

Bauphysik am Dach

Teil 1: Grundlagen

Autor: Dipl.-Ing. Markus Friedrich, 15732 Eichwalde

© Copyright Markus Friedrich Datentechnik
Bahnhofstraße 74
D - 15732 Eichwalde bei Berlin

www.friedrich-datentechnik.de

Alle Rechte sind geschützt.
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Autors.

Einleitung

Der Begriff Bauphysik deckt heutzutage ein weites Feld ab. Von der Wärmebedarfsberechnung über Wärmebrücken und Feuchtenachweise bis hin zu Spezialgebieten wie Schallschutz. Vereinzelt werden auch Bereiche aus der Statik, Heizungsanlagen, Kühlanlagen, Brandschutz u.a. mit einbezogen. Dieses Gebiet komplett abzuhandeln, würde den hier zur Verfügung stehenden Rahmen sicherlich sprengen. Deshalb habe ich mich darauf beschränkt, die für Dachhandwerker wesentlichen Bereiche U-Wert-Berechnung und Feuchtenachweis im Bauteilverfahren näher zu erläutern.

Das Bauteilverfahren

Für Neubauten regelt die Energieeinsparverordnung die Anforderungen an den Wärmebedarf von Wohn- und Nutzgebäuden. Das Gebäude wird hierbei als Ganzes betrachtet. Schlechte Wärmedämmung kann durch den Einsatz regenerativer Energien kompensiert werden, ein hochwertig gedämmtes Dach kann trotz mäßig dämmender Wände das Klassenziel der EnEV sichern. Solange gewisse Mindestgrenzen eingehalten werden, zählt nur das Gesamtergebnis.

Im Sanierungsfall ist dieses Energiebilanz-Verfahren meist weder verpflichtend noch anwendbar. Hier greift das Bauteilverfahren, d.h. die Mindestanforderungen müssen nur für das zu sanierende Bauteil erfüllt werden. Für Dacharbeiten gilt: bei Steildach-Umdeckungen darf der U-Wert (früher k-Wert) von 0,24, bei Abdichtungssanierungen der U-Wert von 0,20 nicht überschritten werden.

Wie aber errechnet sich der U-Wert? Am einfachsten erläutert sich das Verfahren am Beispiel eines nicht belüfteten Flachdaches, früher Warmdach genannt.

U-Wert-Berechnung

Ein typisches Warmdach besteht, von unten nach oben gesehen, aus den Schichten Betondecke, Dampfsperre, Dämmschicht und ein oder mehreren Abdichtungslagen.

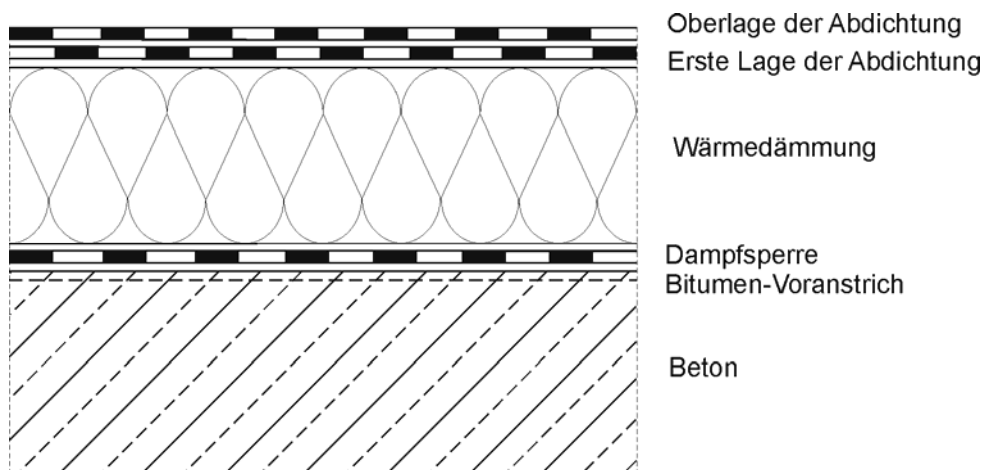


Abbildung 1: Warmdachaufbau

Jede Schicht setzt der Wärmewanderung einen Widerstand entgegen. Dieser Widerstand wächst mit der Dicke des Bauteils und sinkt mit dessen Wärmeleitfähigkeit.

Formel: $R = d / \lambda$

mit

R = Wärmedurchlasswiderstand (R wie Resistance, engl. Widerstand).
Einheit: $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$.

d = Dicke in Meter

λ = Wärmeleitfähigkeit (z.B. 0,040 für Polystyrol der WLG 040) in $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand des Warmdaches ergibt sich als Summe der Einzelwiderstände. In unserem Falle eines 2-lagig abgedichteten Warmdachs lautet die Formel für den Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand

$$R_{\text{ges}} = R_{\text{Betondecke}} + R_{\text{Dampfsperre}} + R_{\text{Dämmung}} + R_{\text{Abdichtungslage-1}} + R_{\text{Abdichtungslage-2}}$$

Für die Berechnung müssen nun die Dicken d und die Wärmeleitfähigkeitszahlen λ der einzelnen Schichten eingesetzt werden. Die Dicken ergeben sich aus der Konstruktion, die Wärmeleitfähigkeitszahlen entnimmt man der DIN 4108 Teil 4 oder den Datenblättern der verwendeten Produkte. Doch Vorsicht: die Abdichtungslagen dürfen nach DIN 4108 Teil 2, Punkt 5.3.3 nicht mitgerechnet werden! Die Berechnungsformel lautet somit:

$$R_{\text{ges}} = R_{\text{Betondecke}} + R_{\text{Dampfsperre}} + R_{\text{Dämmung}}$$

Rechenwerte:

| | | | |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------------|
| d_{Beton} | = 0,16 m (gewählt) | λ_{Beton} | = 2,10 (DIN 4108-4 Tab. 2.1.2) |
| $d_{\text{Dampfsperre}}$ | = 0,004 m | λ_{Bitumen} | = 0,17 (DIN 4108-4 Tab. 7.2.2) |
| $d_{\text{Dämmung}}$ | = 0,18 m | $\lambda_{\text{EPS 040}}$ | = 0,04 (DIN 4108-4 Tab. 5.5.1.1) |

Es ergibt sich folgender Rechenweg:

$$\begin{aligned} R_{\text{ges}} &= (d_{\text{Beton}} / \lambda_{\text{Beton}}) + (d_{\text{Dampfsperre}} / \lambda_{\text{Dampfsperre}}) + (d_{\text{Dämmung}} / \lambda_{\text{Dämmung}}) \\ &= (0,16 / 2,1) + (0,004 / 0,17) + (0,18 / 0,04) \\ &= 0,0762 + 0,0235 + 4,5 \\ &= \mathbf{4,5992} \text{ [m}^2 \text{ K / W]} \end{aligned}$$

Nur mit dem Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R_{ges} ist das Bauteil jedoch noch nicht komplett berechnet. Es fehlen noch die Wärmeübergangswiderstände, also die Werte, welche den Temperatursprung an Bauteiloberflächen beschreiben.

Hintergrundwissen Wärmeübergangswiderstand:

Am Übergang von Raumluft zur Betondecke wird die Betondecke erwärmt. Einen Teil der Wärmeenergie strahlt die Decke wieder in den Raum zurück, so dass die Betondecke immer kälter bleibt als die Raumluft. Die Folge ist ein Temperatursprung von typ. ca. 0,5 bis 1° C. Dieser Effekt existiert auch an der Dachoberfläche, ist dort aufgrund stärkerer Luftbewegung (Wind verbessert den Wärmeaustausch Luft zu Dachoberfläche) und anderer Effekte jedoch geringer. Sinngemäß gilt das auch für Wände und Bodendecken.

Die Werte für die Wärmeübergangswiderstände R_{si} (= innen) und R_{sa} (= außen) finden sich in DIN EN 6946 Kapitel 5 Tabelle 1.

| Richtung des Wärmestromes | | | |
|---------------------------|----------|------------|---------|
| | aufwärts | horizontal | abwärts |
| R_{si} | 0,10 | 0,13 | 0,17 |
| R_{sa} | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Tabelle 1: Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946

Im Falle unseres Warmdaches sind $R_{si} = 0,1$ und $R_{sa} = 0,04$. Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand wird damit zu

$$R_{ges} = 4,5992 + 0,1 + 0,04 = 4,7392 \text{ [m}^2 \text{ K / W]}$$

Gesucht war jedoch nicht der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand, sondern der U-Wert. Dieser ergibt sich aus dem Kehrwert des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes, gerundet auf 2 Nachkommastellen:

$$U = 1 / R_{ges} = 1 / 4,7392 = 0,22 \text{ [W / m}^2 \text{K]}$$

Die Bedingungen der Energieeinsparverordnung nach einem U-Wert $\leq 0,20$ wäre damit nicht erfüllt.

Leider sind nicht alle Bauteile so einfach aufgebaut wie ein eben gedämmtes Warmdach. Und selbst dieses birgt noch die ein oder andere Überraschung. Für den Fall, dass sich zwischen den Dämmplatten Fugen $> 5 \text{ mm}$ befinden und/oder das Dach mechanisch befestigt wurde, muss eine Korrekturrechnung nach DIN EN ISO 6946 Anhang D2 und D3 erfolgen. Für Umkehrdächer existieren Korrekturverfahren zur Kompensation der vom Regen abgeleiteten Wärmemenge.

Gefälledächer können nicht mit dem vorgenannten Verfahren berechnet werden, da der Wärmeverlust an den dünnen Platten überproportional groß ist. Ein pultförmig ausgebildetes Gefälledach verdeutlicht den Effekt:

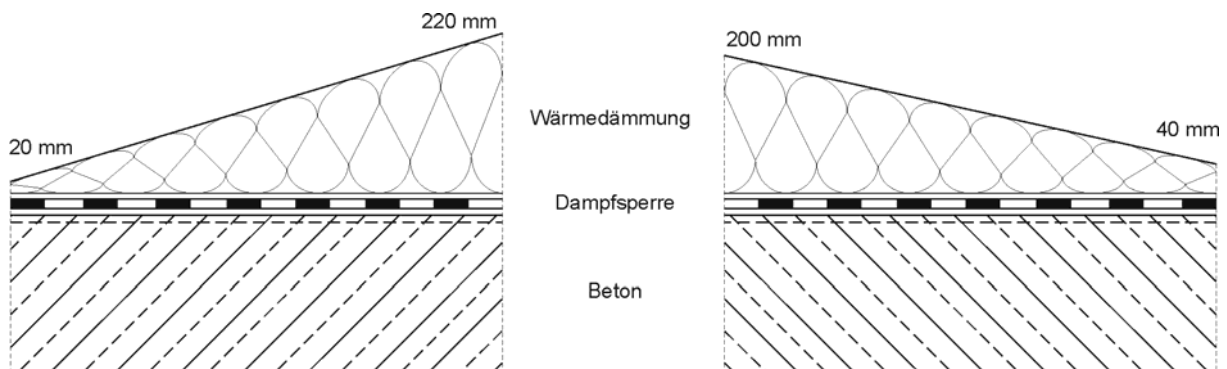


Abbildung 2: Gefälledämmung

Dach links: Anfangsdicke = 20 mm, Enddicke = 220 mm -> mittlere Dicke = 120 mm

Dach rechts: Anfangsdicke = 40 mm, Enddicke = 200 mm -> mittlere Dicke = 120 mm

Beide Dächer besitzen die gleiche mittlere Dämmstoffdicke und es befindet sich auf beiden Dächern auch dieselbe Menge Dämmstoff. Dennoch dämmt das Dach links schlechter als das Dach rechts, da es an der dünnsten Stelle mit 20 mm Dämmung nur halb so gut (20 mm \leftrightarrow 40 mm) und an der dicksten nur um 10 % besser dämmt (220 mm \leftrightarrow 200 mm).

Zur Berechnung von Gefälledämmdächern sollten Sie auf jeden Fall die Hilfe von Experten in Anspruch nehmen.

U-Wert-Berechnung Sparrendach

Ein mit Dachziegeln gedecktes Steildach unterscheidet sich in 2 wesentlichen Punkten vom Warmdach. Zum einen existieren unterschiedliche Schichtenfolgen innerhalb des Bauteils (Sparren <-> Gefach) und zum anderen befindet sich eine Belüftungsebene im Bauteil.

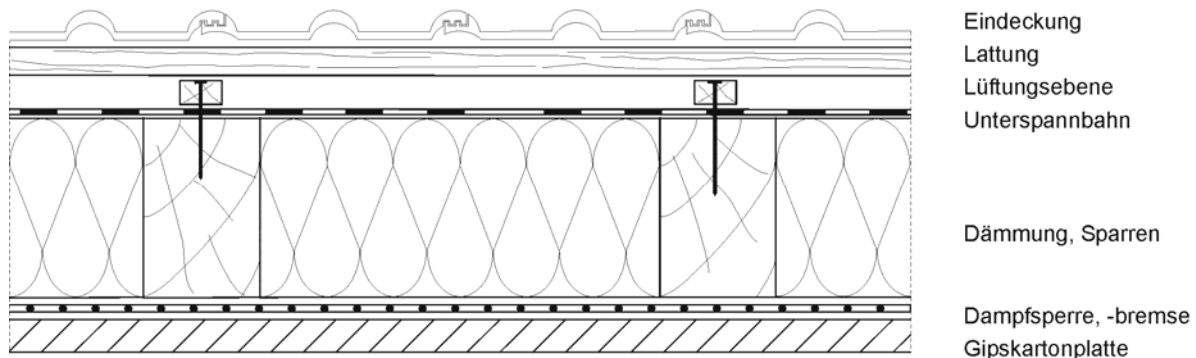


Abbildung 3: Sparrendach

Da die Belüftungsebene von Außenluft durchströmt wird, ist die Temperatur unterhalb und oberhalb der Eindeckung identisch. Ohne Temperaturgefälle können Baustoffe jedoch nicht dämmen. Der U-Wert berechnet sich folglich nur aus den Schichten Gipskartonplatte bis Unterspannbahn.

Der eigentlich interessante Aspekt des Sparrendachs ist die Aufteilung des Wärmestromes zwischen Sparren und Gefach. Könnte man früher den Wärmestrom proportional der Flächenanteile auf Sparren und Gefach verteilen, so ist dies seit Einführung der DIN EN ISO 6946 im Rahmen der EnEV nicht mehr möglich. Hintergrund: Die Wärmeenergie entweicht nicht nur auf direktem Wege von innen nach außen. Ein Teil der Wärmeenergie im Gefach nimmt die „Abkürzung“ über den Sparren, so dass der Sparren überproportional stark in die Berechnung eingeht. Unglücklicherweise ist selbst das vereinfachte Rechenverfahren nach DIN EN ISO 6946 noch recht kompliziert, da hierbei der Wärmedurchgang sowohl senkrecht nach außen als auch quer dazu ermittelt und die Zwischenergebnisse aufwendig verrechnet werden.

Eine Musterberechnung soll das Problem verdeutlichen.

1. Schritt: Wärmedurchlasswiderstand Gefach

$$R_{\text{Gefach}} = R_{\text{si}} + R_{\text{Gipskarton}} + R_{\text{Dampfbremse}} + R_{\text{Dämmung}} + R_{\text{Unterspannbahn}} + R_{\text{sa}}$$

$$\begin{aligned} d_{\text{Gipskartonplatte}} &= 0,0125 \text{ m} & \lambda_{\text{Gipskarton}} &= 0,25 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 3.4)} \\ d_{\text{Dampfbremse}} &= 0,0002 \text{ m} & \lambda_{\text{Polyethylen}} &= 0,35 \text{ (DIN 4108-4 Feb. 2002)} \\ d_{\text{Dämmung}} &= 0,18 \text{ m} & \lambda_{\text{Mifa 040}} &= 0,04 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 5.6)} \\ d_{\text{Unterspannung}} &= 0,0004 \text{ m} & \lambda_{\text{Bitumen}} &= 0,17 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 7.2.2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{Gefach}} &= R_{\text{si}} + (d_{\text{GKP}} / \lambda_{\text{GKP}}) + (d_{\text{Db}} / \lambda_{\text{Db}}) + (d_{\text{Mifa}} / \lambda_{\text{Mifa}}) + (d_{\text{Usp}} / \lambda_{\text{Usp}}) + R_{\text{sa}} \\ &= 0,1 + (0,125 / 0,25) + (0,0002 / 0,35) + (0,18 / 0,04) + (0,0004 / 0,17) + 0,04 \\ &= 0,1 + 0,05 + 0,0006 + 4,5 + 0,0024 + 0,04 \\ &= 4,693 \text{ [m}^2 \text{ K / W]} \end{aligned}$$

$$U_{\text{Gefach}} = 1 / 4,693 = 0,213 \text{ [W / m}^2 \text{K]}$$

2. Schritt: Wärmedurchlasswiderstand Sparren

$$R_{\text{Sparren}} = R_{\text{si}} + R_{\text{Gipskarton}} + R_{\text{Dampfbremse}} + R_{\text{Sparren}} + R_{\text{Unterspannbahn}} + R_{\text{sa}}$$

$$\begin{array}{ll} d_{\text{Gipskartonplatte}} = 0,0125 \text{ m} & \lambda_{\text{Gipskarton}} = 0,25 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 3.4)} \\ d_{\text{Dampfbremse}} = 0,0002 \text{ m} & \lambda_{\text{Polyethylen}} = 0,35 \text{ (DIN 4108-4 Feb. 2002)} \\ d_{\text{Sparren}} = 0,18 \text{ m} & \lambda_{\text{Fichte}} = 0,13 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 6.1.1)} \\ d_{\text{Unterspannung}} = 0,0004 \text{ m} & \lambda_{\text{Bitumen}} = 0,17 \text{ (DIN 4108-4 Tab. 7.2.2)} \end{array}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{Sparren}} &= R_{\text{si}} + (d_{\text{GKP}} / \lambda_{\text{GKP}}) + (d_{\text{Db}} / \lambda_{\text{Db}}) + (d_{\text{Fichte}} / \lambda_{\text{Fichte}}) + (d_{\text{Usp}} / \lambda_{\text{Usp}}) + R_{\text{sa}} \\ &= 0,1 + (0,125 / 0,25) + (0,0002 / 0,35) + (0,18 / 0,13) + (0,0004 / 0,17) + 0,04 \\ &= 0,1 + 0,05 + 0,0006 + 1,3846 + 0,0024 + 0,04 \\ &= \mathbf{1,578} \text{ [m}^2 \text{ K / W]} \end{aligned}$$

$$U_{\text{Sparren}} = 1 / 1,578 = \mathbf{0,634} \text{ [W / m}^2\text{K]}$$

3. Schritt: Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand errechnen

Bei einer Sparrenbreite von 10 cm und einer Gefachbreite von 70 cm müsste sich im vereinfachten Verfahren ein U-Wert von

$$U_{\text{gesamt}} = [(0,70\text{m} * 0,213) + (0,10\text{m} * 0,634)] / 0,8\text{m} = \mathbf{0,265}$$

ergeben. Die Berechnung nach DIN EN ISO 6946 ergibt jedoch nur einen U-Wert von **0,277**, d.h. die thermische Querleitung verschlechtert das Ergebnis um ca. 5%.

Doch Vorsicht: der Unterschied kann deutlich größer werden, insbesondere wenn die relativen Unterschiede im U-Wert größer sind.

Feuchtenachweis

Sobald ein Handwerker ein Bauteil wärmetechnisch verändert, ist er verpflichtet die U-Wert-Vorgaben der EnEV einzuhalten. Das ist sicherlich bekannt. Weit weniger bekannt ist die Verpflichtung ein trockenes Bauteil zu erstellen. Sie resultiert aus der Musterbauordnung des Bundes (§3, Abs. 1: Anlagen sind so zu errichten ... dass ... Leben, Gesundheit...nicht gefährdet werden) und den Landesbauordnungen (u.a. rechtliche Verankerung div. Normen). Anforderungen, die spätestens dann verletzt werden, wenn das Bauteil anfängt zu schimmeln!

Der Nachweis zur Schimmelfreiheit gelingt indirekt über den Nachweis ein trockenes Bauteil zu erstellen. Dachhandwerkern bieten sich hierfür 2 Verfahren an:

1. Vereinfachter Nachweis entsp. den Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks, siehe Merkblatt „Wärmeschutz bei Dächern“, Kapitel 3.
2. Tauwasserberechnung nach DIN 4108 Teil 3 (Glaserverfahren)

Das für beide Verfahren nötige Grundwissen möchte ich nachfolgend vermitteln.

Feuchtwanderung

Abgesehen von Einregenstellen und Rohrbruch kennt die Bauphysik 2 Formen des Feuchteintrages in Bauteile: Diffusion und Konvektion. Diffusion ist die Wanderung von Gasen, hier feuchte Luft, durch feste Stoffe. Konvektion ist Luftströmung, hier angereichert mit Wasserdampf. Beispielhaft ausgedrückt: wenn die Wassermoleküle sich durch die Gipskartonplatte zwängen ist es Diffusion; strömt die feuchte Luft durch Fugen in der Nut- und Federschalung ist es Konvektion. Konvektion hat hierbei die Eigenschaft ein vieltausendfaches an Feuchte in das Bauteil zu transportieren als es durch Diffusion möglich ist. Daher ist eine perfekte Luftdichtheitsschicht die wichtigste Forderung im Feuchteschutz.

Die **Luftdichtheitsschicht** kann durch raumseitigen Putz auf Mauerwerk, Gipskarton- oder Holzwerkstoffplatten mit dauerhaft dichter Verfugung o.ä. ausgebildet werden. Kann die Dichtheit der Fugen nicht dauerhaft sichergestellt werden, empfiehlt sich eine Kunststoffolie o.vgl. zwischen raumseitigen Platten und der Dämmstoffebene.

Luftdichtheit kann nicht berechnet werden, sie ist durch sorgfältige Planung und fachgerechte Montage sicherzustellen. Die Prüfung erfolgt mittels Blower-Door-Test.

Zusätzlich zur Luftdichtigkeitsschicht raumseits der Dämmung kann auch eine **Winddichtigkeitsschicht** eingebaut werden. Diese befindet sich außerhalb der Dämmebene und soll das Einströmen kalter Außenluft in die Dämmung verhindern. Besonders nützlich ist die Winddichtigkeitsschicht bei belüfteten Konstruktionen mit Faserdämmstoffen. Die typische Winddichtigkeitsschicht besteht aus einer nahtverklebten Unterspannbahn.

Neben eindringender Feuchte, typ. im Keller, und Wärmebrücken ist eine mangelhafte Luftdichtheitsschicht der Hauptschimmelverursacher. Schäden die auf **Diffusion** zurückzuführen sind, können als Seltenheit bewertet werden. Manch ein Experte ist sogar der Meinung, dass Feuchteschäden durch Diffusion an belüfteten Steildächern in der Praxis nicht auftreten würden.

Dennoch ist Diffusion im Feuchtenachweis ein Pflichtkapitel. Und im Gegensatz zur Luftdichtheit kann Diffusion auch berechnet werden.

Feuchtenachweis nach DIN 4108 Teil 3 (Glaserverfahren)

Das Glaserverfahren ist ein bilanzierendes Verfahren. Hierbei wird ermittelt wie viel Feuchte in der Tauperiode (= Winter) in das Bauteil eindringt und wie viel Feuchte in der Verdunstungsperiode (= Sommer) verdunsten kann. Ist die Verdunstungsmenge größer als die Tauwassermenge, so trocknet das Bauteil im Sommer aus und es kann sich über die Jahre kein Tauwasser ansammeln. Zusätzlich darf die eindiffundierte Feuchtemenge bestimmte Obergrenzen nicht übersteigen, siehe Tabelle 2.

| | |
|--|--------------------------|
| Holz | 5 % Massengehalt |
| Holzwerkstoffe | 3 % Massengehalt |
| bei Tauwasserabfall an kapillar nicht wasseraufnahmefähiger Schicht: | 0.50 kg / m ² |
| ansonsten: | 1.00 kg / m ² |

Tabelle 2: Obergrenze Tauwasser je Tauperiode

Eine Feuchtebilanz muss natürlich nur erstellt werden, wenn auch Feuchte in Form von Tauwasser ausfällt. Wie aber kommt es dazu?

Luft kann nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen. Diese Wasseraufnahmekapazität ist abhängig von der Lufttemperatur. Warme Luft kann mehr, kalte Luft weniger Feuchtigkeit aufnehmen. Fällt die Lufttemperatur, so sinkt die Fähigkeit den Wasserdampf in der Luft zu halten. Wird die kritische Temperatur unterschritten, gibt die Luft den Wasserdampf in Form flüssigen Wassers ab. Man spricht von Tauwasserausfall.

Für die feuchtetechnische Untersuchung müssen eine ganze Reihe von Berechnungen durchgeführt werden. Zu Beginn erstellt man ein Glaserdiagramm. Gehen Sie hierzu wie folgt vor:

- 1.) Ermittlung der Oberflächentemperaturen aller Bauteilschichten.
Hinweis: der Temperaturabfall ist proportional dem Wärmewiderstand.
Raumtemperatur = 20 °C, Außentemperatur = -10 °C.
- 2.) Berechnung des temperaturabhängigen Dampfsättigungsdruckes je Schicht
- 3.) Berechnung des Dampfteildrucks je Schicht
- 4.) sd-Werte der einzelnen Bauteilschichten berechnen ($sd = \mu \cdot \text{Dicke}$).
 μ ist die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl. Sie beschreibt um wieviel mal mehr ein Stoff die Wasserdampfdiffusion behindert als Luft. Folglich ist $\mu_{\text{Luft}} = 1$. Die μ -Werte entnimmt man DIN 4108 Teil 4 bzw. dem Produktdatenblatt.
- 5.) Dampfsättigungsdruck und Dampfteildruck über den sd-Werten auftragen.

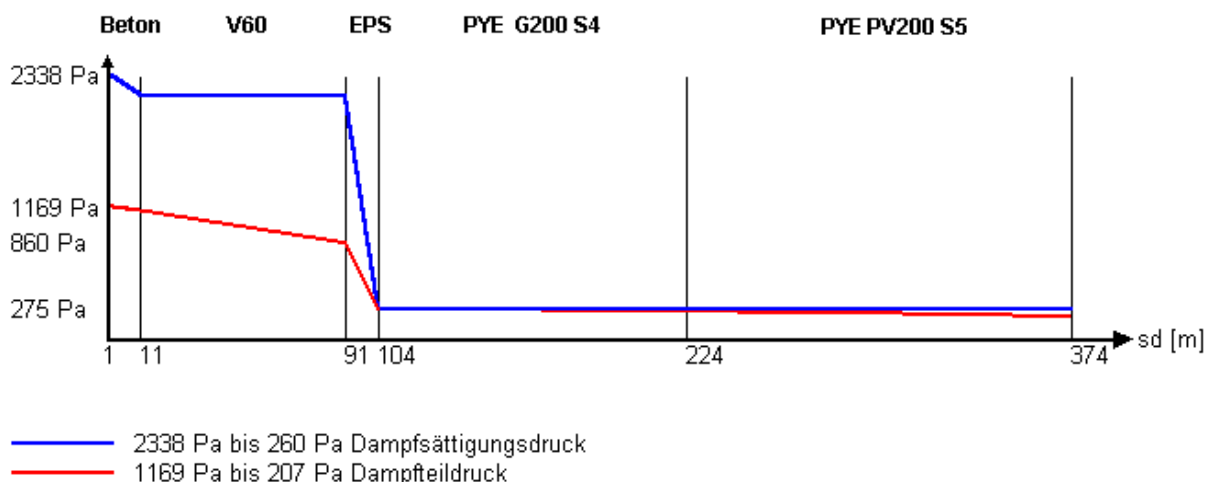


Abbildung 4: Glaserdiagramm Warmdach

Verläuft die blaue Dampfsättigungsdruckkurve stets oberhalb der roten Dampfteildruckkurve, ist die Konstruktion frei von Tauwasser.

Sinkt der Dampfsättigungsdruck (blau) unter den Dampfteildruck (rot) fällt Tauwasser aus. Dabei zieht die blaue Kurve die rote nach unten, da kein höherer Dampfteildruck als der Sättigungsdruck möglich ist. Die Differenz rot zu blau „produziert“ letztendlich das Tauwasser. Im oben dargestellten Glaserdiagramm ist dies im Bereich der EPS-Dämmung (sd 91 -> 104) der Fall.

Auf die explizite Berechnung der sd-Werte, der Dampfdrücke und der maximalen Tauwassermenge habe ich aufgrund der komplexen Formeln bewusst verzichtet. Hierfür existieren EDV-Programme wie MF Bauphysik. Markus Friedrich Datentechnik stellt MF Bauphysik allen Anwendern von MF Dach, MF DachDesigner, MF Flachdach, MF Steildach und der Fachregel-CD des ZVDH kostenlos zur Verfügung. Auch die Meisterschüler an den Dachdecker- und Spenglerschulen in Augsburg, Berlin, Bielefeld, Dortmund, Eslohe, Großräschen, Lübeck, München, Münster, St. Andreasberg und Waldkirchen können MF Bauphysik kostenlos nutzen.

