pro clima®

Sanierungs-Studie

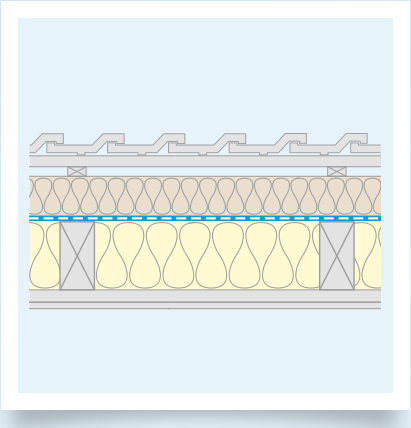
Energetische Dachsanierung von außen

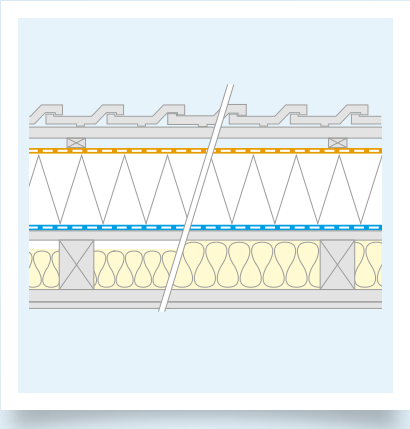
Lösungen für die Luftdichtheit bei energietechnischen Sanierungen von Dachkonstruktionen

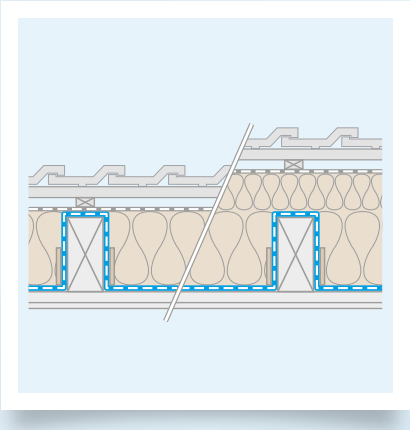
Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen

Randbedingungen, Materialeigenschaften und bauphysikalische Hintergründe verschiedener Lösungen.

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







Deutschland

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, 03/2024

[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, 12/2023

[5] WUFI® Pro 7.1: »Berechnung des eindimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen« Fraunhofer IBP, Holzkirchen

[6] WUFI® 2D 4.4: »Berechnung des zweidimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen« Fraunhofer IBP, Holzkirchen

[7] Delphin 6: »Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransport«, Bauklimatik Dresden Software GmbH

[8] DIN EN ISO 12572: »Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit« Beuth-Verlag, Berlin, 03/2025

[9] WTA Merkblatt 6-2-14/D: »Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse« Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA Referat 6 Bauphysik/Bauchemie München, 12/2014

[10] WUFI® How to »Tauwasserauswertung in hydrophoben Mineralfaserdämmungen« Stand: 2022-11

[11] Luftdichtungs-Studie Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials, Moll bauökologische Produkte GmbH, 2024-07

[12] Deutsche Bauzeitung; Heft 12/89, Seite 1639 ff.

[13] DIN EN ISO 13788: »Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788: 2012)« Beuth-Verlag, Berlin, 05/2013

Sanierungslösungen mit hoher Sicherheit

1. Einführung 4

2. Grundlagen und Randbedingungen 4
2.1 Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen 4
Goldene Regel 1/3 zu 2/3 4
2.2 Quellen für einen Feuchtigkeitseintrag 4
2.3 Berechnungsmodelle für Diffusionsvorgänge 4
2.3.1 Berechnung in Anlehnung an DIN EN ISO 13788 [13] Verfahren nach Glaser 5
2.3.2 Berechnung nach DIN EN 15026 [4] 5
2.4 Berechnungsmodelle für konvektiven Eintrag 5
2.5 Anreicherung der Feuchtigkeitsmenge infolge innerer Konvektion. 5
2.6 Eisschichten sind Dampfsperren 5
2.7 Berechnungs-Software 6
2.8 Außenklima. 6
2.9 Innenklima 6

3. Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung 6
Materialeigenschaften. 6
Funktionsweise der Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung 7
Auswertungsbereich. 7
3.1 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten. 7
3.1.1 Fall 1: 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte 7
3.1.2 Fall 2: 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte 8
3.1.3 Fall 3: Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten zzgl. einer eingelegten Dampfbremsbahn . . 8
3.2 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung 9
3.2.1 Fall 4: 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung. 10
3.2.2 Fall 5: 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung. 10
3.3 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Schaumdämmstoffen 11
3.3.1 Fall 6: Sanierungslösung mit Überdämmung aus Schaumdämmstoffen 11
3.4 Zusammenfassung der empfohlenen Sanierungsvarianten mit flächig verlegter Luftdichtung zwischen Gefachdämmung und Überdämmung. 12

4. Dachsanierung von außen mit Luftdichtung im Sub-and-Top Verfahren verlegt 12
4.1 Grundlagen und Randbedingungen 12
4.1.1 Verlegung und Funktionsweise der Dachsanierung von außen im Sub-and-Top Verfahren. 12
4.1.2 Materialeigenschaften 12
4.1.3 Sub-and-Top Vergleich des Bauschadens-Freiheits-Potenzials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d-Wert . . 13
4.1.4 Vergleichende Betrachtung der Rücktrocknungsreserven 13
4.1.5 Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials. 13
4.2 Untersuchte Konstruktionen 14
4.2.1 Fall 7: Sub-and-Top ohne Überdämmung mit diffusionsoffener Unterdeckbahn 14
4.2.2 Fall 8: Sub-and-Top mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte. 14
4.2.3 Fall 9: Sub-and-Top mit Überdämmung aus 50 mm Polyurethan vlieskaschiert. 14
4.3 Ergebnisdiskussion 14
4.4 Fazit: Vergleich von Sub-and-Top verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen. 14
4.5 Zusammenfassung der empfohlenen Sanierungsvarianten mit Sub-and-Top verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen 15
4.5.1 Sub-and-Top ohne Überdämmung mit diffusionsoffener Unterdeckbahn 15
4.5.2 Sub-and-Top mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte oder anderen diffusionsoffenen Faserdämmstoffen. . 15
4.5.3 Sub-and-Top mit Überdämmung aus Polyurethan vlieskaschiert. 15

5. Schlussbetrachtung zur Studie. 15

Diffusionsvorgänge in der Konstruktion lassen sich zuverlässig bewerten

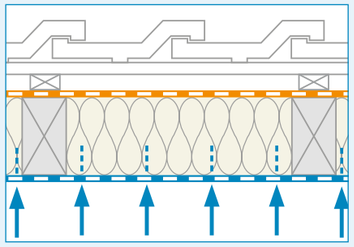


Abb. 1: **Feuchteeinwirkung auf eine Dämmkonstruktion im Winter**
Über eine Dampfbrems- und Luftdichtungsebene mit einem s_d-Wert von 3 m gelangen lediglich 5 g Wasser pro Quadratmeter am Tag in die Konstruktion.

Berücksichtigung von Feuchteeinträgen durch Konvektion

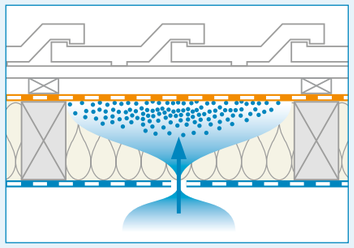


Abb. 2: **Feuchteeintrag in die Dämmung durch Leckagen**
Über eine 1 mm breite Fuge sind Feuchteeinträge von bis zu 800 g Wasser am Tag möglich.

Genaue Ergebnisse mit instationären Berechnungsmodellen

Stationäre Modelle

- Verfahren nach Glaser

➔ liefert grobe Anhaltswerte

Instationäre Modelle

- WUFI pro / WUFI 2D
- Delphin

➔ liefern genauste Werte für Feuchtegehalte für jede Position im Bauteil – ideal für die Berechnung der Bauteilsicherheit

1. 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 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 Anforderungen 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 Diffusionswiderstand 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.

2. Grundlagen und Randbedingungen

2.1 Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen

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/raumseitig 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 (8,7 °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.

2.2 Quellen für einen Feuchtigkeitseintrag

Zwei grundlegende Ursachen für einen Feuchteeintrag 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 EN ISO 13788 [13]) oder als realitätsnahe instationäre Berechnung der Feuchtetransporte durch Anwendung realer Klima- und Baustoffkenndaten gemäß DIN EN 15026 [4].

2.3 Berechnungsmodelle für Diffusionsvorgänge

Für die Berechnung der Feuchtetransporte durch Diffusion (siehe Abb. 1) innerhalb der Konstruktion stehen verschiedene Berechnungsmodelle mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Verfügung.
Die DIN 4108-3 [2] beschreibt, neben einer großen Auswahl an nachweisfreien Konstruktionen, zwei gängige Berechnungsverfahren.
Im Anhang A wird das einfache Perioden-bilanzverfahren (auch Glaser-Verfahren) in Anlehnung an DIN EN ISO 13788 [13] beschrieben. Hierbei wird die Tauwasser- bzw. Verdunstungsmenge, die durch Diffusion in das betrachtete Bauteil hinein bzw. heraus gelangen kann, mit standardisierten Klimabedingungen errechnet. Für die Berechnung stehen 2 Blockklimate (Winter bzw. Sommerklima) zur Verfügung. Dieser genannte Ansatz erlaubt keine detaillierte Betrachtung der Wärme- und Feuchteströme. Es ist nicht möglich, den genauen Feuchtegehalt eines der eingesetzten Materialien zu bestimmen. Dieses sogenannte Glaserverfahren dient seit Jahrzehnten im Baubereich ausschließlich der groben Abschätzung von Tauwasser bzw. Verdunstungsmengen.
Im Anhang D der DIN 4108-3 [2] wird die Feuchteschutzbemessung durch hygrothermische Simulation gemäß DIN EN 15026 [4] beschrieben. Dieses instationäre Berechnungsmodell, wie es im WUFI pro [5] bzw. WUFI 2D [6] oder im Delphin [7] enthalten ist, simuliert die Feuchte- und Wärmeströme innerhalb von Konstruktionen. Werden stündlich ermittelte Klimadaten zur Berechnung verwendet, liefern diese mit weitem Abstand die genauesten Ergebnisse.

2.3.1 Berechnung in Anlehnung an DIN EN ISO 13788 [13] Verfahren nach Glaser
Der Feuchtigkeitsstrom wird 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 °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/m² nicht überschreiten. Die Tauwassermenge in der Winterperiode muss geringer sein als die Verdunstungsmenge im Sommer.

2.3.2 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. Auch Einflüsse wie z. B. Verschattung, die Art der Eindeckung, Beläge wie Gründach, Kies usw. und sogar Undichtheiten der Luftdichtungsschicht inklusive dem konvektiven Feuchteeinträgen können in den Berechnungen berücksichtigt werden.

2.4 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 (siehe Abb. 2).
Ab WUFI pro 5.0 steht für die Berechnung von konvektiven Feuchteeinträgen ein Luftinfiltrationsmodell zur Verfügung. Es kann auf Grundlage eines Austausches mit der Innenraumluft einen konvektiven Feuchteeintrag simulieren. Das setzt voraus, dass die Undichtheit der Konstruktion bekannt ist, denn diese dient dazu, den Feuchtigkeitseintrag zu quantifizieren. Bei Luftströmungen durch Leckagen konzentriert sich der Feuchteeintrag 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 m²) eine Feuchtigkeitsmenge von 800 g/m und Tag durch Konvektion in die Wärmedämmkonstruktion gelangen (siehe Abb. 3).
So viel Feuchtigkeit kann auch die diffusionsoffenste Unterdeckbahn nicht austrocknen lassen.

2.5 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.

2.6 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.

Feuchteeintrag in die Konstruktion durch Undichtheiten in der Dampfbremse

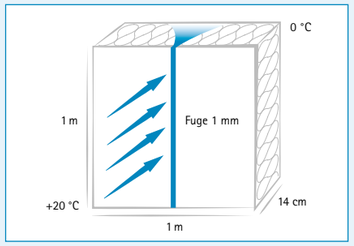


Abb. 3: **1 mm Fuge = 800 g/24 h pro m Fugenlänge**

Feuchtetransport
durch Dampfbremse: 0,5 g/m² x 24 h
durch 1 mm Fuge: 800 g/m x 24 h
Erhöhung um Faktor: 1.600

Randbedingungen
Dampfbremse s_d-Wert = 30 m
Innentemperatur = +20 °C
Außentemperatur = 0 °C
Druckdifferenz = 20 Pa
entsprechend Windstärke 2-3

Messung: Institut für Bauphysik, Stuttgart [11]

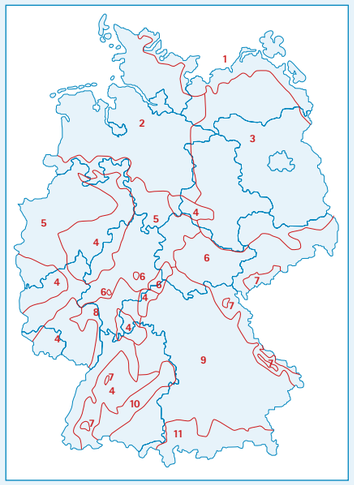


Abb. 4: Klimazonen zur Berechnung mit HRY Klimadaten

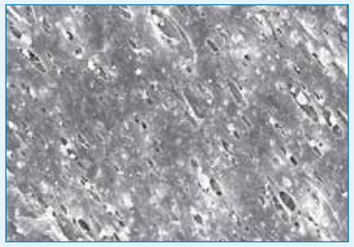


Abb. 5: **Vergrößerung eines mikroporösen Funktionsfilmes**
Passiver Feuchtetransport durch Poren (Gasaustausch) vergrößert die Gefahr von Eisbildung im Bauteil und ist nicht absolut luftdicht.



Abb. 6: **Vergrößerung des monolithischen porenfreien Funktionsfilms der DASAPLANO 0,01 connect**
Aktiver Feuchtetransport entlang der Molekülketten erhöht das Austrocknungsvermögen und gewährleistet 100 % Luftdichtheit.

2.7 Berechnungs-Software

Auf Grundlage der formulierten Kriterien werden die Konstruktionen mit WUFI pro [5] des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin untersucht.

2.8 Außenklima

Diese Betrachtungen werden mit den Klimadatensätzen der hygrothermischen Referenzjahre (HRY) durchgeführt. Zur Berechnung mit den HRY Klimadaten wurde Deutschland in 11 Klimazonen unterteilt, denen jeweils ein Referenzort zugeteilt ist, dessen Klimadatensatz für alle Standorte in dieser Klimazone verwendet werden kann (siehe Abb. 4).

Die untersuchten Konstruktionen wurden jeweils mit allen 11 Klimadatensätzen berechnet und verglichen, um fundierte Erkenntnisse und Empfehlungen zu sicheren Aufbauten der Konstruktionen zu gewinnen. Ziel der Bauteilprüfungen war, dass die empfohlenen Sanierungslösungen in allen HRY Klimazonen funktionieren.

2.9 Innenklima

Das Innenklima wird entsprechend den Annahmen des WTA-Merkblatts 6-2-14/D [9] bzw. DIN 4108-3 [2] mit »Normalklima +5 %« festgelegt, wie es in Räumen bewohnter Häuser (Schlaf- und Wohnräume, Bäder und Küchen) vorhanden ist.

3. Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung

Die Dachsanierung erfolgt von der Außenseite, wobei die Innenbeplankung vollflächig erhalten bleibt. Diese Vorgehensweise wird z. B. bei Sanierungen angewendet, bei denen der Dachraum bereits bewohnt ist und/oder der Austausch der Dacheindeckung (z. B. Ziegel) notwendig wird.
Die Luftdichtung muss somit ebenfalls von der Außenseite installiert werden. Eine raumseitig flächige Verlegung, wie sie i. d. R. bei Neubauten vorgesehen wird (siehe: »Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen«), ist nicht möglich.
Bei der Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung wird das Dach von außen geöffnet, das Gefach vollständig mit Dämmung gefüllt, die Luftdichtungsbahn flächig auf den Bestandssparren verlegt, luftdicht an den benachbarten luftdichten Bauteilen angeschlossen und eine Überdämmung (z. B. Holzfaserunterdeckplatten) montiert. Anschließend folgen Konterlattung, Traglattung und Dacheindeckung.

Materialeigenschaften
Für diese Sanierungsvariante müssen Luftdichtungsbahnen verwendet werden, die abweichend von »normalen« Dampfbremsen, sehr diffusionsoffen, aber trotzdem luftdicht sind, da sie im Bauteilaufbau relativ weit außen im Kaltbereich angeordnet sind.
Dieses ist erst möglich, seitdem Materialien zur Verfügung stehen, die selbst sehr diffusionsoffen sind, wie z. B. Thermoplastischer Elastomer Ether Ester (TEEE), welches seit den 1990er Jahren für diffusionsoffene Bahnen (z. B. Unterdeckbahnen) genutzt wird.
Die meisten »diffusionsoffenen« Bahnen werden allerdings, nach wie vor noch mit Materialien hergestellt, die selbst nicht so diffusionsoffen sind, wie es erforderlich wäre. Die Membranen dieser Bahnen werden während der Produktion mit mikroskopisch kleinen Löchern versehen um die Diffusionsoffenheit überhaupt zu ermöglichen. Diese Bahnen nennt man mikroporös (früher mikroperforiert). Sie werden trotz einiger Nachteile überwiegend als Unterspann- und Unterdeckbahnen eingesetzt.
Für die Luftdichtung haben sich die Bahnen mit den sogenannten monolithischen Funktionsfilmen (z. B. TEEE) bewährt, die eine Diffusionsoffenheit bis zu einem s_d-Wert von 0,01 m aufweisen können und in der Lage sind, Feuchtigkeit aktiv zu transportieren.
Die pro clima DASAPLANO 0,01 verfügt über einen entsprechenden Film aus einer monolithischen Polymermischung und bietet der Konstruktion folgende Vorteile:

- **Luftdichtheit:** Der monolithische Funktionsfilm der DASAPLANO gewährleistet eine 100 %ige Luftdichtheit. Im Gegensatz zu herkömmlichen Luftdichtungsbahnen mit mikroporösen Filmen (siehe Abb. 5) ist die DASAPLANO absolut porenfrei (siehe Abb. 6).
- **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 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, bietet DASAPLANO 0,01 im Vergleich zu mikroporösen Luftdichtungsbahnen deutlich höhere Bauteilsicherheiten.

Funktionsweise der Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung
Die physikalische Funktionsweise der Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung beruht darauf, dass man die beiden Aufgaben der klassischen Dampfbremse, die Diffusion zu regeln und luftdicht zu sein, hier trennt. Die Diffusion wird geregelt indem die äußeren Bauteilschichten sehr diffusionsoffen sind. Raumseitige Bauteilschichten können, je nach Konstruktionsaufbau, die dampfbremsende Funktion übernehmen.
Die Luftdichtungsbahn (z. B. DASAPLANO 0,01) übernimmt ausschließlich die Luftdichtung und kann deutlich weiter in den Kaltbereich der Konstruktion verlegt werden als eine Dampfbremse, da sie mit einem s_d-Wert von 0,01 m hochdiffusionsoffen ist.
Eine diffusionsoffene Überdämmung (z. B. Holzfaserunterdeckplatte) schützt die Luftdichtungsbahn vor Vereisung. Die notwendige Dämmdicke und somit das Dickenverhältnis der Überdämmung zur Zwischensparrendämmung wird in der folgenden Untersuchung ermittelt.
Um eine einfache Planung und Ausführung zu ermöglichen, sind die Dämmdickenverhältnisse auf die Dicke der Dämmstoffe bezogen und nicht auf den rechnerischen R-Wert der Dämmstoffschichten (Fall 1 bis Fall 5).
Da die Dämmwirkungen (λ-Wert / WLZ) der einzelnen Dämmstoffe unterschiedlich sind, werden raumseitig der Luftdichtung (Zwischensparrendämmung) Dämmstoffe mit einer guten Dämmwirkung und außenseitig der Luftdichtung (Überdämmung) Dämmstoffe mit einer schlechteren Dämmwirkung betrachtet. Somit werden physikalisch ungünstigere Situationen berücksichtigt und Ergebnisse mit einer robusten Sicherheitsreserve erzielt.
Um einfache Lösungen für die Praxis zu erreichen, stand die Ermittlung der Dämmdickenverhältnisse im Vordergrund dieser Berechnungen. Daraus ergab sich, dass auch Dämmdicken genannt werden, die von aktuell marktüblichen Standardmaßen abweichen (z. B. bei Fall 1 und Fall 4 Holzfaserunterdeckplatten in 90 mm). In der Praxis ist dann die nächst höhere Standarddicke sinnvoll oder ein 2-lagiger Schichtaufbau.

Auswertungsbereich
Ausgewertet wird das Ergebnis der WUFI-Berechnung nach den Vorgaben des Leitfaden zur »Tauwasserauswertung in hydrophoben Mineraldämmungen« [10]. Demnach darf die freie Wassersättigung der verwendeten Mineraldämmung im oberen Millimeter (kaltseitig) nicht überschritten werden. Als Dämmstoff wurde ein Material aus der WUFI-Datenbank gewählt, das nach einer Vielzahl von Vergleichsrechnungen zu den im Vergleich höchsten Feuchtegehalten im Dämmstoff führt und somit eine Worst-case Betrachtung ermöglicht (= hohe Sicherheitsreserven).

3.1 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten

Steildach: 40° Dachneigung
Dacheindeckung: rote Ziegel
Ausrichtung der Dachfläche: Nord

3.1.1 Fall 1: 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte

Bauteilaufbau (von innen nach außen) (siehe Abb. 7):

- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Gipsbauplatte), s_d-Wert ≥ 0,1 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima DASAPLANO 0,01, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten (WLZ 049), 90 mm
- Konterlattung und Traglattung
- Dachziegel rot

Entspricht dem Dämmdickenverhältnis 2:1 (Vollsparrendämmung : Überdämmung)

Die Ergebnis-Grafik zeigt den Wassergehalt im Verlauf der ersten 5 Jahre (siehe Abb. 8). Schon ab dem zweiten Jahr stellt sich ein eingependelter Zustand ein. Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt sehr gering und erreicht Werte bis zu 0,34 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. In den Wintermonaten steigt er kurzzeitig an bis zum Maximum von 196,61 kg/m³ und bleibt deutlich unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 361 kg/m³.

Ergebnisdiskussion zu Fall 1:
Beim vorliegenden Dämmdickenverhältnis von 2:1 (z. B. 180 mm zu 90 mm) wird der Grenzwert von 361 kg/m³ in allen 11 HRY-Klimazonen deutlich unterschritten.
Somit stellt sich die 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte als sehr sicher heraus. Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass auch zusätzliche Unterdeckbahnen auf der Überdämmung mit

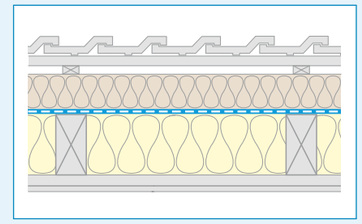


Abb. 7 / **Fall 1:** 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte

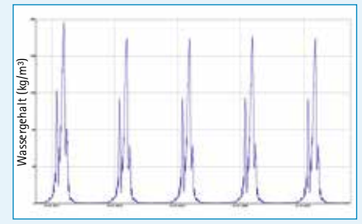


Abb. 8 / **Fall 1:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7

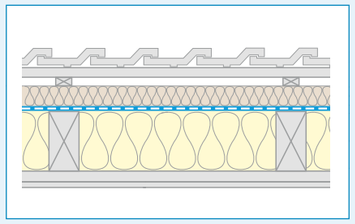


Abb. 9 / **Fall 2:** 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte



Abb. 10 / **Fall 2:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 11

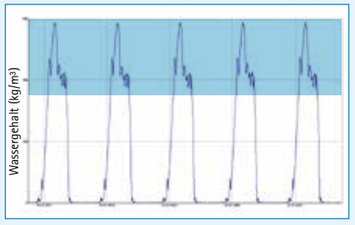


Abb. 11 / **Fall 2:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

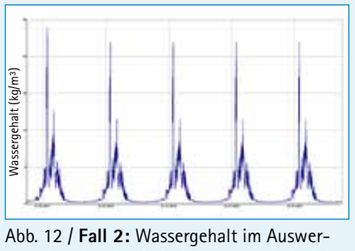


Abb. 12 / **Fall 2:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

Holzfaserunterdeckplatten einsetzbar sind, sofern sie einen s_d-Wert ≤ 0,1 m besitzen.

3.1.2 Fall 2: 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte

Bauteilaufbau (von innen nach außen) (siehe Abb. 9):
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Gipsbauplatte), s_d-Wert ≥ 0,1 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima DASAPLANO 0,01, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten (WLZ 049), 60 mm
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Entspricht dem Dämmdickenverhältnis 3:1 (Vollsparrendämmung : Überdämmung).

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 11 (siehe Abb. 10).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt gering. Er erreicht Werte bis zu 0,28 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. In den Wintermonaten steigt er an bis zum Maximum von 279,95 kg/m³. Somit liegt der Wassergehalt noch unter dem Grenzwert von 361 kg/m³.

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 11).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist auch hier der Wassergehalt gering. Er erreicht Werte bis zu 0,32 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. In den Wintermonaten steigt er aber an bis zum Maximum von 588,41 kg/m³ und übersteigt somit den Grenzwert von 361 kg/m³ sehr deutlich.

Zwischenergebnis:
Beim Dämmdickenverhältnis von 3:1 (180 mm zu 60 mm) wird der Grenzwert von 361 kg/m³ in 3 von 11 HRY-Klimazonen überschritten. Somit kann eine Konstruktion mit einer Gipsbauplatte auf der Innenseite nicht bei einem Dämmverhältnis von 3:1 für ganz Deutschland empfohlen werden.

Lösungsansatz:
Erhöhung des Diffusionswiderstand auf der Innenseite.

Neuer Bauteilaufbau (von innen nach außen):
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Vollholzbeplankung), s_d-Wert ≥ 0,5 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima DASAPLANO 0,01, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten (WLZ 049), 60 mm
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 12).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt gering. Er erreicht Werte bis zu 0,29 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. In den Wintermonaten steigt er an bis zum Maximum von 28,74 kg/m³. Somit liegt der Wassergehalt jetzt deutlich unter dem Grenzwert von 361 kg/m³.

Ergebnisdiskussion zu Fall 2:
Wird der s_d-Wert auf ≥ 0,5 m erhöht, wird auch beim vorliegenden Dämmdickenverhältnis von 3:1 (z. B. 180 mm zu 60 mm) der Grenzwert von 361 kg/m³ in allen 11 HRY-Klimazonen unterschritten.
Aber Achtung! Auch wenn die Wassergehalte noch weit vom Grenzwert erscheinen, ist dieser sehr schnell erreicht, sobald der innere s_d-Wert geringer wird.
Somit stellt sich die 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte als sicher heraus, sobald die innere Beplankung (z. B. Holzschalung, Holzwerkstoffplatten usw.) einen s_d-Wert ≥ 0,5 m aufweist.
Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass bei o.g. Bedingungen auch zusätzliche Unterdeckbahnen auf der Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten einsetzbar sind, sofern sie einen s_d-Wert ≤ 0,1 m besitzen.

3.1.3 Fall 3: Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten zzgl. einer eingelegten Dampfbremsbahn

Um den raumseitigen Diffusionswiderstand zu erhöhen wird eine Dampfbremse (z. B. pro clima DA) im Gefach eingelegt und fixiert. Eine luftdichte Verklebung dieser Dampfbremse ist nicht notwendig, da die Luftdichtheit durch die verklebte Luftdichtungsbahn (z. B. DASAPLANO 0,01) erreicht wird. Auch bereits im Bestand vorhandene Bahnen oder Beplankungen (z. B. OSB) können diese Aufgabe erfüllen, sofern sie einen ausreichend hohen Diffusionswiderstand besitzen und noch voll funktionsfähig sind.

Bauteilaufbau (von innen nach außen) (siehe Abb. 13):
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Gipsbauplatte), s_d-Wert ≥ 0,1 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Dampfbremsbahn (z. B. pro clima DA mit s_d-Wert 2,3 m), zwischen den Sparren verlegt und fixiert
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima DASAPLANO 0,01, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten (WLZ 049), 35 mm
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 14).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt sehr gering. Sie erreicht Werte bis zu 0,20 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. An wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 6,63 kg/m³ deutlich unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 361 kg/m³ liegt.

Ergebnisdiskussion zu Fall 3
Durch den höheren Diffusionswiederstand auf der Raumseite kann die Überdämmung (hier Holzfaserunterdeckplatte) in diesem Berechnungsbeispiel auf 35 mm reduziert werden. Der Grenzwert von 361 kg/m³ wird in allen 11 HRY-Klimazonen unterschritten.
Das Ergebnis zeigt, dass die Dicke der Überdämmung, gegenüber der oben beschriebenen 2:1- und 3:1-Lösungen noch weiter reduziert werden kann, indem eine zusätzliche Dampfbremsbahn (z. B. pro clima DA) im Gefach eingelegt wird, um den Diffusionswiderstand zu erhöhen.
Somit stellt sich die Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte im o. g. Dämmverhältnis 35 mm : 180 mm (annähernd 5:1) als sicher heraus, sobald der innere s_d-Wert, durch einlegen einer pro clima DA Dampfbremsbahn einen s_d-Wert ≥ 2,3 m aufweist. Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass bei o. g. Bedingungen auch zusätzliche Unterdeckbahnen auf der Überdämmung mit Holzfaserunterdeckplatten einsetzbar sind, sofern sie einen s_d-Wert ≤ 0,1 m besitzen.

Fazit zur Dachsanierung mit flächiger Luftdichtung mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten
Konstruktionen dieser Art benötigen eine ausreichende Überdämmung mit diffusionsoffenen Holzfaserunterdeckplatten. In den oben aufgeführten Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass bei dem Dämmverhältnis von 2:1 die Konstruktionen sehr sicher funktionieren.
Dächer, die heute saniert werden, weisen oftmals nur Sparrenhöhen zwischen 12 und 16 cm auf. Somit ist das Dämmdickenverhältnis von 2:1 auch unter dem Gesichtspunkt sinnvoll, dass ja ein gewisses Maß der Überdämmung notwendig ist, um einen zeitgemäßen Wärmeschutz-Standard zu erreichen.
Das Dämmdickenverhältnis von 3:1 ist ebenfalls möglich, wenn innenseitige Bauteilschichten (z. B. die Innenbeplankung) mindestens einen s_d-Wert von ≥ 0,5 m aufweisen.
Falls eine dünnere Überdämmung geplant/ausgeführt werden muss, ist es möglich, den inneren Diffusionswiderstand, z. B. mit einer pro clima DA Dampfbremsbahn, noch weiter zu erhöhen.
Bei Abweichungen zu o.g. Aufbauten ist ein objektbezogener Nachweis mit einer Berechnung nach DIN EN 15026 [4] durchzuführen.

3.2 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung

Steildach: 40° Dachneigung
Dacheindeckung: rote Ziegel
Ausrichtung der Dachfläche: Nord

Die Überdämmung dieser Sanierungsvariante besteht aus Mineralfaserdämmung.
Da Mineralfaser diffusionsoffener ist als Holzfaserunterdeckplatten, aber auch weniger Feuchtigkeit speichern kann, unterscheiden sich die Diffusionsvorgänge in dieser Sanierungsvariante von denen aus Fall 1 bis Fall 3.
Außerdem benötigen Überdämmungen aus Mineralfaser immer eine zusätzliche Unterdeckbahn zum Schutz vor Witterungseinflüssen. Somit entsteht im Hinblick auf die Diffusion eine prägnantere Grenze zwischen der Mineralfaserdämmung und der Unterdeckbahn.
Aus den genannten Gründen ist für diese Sanierungsvariante mit Mineralfaser-Überdämmung eine optimierte Luftdichtungsbahn sinnvoll. Eine Reihe exemplarischer Berechnungen mit WUFI pro hat ergeben, dass sich der optimale s_d-Wert bei der feuchtevariablen pro clima INTELLO X einstellt.
Somit wird bei der Dachsanierung von außen mit Überdämmung aus Mineralfaser generell die Verwendung der INTELLO X empfohlen.

Auswertungsbereich
Aus o. g. Gründen wurde bei dieser Sanierungsvariante auch die Feuchteentwicklung unterhalb der äußeren Unterdeckbahn geprüft.
Hierzu wird analog zur Gefachdämmung der obere Millimeter nach den Vorgaben des Leitfaden zur »Tauwasserauswertung in hydrophoben Mineraldämmungen« [10] betrachtet.
Als Dämmstoffe wurden Materialien aus der WUFI-Datenbank gewählt, die nach einer

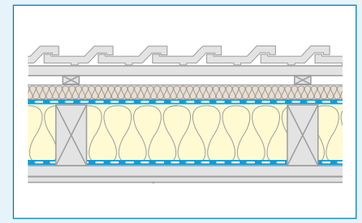


Abb. 13 / **Fall 3:** Sanierungslösung mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatten zzgl. einer eingelegten Dampfbremsbahn

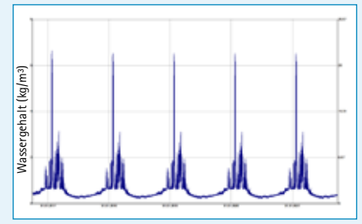


Abb. 14 / **Fall 3:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7

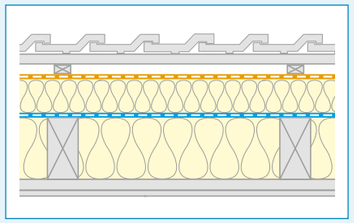


Abb. 15 / **Fall 4:** 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung

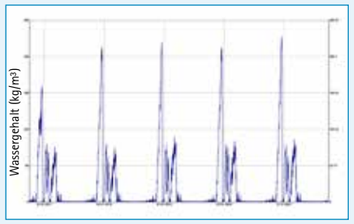


Abb. 16 / **Fall 4:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Überdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

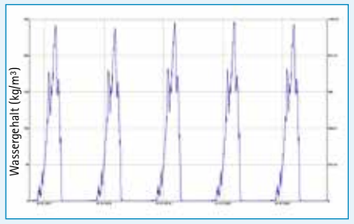


Abb. 17 / **Fall 4 :** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

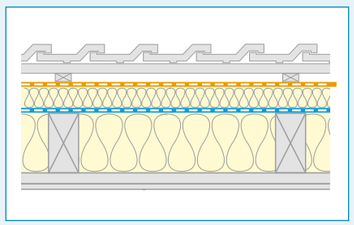


Abb. 18 / **Fall 5 :** Schnittzeichnung mit 3:1-Lösung (Überdämmung mit MiWo)

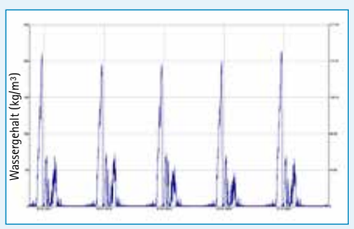


Abb. 19 / **Fall 5:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Überdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

Vielzahl von Vergleichsrechnungen zu den ungünstigsten Berechnungsergebnissen führten und somit hohe Sicherheitsreserven enthalten.
Somit wurde für die weiteren Berechnungen ein Dämmstoff für die Gefachdämmung ausgewählt, der einen Grenzwert der freien Wassersättigung von 361 kg/m³ besitzt.
Der Dämmstoff für die Überdämmung besitzt einen Grenzwert der freien Wassersättigung von 544 kg/m³.

3.2.1 Fall 4:
2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung

Bauteilaufbau (von innen nach außen):
(siehe Abb. 15):
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Gipsbauplatte), s_d-Wert ≥ 0,10 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima INTELLO X, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 040), 90 mm
- Unterdeckbahn (ggf. aufkaschiert) mit s_d-Wert ≤ 0,1 m
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Entspricht dem Dämmdickenverhaltnis 2:1 (Vollsparrendämmung : Überdämmung)

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Überdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 16).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt gering. Es werden Werte bis zu 0,17 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung erreicht. Nur an wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 273,74 kg/m³ deutlich unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 544 kg/m³ liegt.

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 17).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt sehr gering und geht herunter bis auf 0,25 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. Nur an wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 345,70 kg/m³ knapp unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 361 kg/m³ liegt.

Ergebnisdiskussion zu Fall 4
Beim vorliegenden Dämmverhältnis von 2:1 werden die Grenzwerte von 361 kg/m³ (Gefachdämmung) bzw. 544 kg/m³ (Überdämmung) in allen 11 HRY-Klimazonen unterschritten.
Somit stellt sich die 2:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung als sicher heraus. Die Dämmdickenverhältnisse sind, wie bei den Fällen 1 bis 3, auch hier auf die Dicke der Dämmstoffe bezogen und nicht auf den rechnerischen R-Wert der Dämmstoffschichten.

3.2.2 Fall 5:
3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung

Soll die Überdämmung dünner werden als im Fall 4, muss der s_d-Wert auf der Innenseite erhöht werden. Das kann man z. B. durch eine entsprechende innere Beplankung (z. B. Holzschalung, Holzwerkstoffplatten usw.) erreichen.

Bauteilaufbau (von innen nach außen) (siehe Abb. 18):
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Vollholzbeplankung), s_d-Wert ≥ 0,50 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 032), 180 mm
- Luftdichtungsbahn pro clima INTELLO X, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 040), 60 mm
- Unterdeckbahn (ggf. aufkaschiert) mit s_d-Wert ≤ 0,1 m
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Entspricht dem Dämmdickenverhaltnis 3:1 (Vollsparrendämmung : Überdämmung)

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Überdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 19).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt gering. Es werden Werte bis zu 0,15 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung erreicht. Nur an wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 213,40 kg/m³ deutlich unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 544 kg/m³ liegt.

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 20).
Im überwiegenden Jahresverlauf ist der Wassergehalt sehr gering und geht herunter bis auf 0,22 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung. Nur an wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 350,24 kg/m³ knapp unterhalb des Grenzwert für den gewählten Dämmstoff von 361 kg/m³ liegt.

Ergebnisdiskussion zu Fall 5
Beim vorliegenden Dämmverhältnis von 3:1 werden die Grenzwerte von 361 kg/m³ (Gefachdämmung) bzw. 544 kg/m³ (Überdämmung) in allen 11 HRY-Klimazonen unterschritten.
Somit stellt sich die 3:1-Sanierungslösung mit Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung als sicher heraus, sobald die innere Beplankung (z. B. Holzschalung, Holzwerkstoffplatten usw.) einen s_d-Wert ≥ 0,5 m aufweist.
Die Dämmdickenverhältnisse sind, wie bei den Fällen 1 bis 4, auch hier auf die Dicke der Dämmstoffe bezogen und nicht auf den rechnerischen R-Wert der Dämmstoffschichten.
Analog zu Fall 3 kann ggf. eine eingelegte Dampfbremsbahn (z. B. pro clima DA) und der somit erhöhte innere s_d-Wert genutzt werden, um eine dünnere Überdämmung einsetzen zu können.
Da Überdämmungen mit Mineralwolle, die dünner sind als beim Dämmverhältnis 3:1, nur selten vorkommen, wurde diese Option hier nicht näher betrachtet.

Fazit zur Dachsanierung mit flächiger Luftdichtung mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung
Konstruktionen dieser Art benötigen eine ausreichende Überdämmung mit diffusionsoffenen Mineralfaser-Aufdachdämmungen.
In den oben aufgeführten Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass bei den Dämmverhältnis von 2:1 die Konstruktionen sicher funktionieren.
Dächer, die heute saniert werden, weisen oftmals nur Sparrenhöhen zwischen 12 und 16 cm auf. Somit ist das Dämmdickenverhältnis von 2:1 auch unter dem Gesichtspunkt sinnvoll, dass ja ein gewisses Maß der Überdämmung notwendig ist, um einen zeitgemäßen Wärmeschutz-Standard zu erreichen.
Das Dämmdickenverhältnis von 3:1 ist ebenfalls möglich, wenn innenseitige Bauteilschichten (z. B. die Innenbeplankung) mindestens einen s_d-Wert von ≥ 0,5 m aufweisen.
Falls eine dünnere Überdämmung geplant/ausgeführt werden muss, ist es möglich, den inneren Diffusionswiderstand, z. B. mit einer pro clima DA Dampfbremsbahn, noch weiter zu erhöhen.
Bei Abweichungen zu o.g. Aufbauten ist ein objektbezogener Nachweis mit einer Berechnung nach DIN EN 15026 [4] durchzuführen.

3.3 Dachsanierung von außen mit flächiger Luftdichtung zwischen Bestandssparren mit Mineralfaser-Gefachdämmung und Überdämmung aus Schaumdämmstoffen

Dachsanierungen von außen sind auch mit Überdämmung aus geschäumten Aufdachdämmungen (z. B. PUR) möglich.
Allerdings sind diese geschäumten Dämmstoffe relativ diffusionsdicht und widersprechen dem eigentlich angestrebten Dachaufbau, der innen so dampfbremsend wie nötig und außen so diffusionsoffen wie möglich sein sollte.
Insbesondere Dämmstoffe mit sehr niedrigen Lambda Werten besitzen in der Regel Deckschichten / Kaschierungen aus Aluminium, die somit diffusionsdicht sind.
Deshalb ist es bei dieser Sanierungsvariante wichtig, dass die Überdämmung einen relativ großen Anteil der Gesamtdämmwirkung der Konstruktion aufweist (siehe »Funktionstechnische Platzierung der Luftdichtung in Konstruktionen« auf Seite 4).
In einer Parameterstudie mit WUFI pro wurde im Rahmen dieser Studie untersucht, bei welchen Dämmverhältnissen zwischen der Überdämmung mit geschäumten Dämmungen und Mineralfaser Gefachdämmung, der Feuchteschutz der Konstruktion in allen HRY-Klimazonen erfüllt wird.
Da die Dämmwirkungen (λ-Wert / WLZ) der einzelnen Dämmstoffe zum Teil sehr unterschiedlich sind, werden die Dämmdickenverhältnisse hier auf den rechnerischen R-Wert der Dämmstoffschichten und nicht auf die Dicke der Dämmstoffe bezogen, wie in Fall 1 bis Fall 5.
Als Dämmstoffe wurden Materialien aus der WUFI-Datenbank gewählt, die nach einer Vielzahl von Vergleichsrechnungen zu den ungünstigsten Berechnungsergebnissen führten und somit hohe Sicherheitsreserven enthalten.
In diesem Fall wurde für die Berechnungen ein Dämmstoff für die Gefachdämmung ausgewählt, der einen Grenzwert der freien Wassersättigung von 255 kg/m³ besitzt. Als Luftdichtung hat sich die Dampfbremse pro clima DA als optimal herausgestellt. Sie wird flächig über die Sparren oder einer Schalung verlegt.
Die Sparrengefache werden im Idealfall vorher voll ausgedämmt (z. B. mit flexibler Mineralfaserdämmung). Ggf. können die Gefache auch ungedämmt oder teilgedämmt bleiben (siehe Ergebnisdiskussion zu Fall 6).

3.3.1 Fall 6:
Sanierungslösung mit Überdämmung aus Schaumdämmstoffen

Bauteilaufbau (von innen nach außen):
(siehe Abb. 21)
- Bestand: Innenbeplankung (z. B. Gipsbauplatte), s_d-Wert ≥ 0,1 m
- Bestand (optional): Lattung
- Bestand: Sparren,180 mm
- Vollsparrendämmung mit nicht sorptionsfähigem Dämmstoff (Mineralwolle: WLZ 035), 180 mm
- Dampfbremsbahn pro clima DA, vollflächig luftdicht verlegt und angeschlossen
- Überdämmung mit Schaumdämmstoff (z. B. WLZ 035), 120 mm
- Unterdeckbahn (ggf. aufkaschiert)
- Konterlattung + Traglattung
- Dachziegel rot

Entspricht dem Dämmdickenverhaltnis 3:2 (Vollsparrendammung : Überdammung)

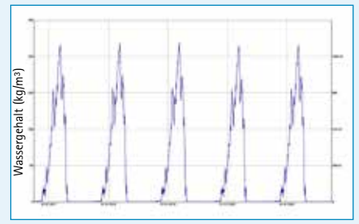


Abb. 20 / **Fall 5:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

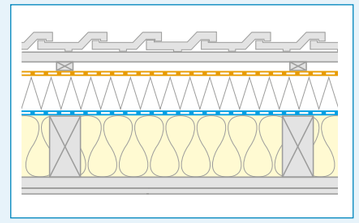


Abb. 21 / **Fall 6:** 3:2 Sanierungslösung mit Überdämmung aus Schaumdämmstoffen ohne Luftschicht im Gefach (ohne Schalung)

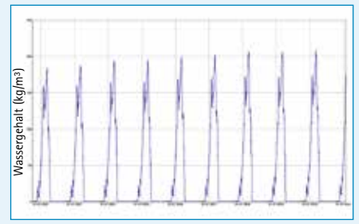


Abb. 22 / **Fall 6:** Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7.

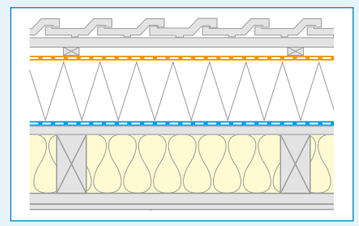


Abb. 23 / **Fall 6:** 1:1 Sanierungslösung mit Überdämmung aus Schaumdämmstoffen mit Schalung

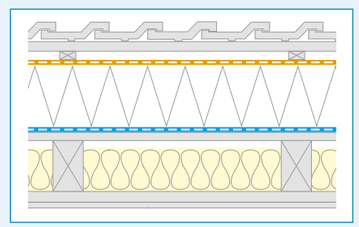


Abb. 24 / **Fall 6:** 1:2 (ZSD : ADD) Sanierungslösung mit Überdämmung aus Schaumdämmstoffen mit Luftschicht im Gefach

Wassergehalt im Auswertungsbereich der Gefachdämmung beispielhaft in der Klimazone HRY 7 (siehe Abb. 22).
In den Sommermonaten ist der Wassergehalt sehr gering und erreicht Werte bis zu 0,40 kg/m³ im Auswertungsbereich der Mineralfaserdämmung.
Nur an wenigen Tagen im Winter ist ein Peak der Auswertungskurve zu erkennen, dessen Höchstwert von 209,10 kg/m³ unterhalb des Grenzwert für den hier gewählten Dämmstoff von 255 kg/m³ liegt.

Ergebnisdiskussion zu Fall 6
Beim vorliegenden Dämmverhältnis von 3:2 von Gefachdämmung zu Überdämmung wird der Grenzwert von 255 kg/m³ in allen 11 HRY-Klimazonen unterschritten. Somit stellt sich diese Sanierungsvariante als sicher heraus. Befindet sich auf den Sparren (unter der Dampfbremsbahn) eine Vollholzschalung wird der Grenzwert bei o.g. Dämmverhältnis nicht mehr in allen HRY-Klimazonen eingehalten. Deshalb ist bei einer Vollholzschalung ein Dämmverhältnis (zwischen Gefachdämmung und Überdämmung) von 1:1 zu empfehlen. (siehe Abb. 23)
Sollten die Gefache nicht oder nur teilweise gedämmt sein (z. B. durch vorhandene Schalung nicht erreichbar) (siehe Abb. 24), ist wichtig, dass die Luftschichten in der Sparrenebene keine Öffnungen zum Außenbereich haben und somit keine Außenluft einströmen kann.
Außerdem sollte dann (abweichend von o. g. Berechnungsergebnissen) die Überdämmung mindestens 2/3 der Gesamtdämmwirkung (R-Wert) erfüllen, um Kondensat in diesem Luftraum zu vermeiden. Das entspricht dem Dämmverhältnis 1:2 von Gefachdämmung zu Überdämmung (R-Wert). Bei abweichenden Randbedingungen muss eine objektbezogene Bauteilprüfung durchgeführt werden.

3.4 Zusammenfassung der empfohlenen Sanierungsvarianten mit flächig verlegter Luftdichtung zwischen Gefachdämmung und Überdämmung

Die folgende Übersicht zeigt zusammenfassend die empfohlenen Sanierungslösungen mit den jeweils empfohlenen Luftdichtungsbahnen und Dämmverhältnissen. Je nach Standortklima und verwendeten Materialien können ggf. auch dünnere Überdämmungen verwendet werden, sofern das mit individuellen, standortbezogenen Berechnung nach DIN EN 15026 [4] nachgewiesen wird.

Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte / 2:1-Lösung (siehe Fall 1)
- Luftdichtungsbahn: pro clima DASAPLANO 0,01 connect
- Dämmverhältnis (Dämmstoffdicke): 2:1 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- s_d-Wert innen: ≥ 0,1 m

Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte / 3:1-Lösung (siehe Fall 2)
- Luftdichtungsbahn: pro clima DASAPLANO 0,01 connect
- Dämmverhältnis (Dämmstoffdicke): 3:1 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- s_d-Wert innen: ≥ 0,5 m

Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte inkl. zusätzlicher Dampfbremse im Gefach (siehe Fall 3)
- Luftdichtungsbahn: pro clima DASAPLANO 0,01 connect
- Dämmverhältnis (Dämmschichtdicke): z. B. ≤ 180 mm (ZSD) : ≥ 35 mm (ADD)
- s_d-Wert innen: ≥ 2,3 m (mit pro clima DA)

Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung / 2:1-Lösung (siehe Fall 4)
- Luftdichtungsbahn: pro clima INTELLO X
- Dämmverhältnis (Dämmstoffdicke): 2:1 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- s_d-Wert innen: ≥ 0,1 m

Überdämmung aus Mineralfaser-Aufdachdämmung / 3:1-Lösung (siehe Fall 5)
- Luftdichtungsbahn: pro clima INTELLO X
- Dämmverhältnis (Dämmstoffdicke): 3:1 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- s_d-Wert innen: ≥ 0,5 m

Überdämmung aus Schaumdämmstoffen (siehe Fall 6). **Hier ist beim Dämmverhältnis der R-Wert maßgebend!**
- Luftdichtungsbahn: pro clima DA (connect)
- Dämmverhältnis (R-Wert): 3:2 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- Dämmverhältnis (R-Wert) mit Schalung: 1:1 (Gefachdämmung : Überdämmung)
- Dämmverhältnis (R-Wert) mit Luftschicht: 1:2 (Gefachdämmung : Überdämmung)

4. Dachsanierung von außen mit Luftdichtung im Sub-and-Top Verfahren verlegt

4.1 Grundlagen und Randbedingungen

4.1.1 Verlegung und Funktionsweise der Dachsanierung von außen im Sub-and-Top Verfahren
Bei dieser Dachsanierungsvariante wird analog der bisher beschriebenen Sanierungen das Dach von außen geöffnet. Eventuell vorhandene Dämmungen entfernt und die Bahn im sogenannten Sub-and-Top Verfahren verlegt. Hierbei wird die Bahn durch das Gefach (unten) auf der Innenbekleidung (ggf. auf vorhandener Lattung) verlegt. An der Sparrenflanke wird die Bahn hoch geführt, über den Sparren verlegt und an der anderen Seite des Sparren wieder herunter in das nächste Gefach geführt. Somit ergibt sich eine wellenförmige Verlegung durch das Gefach (Sub) und über das Tragwerk (Top) (siehe Abb. 25).
An den Sparrenseiten wird die Bahn mit dünnen Halteleisten / Montageleisten fixiert, um den Spalt zwischen Sparren und Bahn so eng wie möglich zu schließen.
Die Verwendung dünner Montageleisten (z. B. DASATOP FIX) hat den Vorteil, dass sie einfacher befestigt werden können (z. B. mit Tackerklammern) und dass sie größtmöglichen Raum für die Dämmung lassen, die dann nicht ausgeklinkt werden muss. Durch die Verklebung der Bahnenstöße und Anschlüsse an die benachbarten luftdichten Bauteile wird eine flächige Luftdichtheit erreicht.
Im Anschluss an die Verlegung der Sanierungsbahn wird das Gefach mit faserförmigen Dämmstoff hohlraumfrei ausgelegt und eine Unterdeckung in Form einer Unterdeckbahn oder Unterdeckplatte verlegt. Anschließend folgen Konterlattung, Traglattung und Dacheindeckung.

4.1.2 Materialeigenschaften
Wie in Abb. 25 zu sehen ist die Besonderheit dieser Verlegeform, dass die Bahn im Gefachbereich raumseitig verläuft, was für Dampfbremsen die ideale Position darstellt (siehe »Goldene Regel 1/3 zu 2/3« auf Seite 4).
An den Sparren wird die Bahn bis in den Kaltbereich geführt, was der Raumluft ermöglicht, durch den verbliebenen, engen Spalt zwischen Bahn und Sparren, ebenfalls bis in den Kaltbereich gelangen zu können.
Die Raumluft kühlt sich auf den Weg nach oben ab, wodurch deren relative Luftfeuchtigkeit steigt.
Damit dadurch keine zu hohen Feuchtigkeiten an der Sparrenoberseite entstehen, benötigt man für diese Verlegeform eine Bahn, die an dieser Stelle (Top) die Feuchtigkeit heraus lassen kann, aber trotzdem luftdicht ist.

Ideal dafür ist eine feuchtevariable Dampfbremse mit relativ niedrigen Diffusionswiderständen, die am Sparren (Top) sehr schnell und sehr weit öffnen kann. Also dort einen möglichst niedrigen s_d-Wert aufweist.
Im Gefach hingegen einen höheren s_d-Wert behält und somit in diesem Bereich weiterhin als Dampfbremse fungiert. Ideal auf diese Einbausituation eingestellt ist die pro clima DASATOP mit einem s_d-Wert von 0,05 m bis 2 m. 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. 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. Warum die feuchtevariable Funktion mit den optimiert niedrigen s_d-Werten so wichtig für die Funktion der Sanierungs-Lösung ist, zeigt die nachfolgende Untersuchung:

4.1.3 Sub-and-Top Vergleich des Bauschadens-Freiheits-Potenzials bei Dampfbremsen mit unterschiedlichem s_d-Wert
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, wie oben beschrieben.

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. 26) 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 Wärmedämmungen in Holz- und Stahlbaukonstruktionen« [11]
- 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. 27 dargestellt.

4.1.4 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 [kg/m² x h] erfasst, wird die Leistungsfähigkeit unterschiedlich dichter Bahnen deutlich.
Die Wasserdampfdiffusionsstromdichte wird ermittelt durch die Differenz der Wasserdampfteildrucke p_i (innen) [Pa] und p_a (außen) [Pa] dividiert durch den Wasserdampfdurchlasswiderstand Z [m² x h x Pa/kg]. Durch Multiplikation mit 24 erhält man den täglichen Wasserdampfdurchgang (WDD) [g/m² x 24 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.

Hinweis
Abweichend zur aktuellen Fassung der DIN 4108-3 [2] nutzen wir hier die Einheiten [kg/m² x h] für die Wasserdampfdiffusionsstromdichte und [m² x h x Pa/kg] für den Wasserdampfdurchlasswiderstand um den täglichen Wasserdampfdurchlass [g/m² x 24 h] darzustellen (siehe Abb. 28).

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.

4.1.5 Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials
Für die Berechnung von Konstruktionen mit Sub-and-Top-verlegten Bahnen ist die

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

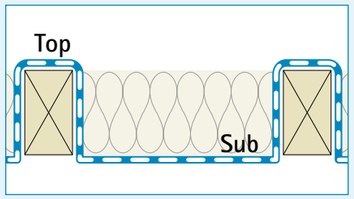


Abb. 25: Sub-and-Top-Prinzip
Im Gefach (Sub) diffusionsdichter: Schutz vor Feuchte.
Auf den Sparren (Top) hochdiffusionsoffen: schnelle Trocknung nach außen.

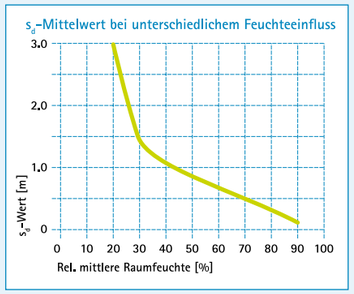


Abb. 26: DASATOP s_d-Wert 0,05-2 m
Im trockenen Bereich: s_d-Wert 2 m » entspricht einer Dampfbremse
Im feuchten Bereich (z. B. auf den Sparren): s_d-Wert 0,05 m » entspricht einer Unterdeckbahn

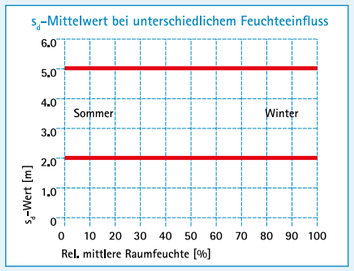
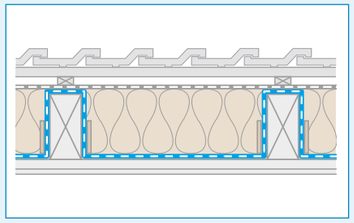


Abb. 27: Bahn s_d-Wert 2 m und 5 m
Dampfbremsen mit konstantem s_d-Wert sind sowohl im Feucht- als auch Trockenbereich dampfbremsend und reduzieren die wichtige Trocknung im Sparrenbereich.

s_d-Werte [m]	W_{DD} [g/m² x 24 h]
0,05	~ 320
0,10	~ 160
0,50	~ 32
2,00	~ 8
5,00	~ 3
50,00	~ 0,3

Abb. 28: W_{DD}-Werte für verschiedene s_d-Werte

Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials Standort Holzkirchen, Dach



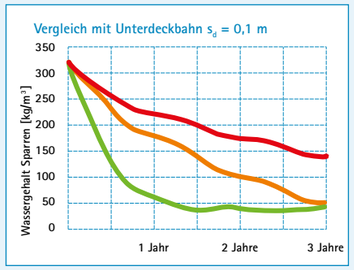
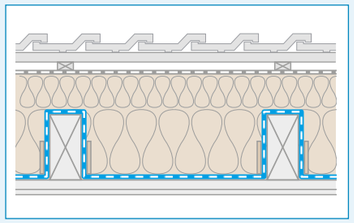


Abb. 29 / **Fall 7:** Ergebnis für diffusionsoffene Unterdeckung (s_d = 0,1 m)
Bauschadens-Freiheits-Potenzial:
- DASATOP 1.900 g/m
- s_d 2 m: zu gering
- s_d 5 m: zu gering



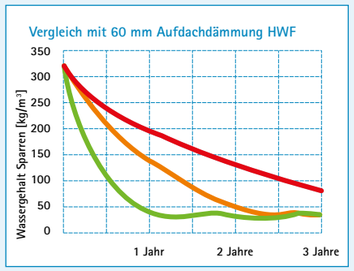


Abb. 30 / **Fall 8:** Ergebnis für 60 mm Holzfaserunterdeckplatte außen (s_d = 0,3 m)
Bauschadens-Freiheits-Potenzial:
- DASATOP 2.100 g/m
- s_d 2 m: zu gering
- s_d 5 m: zu gering

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 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
Steildach mit 40° Dachneigung nach Norden orientiert, Dacheindeckung aus grauen Dachziegeln Sparrenhöhe 12 cm mit Vollsparrendämmung aus Mineralwolle (Dichte = 60 kg/m³). Die Festlegung des Innenklimas erfolgt mit normaler Feuchtelast.

4.2 Untersuchte Konstruktionen

4.2.1 Fall 7: Sub-and-Top ohne Überdämmung mit diffusionsoffener Unterdeckbahn
Die Unterdeckung hat in der Berechnung einen s_d-Wert von 0,1 m (siehe Abb. 29).

4.2.2 Fall 8: Sub-and-Top mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte
Diese wird zur Vermeidung von Wärmebrücken als zusätzliche Aufsparrendämmung eingesetzt (s_d-Wert = 0,3 m). Berechnungsbeispiel mit 60 mm Holzfaserunterdeckplatte (siehe Abb. 30).

4.2.3 Fall 9: Sub-and-Top mit Überdämmung aus 50 mm Polyurethan vlieskaschiert
Aufsparrendämmung wie bei Fall 8, jedoch s_d-Wert = 2,5 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 (siehe Abb. 31)

4.3 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.
Für einen Vergleich der Austrocknungsgeschwindigkeit wird hier der Fasersättigungswert herangezogen. Erkennbar wird somit, dass der Sparren in der Konstruktion mit der DASATOP etwa dreimal schneller trocknet, 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.

4.4 Fazit: Vergleich von Sub-and-Top verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen

Die Sub-and-Top-Verlegung mit feuchtevariablen Dampfbrems- 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 Unterdeckbahn 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.
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 Top-Bereich 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 Bauschaden und Schimmel. Damit ist auch der Verarbeiter optimal vor Schaden und Haftungsansprüchen geschützt. Die Sub-and-Top-Verlegung von feuchtevariablen Dampfbrems- 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.

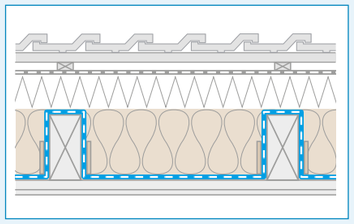
4.5 Zusammenfassung der empfohlenen Sanierungsvarianten mit Sub-and-Top verlegten Dampfbrems- und Luftdichtungssystemen

Die folgende Übersicht zeigt zusammenfassend die empfohlenen Sanierungslösungen mit verschiedenen Materialien zur Überdämmung. Die Ergebnisse dieser Studie und die empfohlene DASATOP Sanierungsdampfbremse entsprechen bzw. bestätigen die Empfehlungen und Forderungen zur Sub-and-Top Verlegung aus der DIN 4108-3 [2].

4.5.1 Sub-and-Top ohne Überdämmung mit diffusionsoffener Unterdeckbahn
Da die feuchtevariable DASATOP Sanierungsdampfbremse am Sparren sehr schnell öffnen kann, ist eine Überdämmung nicht notwendig, optional aber möglich. s_d-Wert der Unterdeckbahn: ≤ 0,1 m

4.5.2 Sub-and-Top mit Überdämmung aus Holzfaserunterdeckplatte oder anderen diffusionsoffenen Faserdämmstoffen
Bei Sanierungsdampfbremsen, die am Sparren nicht schnell öffnen, ist oft eine Überdämmung notwendig. Zur benötigten Dämmdicke bitte die entsprechenden Herstellerangaben berücksichtigen.

4.5.3 Sub-and-Top mit Überdämmung aus Polyurethan vlieskaschiert
Bei Überdämmungen aus PUR ist wichtig, dass sie keine dampfsperrenden Aluminiumschichten besitzen, sondern lediglich mit einem Vlies beschichtet sind, damit sie noch etwas diffusionsfähig sind. Außerdem ist eine Mindestdicke von 50 mm notwendig, um eine ausreichende Überdämmung der Dampfbremse im Sparrenbereich zu gewährleisten (bei Gefachdämmung ≤ 200 mm).



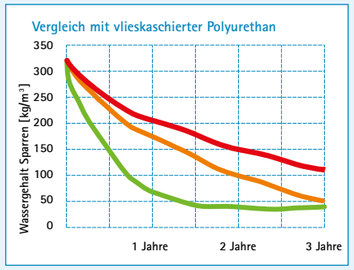


Abb. 31 / **Fall 9:** Ergebnis mit 50 mm Polyurethan außen (s_d = 2,5 m)
Bauschadens-Freiheits-Potenzial:
- DASATOP 1.800 g/m
- s_d 2: zu gering
- s_d 5: zu gering

5. Schlussbetrachtung zur Studie

Das Ziel dieser Studie war, herauszufinden, welche Sanierungsvarianten bei der Dachsanierung von der Außenseite im Hinblick auf den Feuchteschutz zu dauerhaft sicheren Konstruktionen führen.
Zusätzlich sollten die Untersuchungen zu übersichtlichen Ergebnissen führen, die für alle Standorte in Deutschland anwendbar sind.
Aus den oben genannten Gründen wurden die Empfehlungen, die sich aus den Berechnungen ergaben, auf die jeweils ungünstigeren Klimaregionen bezogen. Dies kann in Einzelfällen dazu führen, dass die Empfehlungen konservativer ausfallen, als bei individueller Betrachtung.
Auch die Auswahl der Materialien, die zur Berechnung verwendet wurden, orientierte sich daran, dass die Ergebnisse immer auf der sicheren Seite liegen und somit eine entsprechende Sicherheitsreserve aufweisen.
Bei abweichenden Bauteilen bzw. Randbedingungen, die nicht den angegebenen Konstruktionsempfehlungen entsprechen, nehmen Sie gerne Kontakt zur technischen Hotline von pro clima auf unter technik@proclima.de oder +49 6202 2782 45.

MOLL bauökologische Produkte GmbH
Rheintalstraße 35-43 · 68723 Schwetzingen · Germany
Tel.: +49 6202 2782 0 · eMail: info@proclima.de · **proclima.de**

pro clima®



Mehr Informationen finden Sie
in unserer aktuellen Broschüre:

»Luftdichtungs-Studie zur Berechnung des Bauschadens-Freiheits-Potenzials«

proclima.de/luftdichtungsstudie

Ihr pro clima Partner

2026-01 15426

Hinweis: Die dargestellten Sachverhalte beziehen sich auf den Stand der aktuellen Forschung und der praktischen Erfahrung. Wir behalten uns Änderungen der empfohlenen Konstruktionen und der Verarbeitung sowie die Weiterentwicklung und die damit verbundene Qualitätsänderung der einzelnen Produkte vor. Wir informieren Sie gern über den aktuellen technischen Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Verarbeitung.