

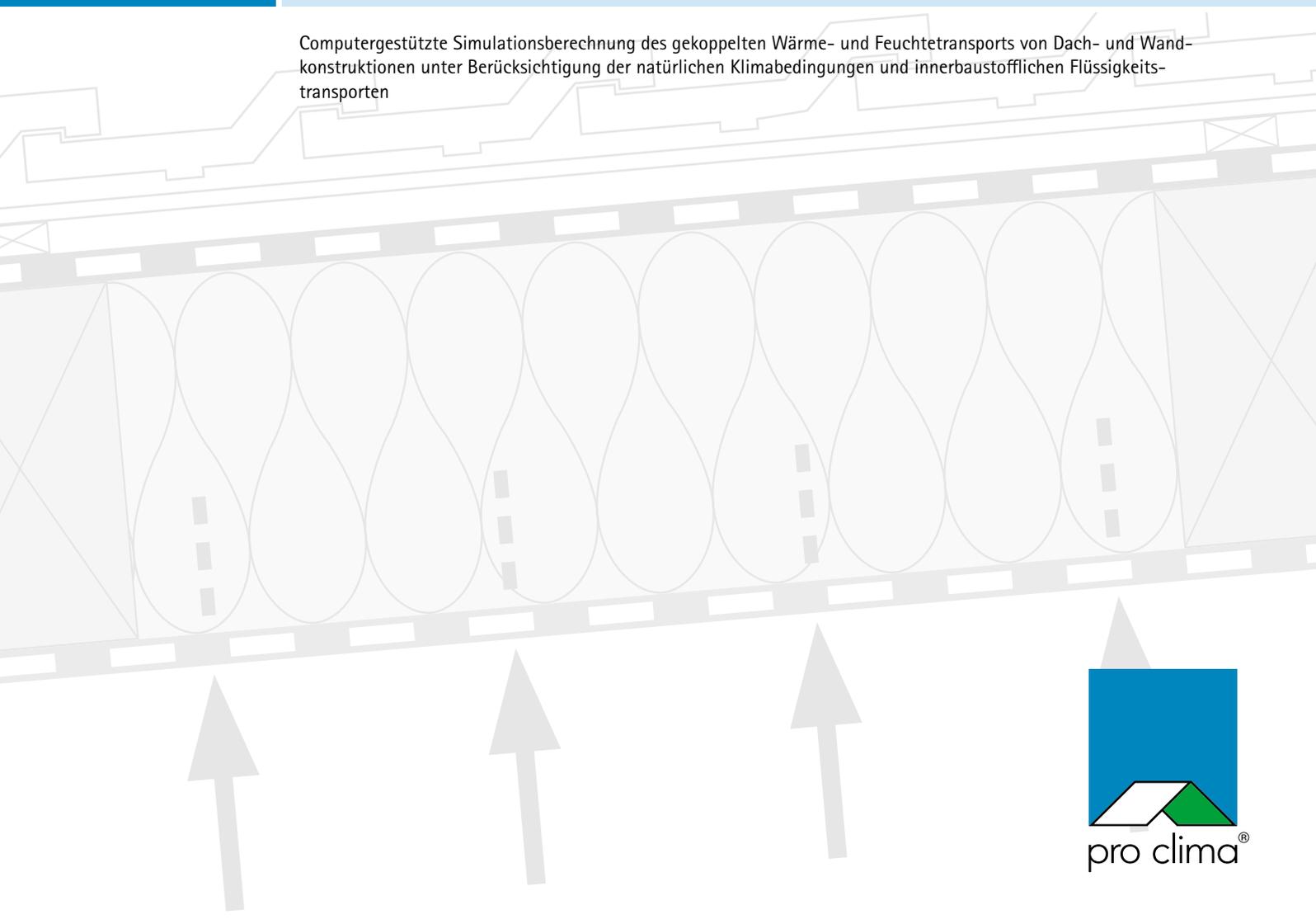
Sanierungs-Studie

Lösungen für die Luftdichtheit bei energietechnischen Sanierungen von Dachkonstruktionen

Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen

Sub-and-Top: Vergleich des Bauschadens-Freiheits-Potenzials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d -Wert

Computergestützte Simulationsberechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports von Dach- und Wandkonstruktionen unter Berücksichtigung der natürlichen Klimabedingungen und innerbaustofflichen Flüssigkeitstransporten





Sanierungslösungen mit hoher Sicherheit

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Einführung | 4 | | |
| Teil A. Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen | 4 | Teil B. Sub-and-Top-Vergleich des Bauschadens-Freiheits-Potenzials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d-Wert | 14 |
| Goldene Regel 1/3 zu 2/3 | 4 | Vergleichende Betrachtung der | |
| Quellen für einen Feuchtigkeitseintrag | 4 | Rücktrochnungsreserven | 14 |
| Berechnungsmodelle für Diffusionsvorgänge | 5 | Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials | 15 |
| Berechnung nach DIN 4108-3 [2] | | | |
| Verfahren nach Glaser | 5 | Untersuchte Konstruktionen | 15 |
| Berechnung nach DIN EN 15026 [4] | 5 | Fall 1: Diffusionsoffene Unterdeckung | 15 |
| | | Fall 2: Unterdeckplatte aus 60 mm Holzfaser | 15 |
| Berechnungsmodelle für konvektiven Eintrag | 6 | Fall 3: Unterdeckplatte aus 50 mm Polyurethan | |
| Anreicherung der Feuchtigkeitsmenge infolge innerer Konvektion | 6 | vlieskaschiert | 15 |
| Eisschichten sind Dampfsperren | 6 | Ergebnisdiskussion | 16 |
| s_d -Wert und μ -Wert | 6 | | |
| | | Fazit Vergleich von Sub-and-Top-verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen | 16 |
| Messunsicherheiten bei hochdiffusionsoffenen Materialien | 7 | Ziel des Bauens | 17 |
| Bewertung der Feuchtigkeitseinflüsse, Definition des Bauschadens-Freiheits-Kriteriums | 7 | | |
| | | 8 Punkte führen zu dauerhaft sicherer Konstruktion und Verarbeitung | 17 |
| Untersuchte Konstruktionen | 8 | | |
| Fall 1: 35 mm Holzfasernerunterdeckplatte | 9 | | |
| Fall 2: 1:1-Lösung | 9 | | |
| Fall 3: 2:1-Lösung | 9 | | |
| Fall 4: Sub-and-Top-Lösung | 9 | | |
| Ergebnisdiskussion | 9 | | |
| Ziel | 9 | | |
| | | | |
| Berechnungen | 10 | | |
| 35 mm Holzfasernerunterdeckplatte als Aufdachdämmung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 1a) | 10 | | |
| 35 mm Holzfasernerunterdeckplatte als Aufdachdämmung. Mit perfekter Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 1b) | 10 | | |
| 1:1-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 2) | 11 | | |
| 2:1-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 3) | 11 | | |
| Luftdichtungsbahnen mit monolithischer Funktionsschicht | 12 | | |
| Sub-and-Top-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 4) | 12 | | |
| | | | |
| Fazit Vergleich Luftdichtung außen zu Luftdichtung und Dampfbremse innen | 13 | | |
| 10 Punkte führen zur dauerhaft sicheren Konstruktion | 13 | | |

Literatur

- [1] DIN 4108-7: »Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele«, Beuth-Verlag, Berlin, 01/2011
- [2] DIN 4108-3: »Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung«, Beuth-Verlag, Berlin, 11/2014
- [3] Tagung Schimmelpilz 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 5.3: »Berechnung des eindimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen«, Fraunhofer IBP, Holzkirchen
- [6] WUFI 2D 3.4: »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 Bauschadens-Freiheits-Potenzials von Wärmedämmkonstruktionen in Holz- und Stahlbauweise«, Moll bauökologische Produkte GmbH, 12/2015
- [11] Deutsche Bauzeitung; Heft 12/89, Seite 1639 ff.



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 Feuchteströme 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 erhöhten

Dämmdicken aufgewertet werden kann. Dabei sind zunächst die verschiedenen Möglichkeiten hinsichtlich des Einbauortes zu prüfen. In der DIN 4108-7 [1] wird unter Punkt 5 »Planung und Ausführung« 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. 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 Anfor-

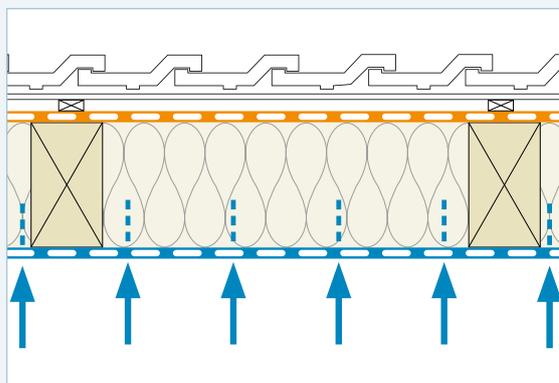
derungen der DIN 4108-3 [2] betrachtet werden. Verfügt eine innenseitig angeordnete Luftdichtungsebene über einen zu geringen Diffusionswiderstand (s_d -Wert), kann ggf. zu viel Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringen und in Abhängigkeit der folgenden Bauteilschichten als Tauwasser ausfallen – ist 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 Bauschadens-Freiheits-Potenzial 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

Abb. 1
Feuchteinwirkung auf eine Dämmkonstruktion im Winter



Über eine Dampfbremse- 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 Gesamtwärmedämmdicke) 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 Gesamtdämmdicke die Taupunkttemperatur (9,2 °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 Feuchte-transport 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 Feuchteintrag

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]. Feuchtigkeits Transporte 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. Der in der DIN 4108-3 genannte Ansatz erlaubt keine detaillierte Betrachtung der Wärme- und Feuchtetröme. 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.

Berechnung nach DIN 4108-3 [2] Verfahren nach Glaser

Der Feuchtigkeitsströme werden bei einem pauschalierten Klima von 90 Tagen Winter (-5 °C außen / 80 % rel. Luftfeuchte und 20 °C innen / 50 % rel. Luftfeuchte) und 90 Tagen Sommer ($+12\text{ °C}$ innen und außen / 70 % rel. Luftfeuchte) 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.

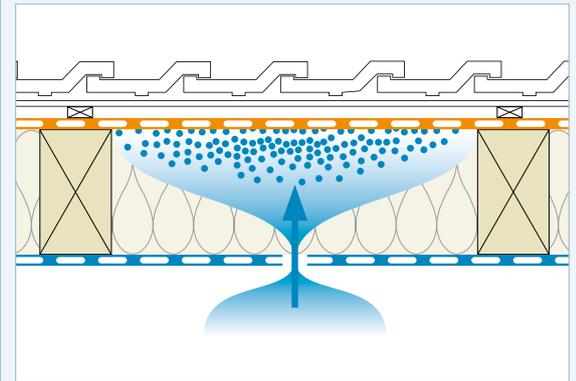
Berechnung nach DIN EN 15026 [4]

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.

Berücksichtigung von Feuchteinträgen durch Konvektion

Abb. 2

Feuchteintrag in die Dämmung durch Leckagen



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

Genaue Ergebnisse mit instationären Berechnungsmodellen

Stationäre Modelle

- Verfahren nach Glaser
→ liefert grobe Anhaltswerte

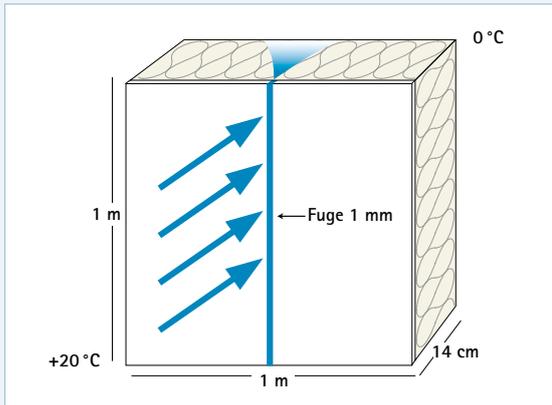
Instationäre Modelle

- 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

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



Feuchtetransport

durch Dampfbremse: $0,5 \text{ g/m}^2 \times 24 \text{ h}$
durch 1 mm Fuge: $800 \text{ g/m} \times 24 \text{ h}$
Erhöhung Faktor: 1.600

Randbedingungen

Dampfbremse s_d -Wert = 30 m
Innentemperatur = $+20 \text{ °C}$
Außentemperatur = 0 °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

Der Antrieb der Konvektion ist der Druckunterschied zwischen dem Inneren eines Gebäudes und der Außenluft. Der Druckunterschied resultiert aus der Windanströmung des Gebäudes von außen und dem Aufsteigen der beheizten Luft innerhalb des bewohnten Raums.

Ab WUFI pro 5.0 steht für die Berechnung von konvektiven Feuchteinträgen ein Luftinfiltrationsmodell zur Verfügung. Es kann auf Grundlage eines Austausches mit der Innenraumluft einen konvektiven Feuchteintrag simulieren. Das setzt voraus, dass die Undichtheit der Konstruktion bekannt ist, denn diese dient dazu, den Feuchtigkeitseintrag zu quantifizieren. Bei der Sanierung kann die Qualität der Innenbekleidung selten genau ermittelt werden. Sie hat einen entscheidenden Einfluss auf den Feuchteintrag durch Diffusion und Konvektion.

Aus Gründen der Bauteilsicherheit wird deshalb der Feuchtetransport durch Leckagen in eine Konstruktion berechnet, in dem diffusionshemmende innere Bauteilschichten (z. B. Dampfbremsebenen oder Innenbekleidungen) unberücksichtigt bleiben. Da es sich hier nur um Diffusionsströme handelt und der Antrieb der Luftdruckunterschiede fehlt, können in der Realität die Feuchtigkeitsbelastungen durch Konvektion wesentlich höher sein. Bei Luftströmungen durch Leckagen konzentriert sich der Feuchteintrag auf eine kleine Fläche. Dadurch ist dieser um ein Vielfaches höher, als es die Berechnungsergebnisse 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.

So viel Feuchtigkeit kann auch die diffusionsoffenste Unterdeckbahn nicht austrocknen lassen, zumal der Diffusionsstrom eines dünnen Bauteils bei einer geringen/fehlenden Druckdifferenz in der Praxis viel niedriger ist, als es die s_d -Werte 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 Dicke eines Baustoffes. Mit zunehmender Materialdicke verlängert sich die Zeitdauer, die ein Wassermolekül für den Transportvorgang durch den Baustoff benötigt.

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

In Zahlen: Eine Unterdeckbahn mit einem mikroporösen Funktionsfilm hat bei einem s_d -Wert von 0,02 m und einer Dicke von 0,50 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 Unterdeckbahnen zu



einem Tauwasserausfall kommen. Mikroporöse Bahnen lassen wesentlich weniger Feuchtigkeit austrocknen, als der μ -Wert und s_d -Wert vermuten lassen. Grund hierfür ist die geringe bzw. fehlende Druckdifferenz an diesem dünnen Bauteil unter wechselnd klimatischen Bedingungen.

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 beiden Seiten des Bauteils unterschiedlich sind, wollen sich Moleküle über Diffusion von einer Seite zur anderen bewegen. Bei einer Unterdeckbahn/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 Unterdeckbahn/äußeren Luftdichtung denkbar gering, wenn innenseitig der Bahn 80 % relative Luftfeuchtigkeit und mehr bestehen und außenseitig ähnliche Feuchtigkeitssituationen vorhanden sind. Sicherheitsvorteile bieten hier Luftdichtungsbahnen mit monolithischen Funktionsfilmen. Im Falle eines Kondensatausfalls an der Innenseite der Bahn innerhalb der Konstruktion wird Feuchtigkeit aktiv durch Diffusion entlang der Molekülketten aus dem Bauteil heraustransportiert. Unter Feuchteinfluss verringert sich der Diffusionswiderstand von pro clima DASAPLANO 0,01 connect – die Gefahr von Eisbildung sinkt. Bei mikroporösen Membranen hingegen kommt es 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 bei Berechnungen nach DIN 4108-3 bzw. 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 Bauschadens-Freiheits-Kriteriums

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 Besiedlung erforderlich.

»Verunreinigungen durch Staub, Fingerabdrücke und Luftverschmutzung (Küche, Rückstände beim Duschen usw.) oder Ausdünstungen des Menschen« reichen

Feuchteintrag in die Konstruktion kann zu Bauschäden und Schimmel führen

Abb. 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.



Vier Konstruktionen im Vergleich

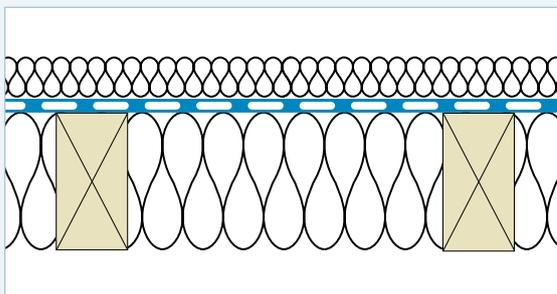
Fall 1

35 mm Holzfaser als Aufdachdämmung

Konstruktion mit außen liegender Luftdichtungsebene.

Abb. 5

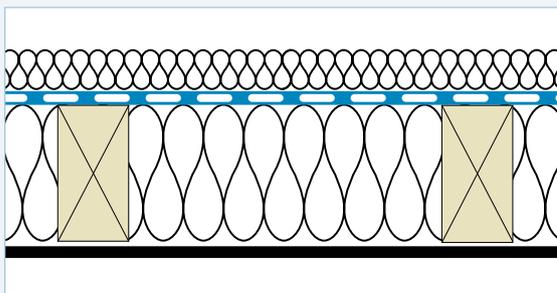
1a: Ohne Luftdichtung innen



- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02 \text{ m}$)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm
- Ohne Innenbekleidung

Abb. 6

1b: Mit Luftdichtung innen



- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02 \text{ m}$)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm
- Mit Gipsbauplatte 10 mm

aus, um auf weniger geeigneten Untergründen die Voraussetzungen für 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

Im 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 für Bauphysik mit dem Klimadatensatz für Holzkirchen vergleichend 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 Dämmmaterialien
 - Sorptionsfähiger Dämmstoff (z. B. Holzfaser oder Zellulose)
 - Nicht sorptionsfähiger Dämmstoff (z. B. Mineralwolle) (Rohdichte = 60 kg/m³)

Sorptionsfähige Dämmstoffe bieten ein zusätzliches Sicherheitsplus. Sie können Feuchtespitzen im Bauteil an den Grenzschichten abpuffern. Dies erfolgt z. B. bei Holzfaser- bzw. Zellulosedämmstoffen

durch Aufnahme der Feuchtigkeit in die Zellen des enthaltenen Holzanteils. Das Innenklima wird entsprechend den Annahmen des WTA-Merkblatts 6-2-01/D [9] (in WUFI enthalten) mit normaler Feuchtelast festgelegt, wie es in Räumen bewohnter Häuser (Schlaf- und Wohnräume, Bäder und Küchen) vorhanden ist. Die angegebenen Konstruktionen werden zur Abschätzung des Einflusses der Dichtigkeit der Innenbekleidung mit vollflächig vorhandener Gipsbauplatte (Stärke 10 mm) und ohne Gipsbauplatte berechnet, um den Einfluss von Profilbrettschalungen bzw. mangelhaft luftdichten Innenbekleidungen zu berücksichtigen. Die folgenden dargestellten Fälle 1, 2 und 4 werden mit nicht sorptiven Dämmmaterialien (Mineralfaser) betrachtet. Bei Fall 3 wurde ein Dämmstoff mit sorptiven Eigenschaften eingesetzt (Zellulose).



Fall 1: 35 mm Holzfaser

(Abb. 5 + 6)

Überdämmung der Sparren mit Holzfaser 35 mm, darunter außen liegende diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m). Zwischensparrendämmung aus einem nicht sorptionsfähigen Dämmstoff. (Abweichend von den Empfehlungen der DIN EN ISO 12572 bzw. der DIN EN 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: 1:1-Lösung (Abb. 7)

Die Luftdichtungsebene liegt zwischen zwei gleich dicken Dämmschichten: 50 % der Wärmedämmung vor der Luftdichtungsebene – 50 % der Wärmedämmung auf den Sparren. Beide Dämmstoffe haben die gleiche Wärmeleitfähigkeit λ . Überdämmung der Sparren mit Holzfaser 120 mm, darunter mittig liegende diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m). Zwischensparrendämmung aus einem nicht sorptionsfähigen Dämmstoff. (Abweichend von den Empfehlungen der DIN EN ISO 12572 bzw. der DIN EN 4108-3 wird die Berechnung mit einem s_d -Wert von 0,02 m durchgeführt).

Fall 3: 2:1-Lösung (Abb. 8)

Überdämmung der Sparren mit Holzfaser 60 mm, darunter liegende diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m). Zwischensparrendämmung aus einem sorptionsfähigen Dämmstoff (z. B. Holzfaser oder Zellulose) in 120 mm Dicke.

Fall 4: Sub-and-Top-Lösung (Abb. 9)

Die Luftdichtungsebene wird wellenförmig (Sub-and-Top) auf der Innenbekleidung und über die Tragkonstruktion geführt. Überdämmung der Sparren mit Holzfaser 35 mm, innen liegende Luftdichtung, Sub-and-Top-verlegt ($s_d =$ feuchtevariabel 0,05 - 2,0 m). Zwischensparrendämmung aus einem nicht sorptionsfähigen Dämmstoff.

Ergebnisdiskussion

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

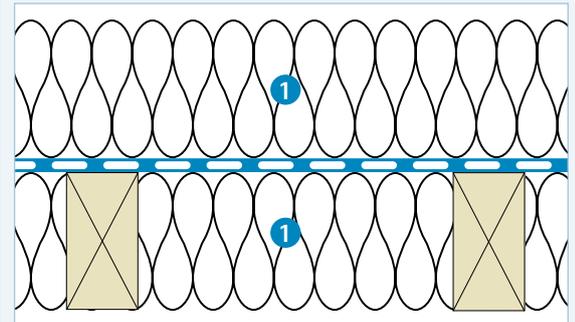
- die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der herrschenden Temperatur im Grenzbereich zur Luftdichtungsbahn (Fall 1, 3, 4) bzw. zur Holzfaserplatte (Fall 2) berechnet.
- der Wassergehalt der Wärmedämmung in der Grenzschicht berechnet.

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.

Abb. 7

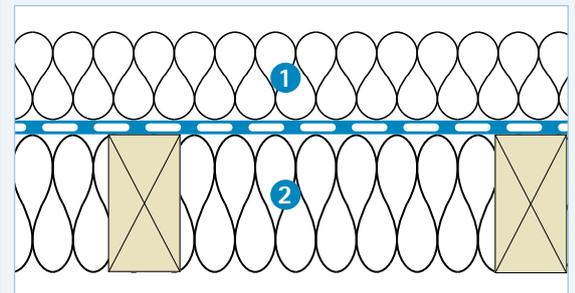
Fall 2: 1:1-Lösung



- Holzfaserunterdeckplatte 120 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm

Abb. 8

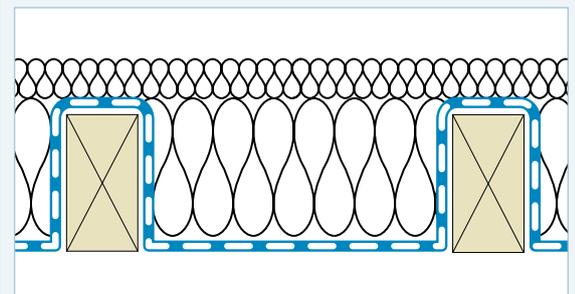
Fall 3: bei sorptiven Dämmstoffen und 2:1-Regel



- Holzfaserunterdeckplatte 60 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger sorptiver Dämmstoff 120 mm

Abb. 9

Fall 4: Sub-and-Top-Lösung

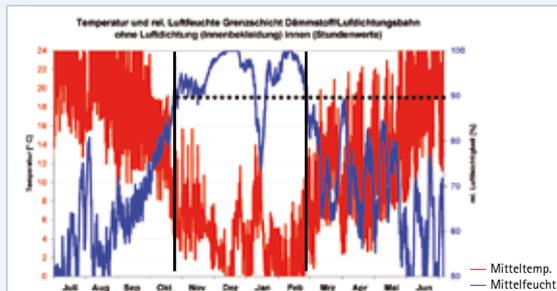


- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Luftdichtung, Sub-and-Top-verlegt ($s_d =$ feuchtevariabel 0,05-2,0 m)
- Faserförmiger Dämmstoff 120 mm



Abb. 10 + 11

Ergebnis für Fall 1a: 35 mm HWF – Luftdichtung außen, Innenbekleidung mit Fugen



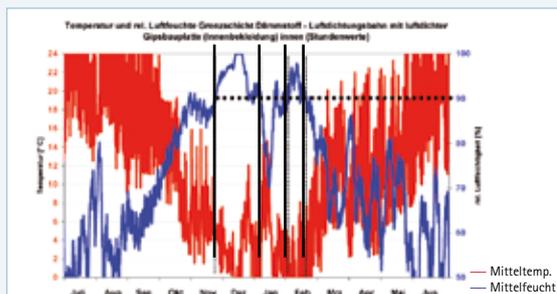
Feuchte an 157 Tagen > 90%, an 15 Tagen Tauwasser
→ **Schimmel sehr wahrscheinlich**



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

Abb. 12 + 13

Ergebnis für Fall 1b: 35 mm HWF – Luftdichtung außen, Innenbekleidung luftdicht



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

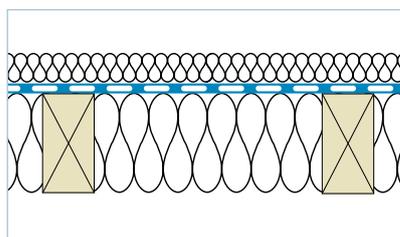


Max. Feuchtegehalt an der Grenzschicht länger als 1 Monat erhöht - bis 60 kg/m³

Berechnungen

35 mm Holzfaser als Aufdachdämmung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 1a)

Konstruktion mit außen liegender Luftdichtungsebene.



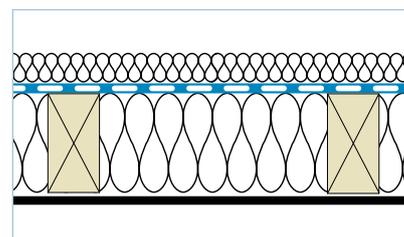
- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm

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

Derartige Konstruktionen erhalten gemäß dem in **Abb. 10 + 11** 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 Konstruktionen mit nicht perfekter Luftdichtung besteht die Gefahr eines Bauschadens.

35 mm Holzfaser als Aufdachdämmung. Mit perfekter Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 1b)

Konstruktion mit außen liegender Luftdichtungsebene.



- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm
- Gipsbauplatten (luftdicht) 10 mm

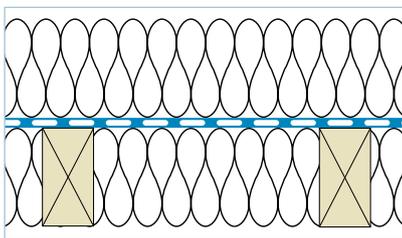
Ist im Bestand eine vollflächige Innenbekleidung aus Gipsbauplatten vorhanden, wird diese in der Berechnung als luftdicht angesehen. Der Feuchtigkeitseintrag in die Konstruktion erfolgt ausschließlich durch Diffusion.

Diese Konstruktion weist gemäß **Abb. 12** 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 bis zu 60 kg/m³ (**Abb. 13**) an Feuchtigkeit belastet. In dieser Konstruktion gibt es trotz der funktionsfähigen luftdichten Innenbekleidung eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Schimmelpilzbildung an der Grenzschicht Dämmstoff – Luftdichtungsbahn.



1:1-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 2)

Konstruktionen mit mittig liegender Luftdichtungsebene.

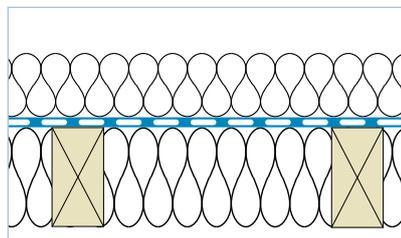


- Holzfaserunterdeckplatte 120 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger nicht sorptiver Dämmstoff 120 mm

Werden 50 % der Wärmedämmung (des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes) vor der Luftdichtungsebene angeordnet, treten rel. Luftfeuchtigkeiten oberhalb von 90 % nur eine Woche innerhalb der Winterperiode auf (siehe Abb. 14). Tauwasserbildung findet dabei nicht statt. An der Grenzschicht entstehen keine maßgeblichen Feuchtemengen (siehe Abb. 15). 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.

2:1-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 3)

Konstruktionen mit 1 Teil oberhalb der Sparren und 2 Teilen zwischen den Sparren.



- Holzfaserunterdeckplatte 60 mm
- Diffusionsoffene Luftdichtung ($s_d = 0,02$ m)
- Faserförmiger Dämmstoff mit sorptiven Eigenschaften (Zellulose) 120 mm

Werden Dämmstoffe eingesetzt, die in der Lage sind, Feuchtigkeit kurzfristig durch Sorption zu speichern, kann das Verhältnis von Zwischensparren- zu Aufdachdämmung auf 1/3 oberhalb der Sparren und 2/3 zwischen den Sparren festgelegt werden. Voraussetzung ist, dass die eingesetzten Dämmmaterialien die gleiche Wärmeleitfähigkeit besitzen. Bei dem betrachteten Beispiel sind 120 mm Zwischensparren- und 60 mm Aufdachdämmung durch eine diffusionsoffene Luftdichtungsbahn voneinander getrennt. Bei dieser Konstruktion treten Feuchtegehalte von 90 % an der Grenzschicht über längere Zeiträume auf. Zum Teil wird diese Grenze überschritten. Durch die sorptiven Eigenschaften von z. B. Zellulose oder Holzfaser sind diese Feuchtegehalte tolerierbar (Abb. 16). Die Feuchtegehalte an der Grenzschicht zwischen der Dämmebene und der Luftdichtungsbahn sind unkritisch (Abb. 17). Bei einer Sanierung kann ein bereits im Bauteil vorhandener nicht sorptiver Dämmstoff (z. B. Mineralwolle) in der Konstruktion verbleiben, wenn bis zur Luftdichtungsebene (Sparrenoberkante) mindestens 40 mm eines sorptiven Dämmmaterials (z. B. Holzfaser oder Zellulose) ergänzt werden.

Abb. 14 + 15

Ergebnis für Fall 2: 1:1-Lösung – Luftdichtung mittig, Innenbekleidung mit Fugen



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

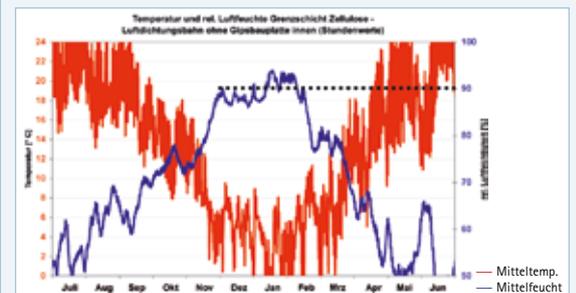
Feuchtegehalt der Grenzschicht Mineralwolle / Luftdichtungsbahn ohne Luftdichtungsebene
Innen 120 mm Aufsparrendämmung / 120 mm Zwischensparrendämmung



Nur sehr geringe Feuchtegehalte an der Grenzschicht

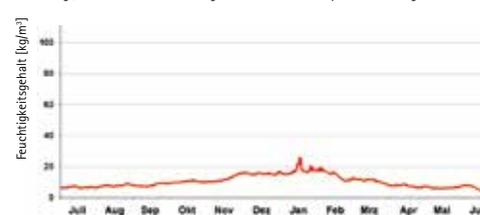
Abb. 16 + 17

Ergebnis für Fall 3: 2:1-Lösung – Luftdichtung in Dämmebene, Innenbekleidung mit Fugen



Feuchte an 45 Tagen > 90 %, kein Tauwasser
→ Geringe Schimmelwahrscheinlichkeit mit sorptivem Dämmstoff

Feuchtegehalt der Grenzschicht Zellulosedämmung – Luftdichtungsbahn ohne luftdichte Innenbekleidung / 60 mm Aufdachdämmung – 120 mm Zwischensparrendämmung



Unkritische Feuchtegehalte in der Grenzschicht



Abb. 18
Vergrößerung des monolithischen porenfreien Funktionsfilms der DASAPLANO-Bahnen



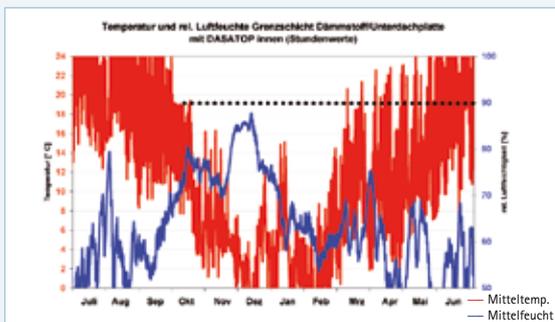
Aktiver Feuchtetransport entlang der Molekülketten erhöht das Austrocknungsvermögen.

Abb. 19
Vergrößerung eines mikroporösen Funktionsfilmes

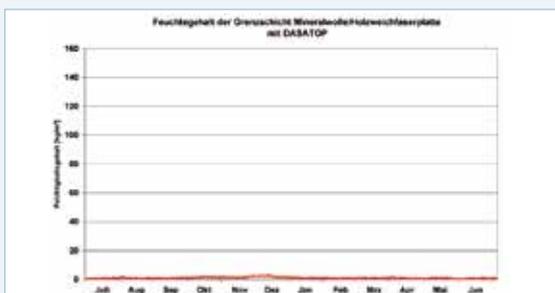


Passiver Feuchtetransport durch Poren (Gasaustausch) vergrößert die Gefahr von Eisbildung im Bauteil.

Abb. 20 + 21
Ergebnis für Fall 4: Sub-and-Top-Lösung
Luftdichtung innen, Innenbekleidung mit Fugen



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



Unkritische Feuchtegehalte in der Grenzschicht

Luftdichtungsbahnen mit monolithischer Funktionsschicht

Wird die Luftdichtungsebene wie in Fall 2 (1:1-Lösung) bzw. Fall 3 (2:1-Lösung) beschrieben oberhalb der Sparrenlage verlegt, sollte eine diffusionsoffene Luftdichtungsbahn mit einem feuchtevariablen und monolithischen Funktionsfilm eingesetzt werden. Die pro clima DASAPLANO-Bahnen verfügen über entsprechende Filme aus monolithischen Polymermischungen und bieten der Konstruktion folgende Vorteile:

• Luftdichtheit

Der monolithische Funktionsfilm der DASAPLANO-Bahnen gewährleisten eine 100%ige Luftdichtheit. Im Gegensatz zu herkömmlichen Luftdichtungsbahnen mit mikroporösen Filmen (Abb. 19) ist die DASAPLANO absolut porenfrei (Abb. 18).

• Diffusionsoffenheit

Der monolithische Funktionsfilm ermöglicht einen aktiven Feuchtigkeitstransport durch das Bahnenmaterial. Steht Kondensat innenseitig in Tropfenform an der DASAPLANO-Bahn an, wird diese entlang der Molekülketten aktiv nach außen weitertransportiert. Dadurch wird die Gefahr von Eisbildung (= Dampfsperre) an der Luftdichtungsbahn im Vergleich zu einer Bahn mit mikroporösen Funktionsfilmen deutlich reduziert.

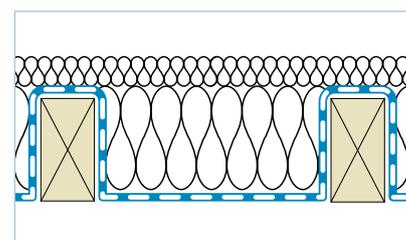
• Feuchtevariabilität

Der Funktionsfilm der DASAPLANO 0,01 connect hat feuchtevariable Eigenschaften. Dadurch sinkt der Diffusionswiderstand der Bahnen bei Kondensatbildung bis auf einen s_d -Wert unter 0,01 m. Der üblichen Erhöhung des Diffusionswiderstandes, z. B. infolge des Porenverschlusses durch Wasser, wird optimal vorgebeugt.

Soll die Luftdichtungsbahn oberhalb der Sparren verlegt werden, bieten DASAPLANO-Bahnen bei der 1:1- bzw. 2:1-Lösung im Vergleich zu mikroporösen Luftdichtungsbahnen deutlich höhere Bauteilsicherheiten.

Sub-and-Top-Lösung. Ohne Luftdichtung (z. B. Gipsbauplatte) innen (Fall 4)

Konstruktionen mit innenliegender Luftdichtungsebene ohne Innenbekleidung



- Holzfaserunterdeckplatte 35 mm
- Luftdichtung, Sub-and-Top-verlegt (s_d = feuchtevariabel 0,05-2,0 m).
- Faserförmiger Dämmstoff 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. Die DASATOP kann mit allen faserförmigen Dämmstoffen kombiniert werden. Eine Luftdichtungsbahn oberhalb der Zwischensparrendämmung ist dabei nicht erforderlich. Durch den Einsatz der DASATOP liegt das Feuchtigkeitsniveau in der Wärmedämmung unmittelbar unter der Holzfasersplatte im unschädlichen Bereich. Die Feuchtigkeitsspitze von 85 % tritt nur sehr kurz bei Temperaturen um den Gefrierpunkt auf (siehe Abb. 20). Es treten keine materialschädigenden Feuchtegehalte auf (siehe Abb. 21). 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 alle faserförmigen Dämmstoffe und für die Konstruktion.



Fazit Vergleich Luftdichtung außen zu Luftdichtung und Dampfbremse innen

Berechnungen mit instationären Simulationsverfahren können Risiken der Tauwasserbildung darstellen und lassen Rückschlüsse auf das Bauschadens-Freiheits-Potenzial 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 von Wärmedämmung und Luftdichtung. Es besteht die Gefahr 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. 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 unter-

liegen. 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 (1:1-Lösung), sinken die rel. Luftfeuchten an der Grenzschicht unterhalb kritischer Werte. Bei dieser Vorgehensweise können alle faserförmigen Dämmstoffe zwischen den Sparren eingesetzt werden.

Alternativ kann bei der Verwendung von sorptiven Dämmstoffen, wie z. B. Holzfaser und Zellulose, die Stärke der Aufdachdämmung auf 1/3 der Gesamtdämmstärke verringert werden (2:1-Lösung). Ist bereits eine Dämmung vorhanden, müssen mindestens 40 mm der Dämmung vor der Luftdichtungsebene aus einer sorptiven Dämmung bestehen.

Die beiden vorgestellten Lösungen wurden aufgrund verschiedener im Markt erhält-

lichen Qualitäten von Holzfaserplatten produktunabhängig ermittelt. Hersteller von Holzfaserplatten können von diesen Angaben abweichende Aufbauten empfehlen. Diese haben genaue Kenntnis über die technischen Eigenschaften ihrer Produkte, so dass die für die Aufdachdämmung erforderlichen Schichtdicken geringer ausfallen können. Bei von unseren Angaben abweichenden Bauteilen wenden Sie sich für Freigaben und Konstruktionsempfehlungen bitte direkt an den Lieferanten/Hersteller der Holzfaserunterdeckplatten.

Die sicherste Lösung stellt im Vergleich die Konstruktion mit der Sub-and-Top-verlegten Dachsanierungs-Dampfbremse DASATOP dar. Sie kann mit allen faserförmigen Dämmstoffen kombiniert werden. 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.

Mit der DASATOP ist es nicht erforderlich, das Bauteil zum Schutz vor schädlicher Tauwasserbildung mit einer zusätzlichen Aufdachdämmung zu versehen.

10 Punkte führen zur dauerhaft sicheren Konstruktion



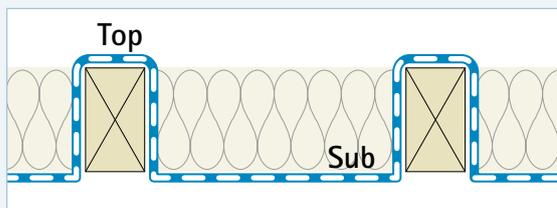
1. Als optimal sicher gelten Konstruktionen, die mit Dampfbremse- und Luftdichtungsebenen die 1/3- zu 2/3- Regel (1/3 innen, 2/3 außen) einhalten (siehe Seite 158 Goldene Regel).
2. Je weiter die Luftdichtungsebene in Richtung Innenraum liegt, umso sicherer werden die Konstruktionen. Je weiter außen sich die Luftdichtungsebene befindet, umso problematischer ist die Konstruktion: Das Bauschadens-Freiheits-Potenzial ist dann verringert.
3. Vollflächige, fugenfreie Innenbekleidungen verhindern bei außen verlegten Luftdichtungsbahnen Feuchteintrag durch Konvektion.
4. Sub-and-Top-Lösungen der DASATOP bieten das größte Bauschadens-Freiheits-Potenzial mit allen faserförmigen Dämmstoffen, da sich diese unterhalb der Wärmedämmung im warmen Bereich befindet (wärmer als die Taupunkttemperatur). Auf den Sparren kann sie den Diffusionswiderstand einer Unterdeck-/Unterspannbahn annehmen.
5. Werden sorptive Dämmstoffe, wie z. B. Holzfaser oder Zellulose, verwendet, kann die 2:1-Lösung in Verbindung mit einer Luftdichtungsbahn mit einer feuchteaktiven, luftdichten monolithischen Membran mit der DASAPLANO 0,01 connect als Luftdichtungsebene gewählt werden.
6. Konstruktionen können mit nicht sorptiven Dämmstoffen, wie z. B. Mineralwolle, als sicher angesehen werden, wenn die Luftdichtungsebene raumseitig von 50% des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes liegt.
7. Vorteilhaft als Luftdichtungsbahn bei Fall 2 und Fall 3 ist eine diffusionsoffene Luftdichtungsbahn mit monolithischer Membran, z. B. DASAPLANO 0,01 connect, welche die Feuchtigkeit aktiv entlang der Molekülketten transportieren kann. Dadurch wird die Gefahr von Eisbildung und damit einer sprunghaften Erhöhung des Diffusionswiderstandes bei unvorhergesehenem Feuchteintrag verringert.
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 Bauschadens-Freiheits-Potenzials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d -Wert

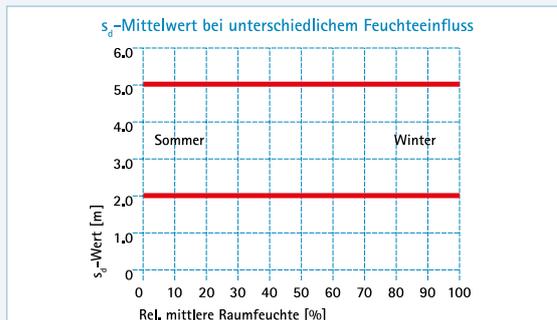
Besondere Sicherheit bei der Sanierung mit feuchtevariablen Sub-and-Top-Bahnen

Abb. 22
Sub-and-Top-Prinzip



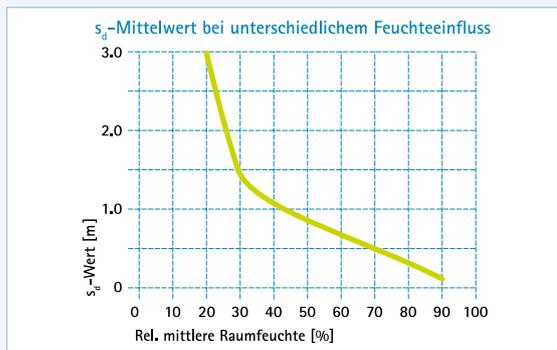
Im Gefach (Sub) diffusionsdichter: Schutz vor Feuchte.
Auf den Sparren (Top) hochdiffusionsoffen: schnelle Trocknung nach außen.

Abb. 23
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

Abb. 24
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 Unterdeckbahn

In dem ersten Teil dieser Studie wurde zwischen Sanierungssystemen unterschieden, die für die Dachsanierung von außen geeignet sind. Dabei wurden diffusions-offene 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 Dachsanierungs-Dampfbremse DASATOP kann dieser Werte zwischen 0,05 und 2 m (siehe Abb. 24) 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 Bauschadens-Freiheits-Potenzials 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. 23 dargestellt.

Vergleichende Betrachtung der Rücktrocknungsreserven

Werden Bahnen Sub-and-Top verlegt, ist klar, dass diese oberseitig der Tragkonstruktion einen möglichst geringen Diffusionswiderstand annehmen sollten. s_d -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 Bauschadens-Freiheits-Potenzial 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 (WDD) [$\text{g}/\text{m}^2 \times 24 \text{ h}$].

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 Bauschadens-Freiheits-Potenzials

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 Feuchtströme zweidimensional zu betrachten. Wärme- und Feuchtströme erfolgen nicht ausschließlich von innen nach außen. Diffusionsströme können auch innerhalb der Konstruktion stattfinden, z. B. von den Sparrenflanken durch geeignete Dampfbremse- 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 Dampfbremse-/Luftdichtungsbahn und Sparren. Aus der errechneten Rücktrocknungsmenge kann anschließend das Bauschadens-Freiheits-Potenzial in $[g] H_2O/[m]$ Sparren pro Jahr errechnet werden. Im Normalfall haben die Sparren einen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 300 g pro lfm.

Das Bauschadens-Freiheits-Potenzial beschreibt

- wie tolerant die Konstruktion bei unvorhergesehener Feuchtebelastung ist und
- wie viel Wasser in eine Konstruktion (unvorhergesehen) eindringen kann und
- sie 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 (Dichte = 60 kg/m³)

Die Festlegung des Innenklimas erfolgt mit normaler Feuchtebelast.

Fall 1: Diffusionsoffene Unterdeckung (Abb. 25)

Die Unterdeckung hat in der Berechnung einen s_d -Wert von 0,1 m.

Fall 2: Unterdeckplatte aus 60 mm Holzfaser (Abb. 26)

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

Fall 3: Unterdeckplatte aus 50 mm Polyurethan vlieskaschiert (Abb. 27)

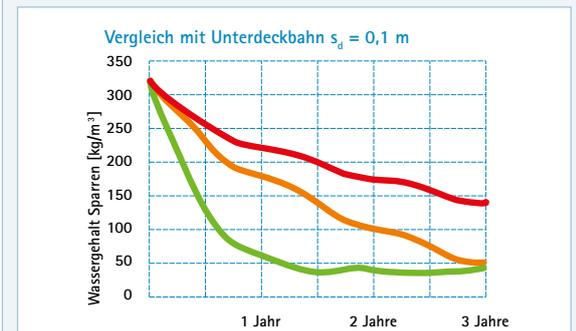
Aufsparrendämmung wie bei Fall 2, jedoch s_d -Wert = 2,5 m. Jeder der 3 Fälle wird mit 3 unterschiedlichen Dampfbremse – Sub-and-Top-verlegt – betrachtet:

- 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 Bauschadens-Freiheits-Potenzials Standort Holzkirchen, Dach

Abb. 25

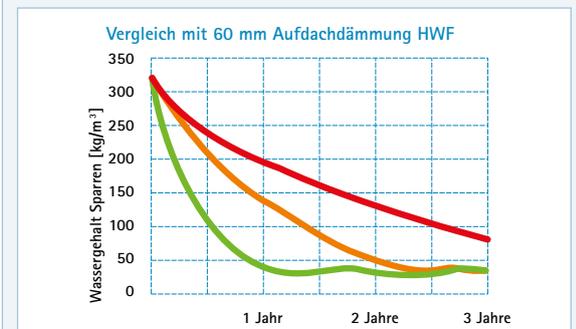
Ergebnis für diffusionsoffene Unterdeckung ($s_d = 0,1$ m)



Bauschadens-Freiheits-Potenzial: — s_d 2 m: zu gering
— DASATOP 1.900 g/m
— s_d 5 m: zu gering

Abb. 26

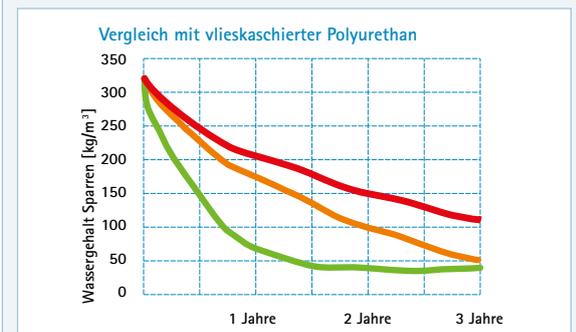
Ergebnis für 60 mm Holzfaserunterdeckplatte außen ($s_d = 0,3$ m)



Bauschadens-Freiheits-Potenzial: — s_d 2 m: zu gering
— DASATOP 2.100 g/m
— s_d 5 m: zu gering

Abb. 27

Ergebnis mit 50 mm Polyurethan außen ($s_d = 2,5$ m)



Bauschadens-Freiheits-Potenzial: — s_d 2: zu gering
— DASATOP 1.800 g/m
— s_d 5: zu gering



pro clima Sicherheitsformel

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

Ergebnisdiskussion

Untersucht wird das Austrocknungsvermögen des in den Sparren vorhandenen 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 Unterdeckbahn bietet die DASATOP sogar eine über achtmal schnellere Trocknung als eine Konstruktion mit einer Dampfbremse mit einem s_d -Wert 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 Bauschadens-Freiheits-Potenzial. 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 Unterdeck- und 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 Bauschadens-Freiheits-Potenzial 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.

Werden Bahnen mit einem konstanten s_d -Wert für die Sub-and-Top-Verlegung eingesetzt, sinkt das Bauschadens-Freiheits-Potenzial 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 Dampfbremse- und Luftdichtungsbahnen mit einem möglichst geringen s_d -Wert bei hohen rel. Luftfeuchtigkeiten bietet 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, 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 Sicherheitspotenzial 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 $< 0,10 \text{ m}$.*
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_{v_0} -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.*

Mehr Informationen finden Sie in unserer aktuellen Broschüre:

»Studie zur Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials«

