuliert einen Feuchtigkeitsausfall zwischen Dampfbrems-/Luftdichtungsbahn und Sparren. Aus der errechneten Rücktrocknungsmenge kann anschließend das Bauschadensfreiheitspotential in $[g] \text{ H}_2\text{O}/[\text{m}]$ Sparren pro Jahr errechnet werden. Im Normalfall haben die Sparren einen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 300 g pro lfm.

Das Bauschadensfreiheitspotential beschreibt:

- wie tolerant die Konstruktion bei unvorhergesehener Feuchtebelastung ist und
- wie viel Wasser in eine Konstruktion (unvorhergesehen) eindringen kann und sie bleibt trotzdem bauschadensfrei bleibt

Untersuchte Konstruktionen

1. Steildach mit 40° Dachneigung nach Norden orientiert, Dacheindeckung aus grauen Dachziegeln
2. Sparrenhöhe 12 cm mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle

Die Festlegung des Innenklimas erfolgt mit normaler Feuchtelast.

Fall 1: Diffusionsoffenes Unterdach

Das Unterdach hat in der Berechnung einen s_d -Wert von 0,1 m.

Fall 2: Unterdachplatte aus 60 mm Holzweichfaser

Diese wird zur Vermeidung von Wärmebrücken als zusätzliche Aufsparrendämmung eingesetzt (s_d -Wert = 0,3 m).

Fall 3: Unterdachplatte aus 35 mm Polyurethan

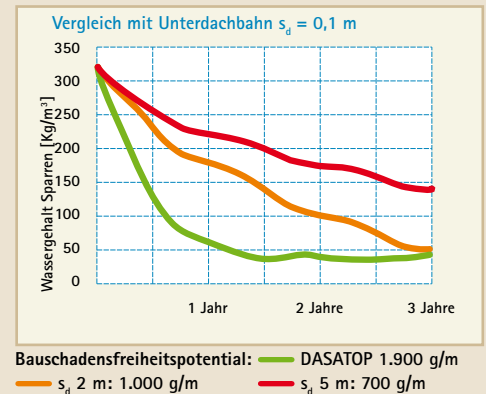
Aufsparrendämmung wie bei Fall 2, jedoch s_d -Wert = 3,5 m.

Jeder der 3 Fälle wird mit 3 unterschiedlichen Dampfbremsen – Sub-and-Top-verlegt – betrachtet:

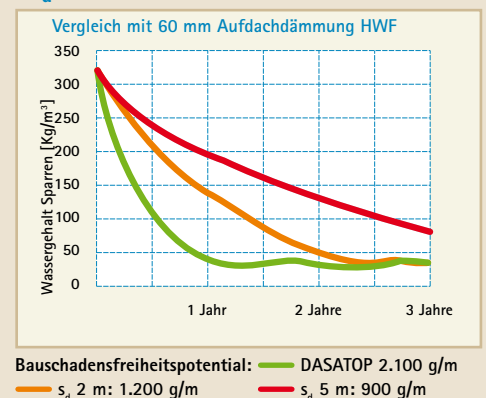
- Dampfbremse DASATOP s_d -Wert feuchtevariabel 0,05 bis über 2 m
- Dampfbremse s_d -Wert 2 m konstant
- Dampfbremse s_d -Wert 5 m konstant

Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials Standort Holzkirchen, Dach

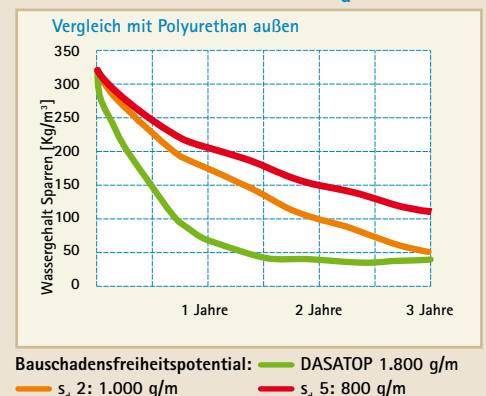
19. Ergebnis für diffusionsoffenes Unterdach ($s_d = 0,1 \text{ m}$)



20. Ergebnis für 60 mm Holzweichfaserplatte außen ($s_d = 0,3 \text{ m}$)



21. Ergebnis mit 35 mm Polyurethan außen ($s_d = 3,5 \text{ m}$)



pro clima Sicherheitsformel

Je höher die Sicherheitsreserve einer Konstruktion, d. h. das Bauschadensfreiheitspotential ist, desto besser ist die Konstruktion bei unvorhergesehenen Feuchtebelastungen vor Schimmel geschützt.

Ergebnisdiskussion

Untersucht wird das Austrocknungsvermögen des in den Sparren vorhanden erhöhten Feuchtigkeitsgehaltes. Dieser wird vergleichend über einen Zeitraum von 3 Jahren für jeden der Fälle mit den unterschiedlichen Dampfbremsbahnen dargestellt.

Bei allen Konstruktionen ist erkennbar, dass bei der Variante mit der feuchtevariablen DASATOP die Materialfeuchte aus dem Sparren am schnellsten entweichen kann.

Unkritische Feuchtegehalte in den Sparren werden bei Unterschreitung des Fasersättigungspunktes des Holzes erreicht. Wird dieser für einen Vergleich der Austrocknungsgeschwindigkeit herangezogen, trocknet der Sparren in der Konstruktion mit der DASATOP etwa dreimal schneller aus als mit der Dampfbremse mit dem konstanten s_d -Wert von 2 m. Im Vergleich zu einer Dampfbremse mit dem konstanten s_d -Wert von 5 m ermöglicht die DASATOP eine fünfmal schnellere Austrocknung bei Konstruktionen mit Aufdachdämmungen. Bei Konstruktionen ausschließlich mit der diffusionsoffenen Unterdachbahn bietet die DASATOP sogar über achtmal schnellere Trocknung als eine Konstruktion mit einer Dampfbremse von s_d von 5 m.

Fazit Vergleich von Sub-and-Top-verlegten Dampfbremse- und Luftdichtungssystemen

Die Sub-and-Top-Verlegung mit feuchtevariablen Dampfbremse- und Luftdichtungsbahnen ist aus bauphysikalischer Sicht die beste Lösung für die Sicherheit der Konstruktion und bietet bei unvorhergesehenen Feuchtigkeitsbelastungen das größte Bauschadensfreiheitspotential.

Unkritische Holzfeuchtigkeiten werden bei der Verwendung der DASATOP in den Sparren im Vergleich zu Bahnen mit s_d -Werten von 2 m bzw. 5 m ca. dreimal bzw. ca. fünfmal (z. T. sogar achtmal) schneller erreicht.

Bei der Sub-and-Top-Verlegung erfüllt die Bahn unterhalb der Wärmedämmung (Sub) die Funktion einer Dampfbremse. Bei der Verlegung über den Sparren (Top) ist hingegen die Funktion einer Unterspannbahn von Vorteil, damit Feuchtigkeit möglichst ungehindert austrocknen kann. Dann kann bei nicht perfekt an den Sparren anliegenden Bahnen ein resultierender Feuchtegehalt an den Sparrenflanken wieder zügig austrocknen. Feuchtevariable Dampfbremsen für Zwischensparrendämmungen erreichen einen s_d -Wert im feuchten Bereich von ca. 0,25 m. Sie bieten daher ein geringeres Bauschadensfreiheitspotential als die DASATOP.

Der feuchtegesteuerte Diffusionswiderstand ermöglicht die sichere Verlegung der Bahnen in allen Details, z. B. bei Auswechslungen, Kehlen und Graten bzw. zergliederten Konstruktionen. Der Diffusionswiderstand kann an jeder Stelle der Bahn einen der jeweiligen Situation klimagesteuert angepassten s_d -Wert zwischen 0,05 und 2 m annehmen. Die Bahnen können sowohl längs als auch quer verlegt werden.

Vorteilhaft erweist sich die Verwendung von diffusionsoffenen Bahnen außen bzw. die Anordnung einer diffusionsoffenen Aufdachdämmung aus faserförmigen Dämmstoffen. Diffusionshemmende Schaumdämmstoffe können eingesetzt werden – führen aber zu geringeren Rücktrocknungsreserven und damit zu geringeren Sicherheiten für das Bauteil.

Werden Bahnen mit einem konstanten s_d -Wert für die Sub-and-Top-Verlegung eingesetzt, sinkt das Bauschadensfreiheitspotential erheblich. Im Winter schützen die Bahnen im Sub-Bereich die Wärmedämmung wie feuchtevariable Bahnen gegen Feuchteeintritt. Im Sommer bieten sie jedoch keine zusätzliche Trocknungsmöglichkeit aus der Konstruktion heraus. Fällt Kondensat an den Sparrenoberseiten aus, kann dieses nur langsam heraustrocknen: Die Gefahr eines Bauschadens nimmt drastisch zu.

Wärmedämmkonstruktionen sollten grundsätzlich mit möglichst hohen Sicherheitsreserven versehen werden. Dann besteht bei unvorhergesehenen Feuchtebelastungen ein zusätzlicher Schutz vor Bauschäden und Schimmel. Damit ist auch der Verarbeiter optimal vor Schäden und Haftungsansprüchen geschützt. Die Sub-and-Top-Verlegung von feuchtevariablen Dampfbrems- und Luftdichtungsbahnen mit einem möglichst geringen s_d -Wert bei hohen rel. Luftfeuchtigkeiten bieten bei der Dachsanierung von außen aus bauphysikalischer Sicht den besten Schutz.

Ziel des Bauens

Ziel des Bauens sind nicht nur energieeffiziente Gebäude und hoher klimatischer Wohnkomfort, sondern insbesondere Gebäude mit wohngesundem Raumklima. Hier spielen nicht nur toxikologische Aspekte, z. B. durch Emissionen von Baustoffen (vgl. www.sentinel-haus.eu), eine Rolle, sondern vor allem die Schimmelfreiheit auf und in der Konstruktion. Sporen von Schimmelpilzen schädigen das Immunsystem und fördern/führen zu Allergien; die Ausscheidungen der Schimmelpilze (MVOC) können zu physischen und psychischen Gesundheitsbelastungen führen. Befinden sich Schimmelpilze in einem trockenen Klima, verlieren sie viel von ihrer Gefährlichkeit. Werden Schimmelpilze hingegen wieder befeuchtet,

wird ihre Gefährlichkeit in altbekannter Weise wieder reaktiviert.

Befinden sich Schimmelpilze auf der raumseitigen Oberfläche von Bauteilen (z. B. durch Wärmebrücken oder Oberflächenkondensat), sind sie sichtbar, können erkannt und bei Bedarf beseitigt werden. Befinden sich Schimmelquellen aber innerhalb einer Konstruktion, bleiben sie unerkannt. In jährlichen Abständen werden sie durch Feuchtigkeit reaktiviert - die Gesundheit der Bewohner wird permanent gefährdet.

Ziel des Bauens sollte es sein, die bauphysikalische Sicherheit nicht bis zum Letzten auszureizen, sondern gerade in Bezug auf Schimmel das höchstmögliche Sicherheitspotential zu generieren.

8 Punkte führen zu dauerhaft sicherer Konstruktion und Verarbeitung

1. Optimal sicher sind Konstruktionen mit feuchtevariablen Dampfbrems- und Luftdichtungsbahnen mit einem besonders geringen Diffusionswiderstand im feuchten Bereich von $< 0,10$ m.
2. Sub-and-Top-Bahnen mit besonders niedrigem Diffusionswiderstand bei Feuchtigkeitsausfall können über den Sparren im Frostbereich liegen. Die Gefahr von Eisbildung ist aufgrund der hohen möglichen Austrocknung und der Diffusionscharakteristik der Konstruktion praktisch ausgeschlossen.
3. Unkritische Sparrenfeuchten werden mit der DASATOP dreimal bzw. fünfmal (z. T. achtmal) so schnell erreicht. Der erhöhte Schutz vor Schimmelbildung ist dabei gewährleistet.
4. Die Wärmedämmung wird durch Verlegung im Gefachbereich vor nutzungsbedingten Feuchtigkeiten aus dem Innenraum durch s_d -Werte bis zu 2 m geschützt. Schädliche Tauwasserbildung in der Dämmebene kann nicht erfolgen.
5. Außen diffusionsoffene Konstruktionen haben größere Rücktrocknungsreserven als Konstruktionen mit diffusionshemmenden Bauteilschichten (z. B. Schaumdämmstoffe).
6. Empfehlenswert ist immer die Durchführung einer baubegleitenden Qualitätssicherung. Bei der Sanierung von außen kann die Luftdichtheit mittels Überdrucktest, kombiniert mit künstlichem Nebel, durchgeführt werden. Leckagen lassen sich dann aufspüren und abdichten.
7. Die Befestigung der Bahn bei der Sub-and-Top-Verlegung sollte mit dünnen Leisten mechanisch erfolgen. Eine zusätzliche Verklebung ist mit einem Luftdichtungsanschlusskleber möglich. Klebebänder haften auf den staubigen Untergründen der alten Sparren nicht.
8. Blendfreie Bahnen mit dunklerer Farbe sind aus Gründen der Unfallrelevanz und des Verlegekomforts hellen, insbesondere weißen Bahnen vorzuziehen.

www.proclima.de



... und die Dämmung ist perfekt

MOLL bauökologische Produkte GmbH
Rheintalstraße 35 – 43
68723 Schwetzingen
Germany
Fon: +49 (0) 62 02 – 27 82.0
Fax: +49 (0) 62 02 – 27 82.21
eMail: info@proclima.de