

Austrocknung nichtbelüfteter Flachdächer

Untersuchungen durchgeführt im Auftrage des
Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

von

Dr.-Ing. R. JENISCH

und

Prof. Dr.-Ing. W. SCHÜLE

Institut für Bauphysik Stuttgart

Das nichtbelüftete Flachdach (auch „Warmdach“ genannt) ist ein einschaliges Dach, bei dem die zum Dachaufbau gehörenden Schichten (Dachdecke, Dampfsperre, Wärmedämmschicht und Dachhaut) unmittelbar aufeinander liegen. Eine Voraussetzung für die Erhaltung eines ausreichenden Wärmeschutzes des Daches ist, daß die Wärmedämmschicht den der Bemessung zugrunde gelegten Wärmedurchlaßwiderstand aufweist. Dies trifft aber dann nicht zu, wenn der Dämmstoff einen zu hohen Wassergehalt besitzt.

Beim Aufbau eines Flachdaches kann der Wärmedämmstoff eine bestimmte, möglicherweise unzulässig große Wassermenge besitzen, die während der Lagerung oder infolge ungünstiger Witterung beim Verlegen aufgenommen wurde. Die Dachdecke, in der Regel eine Betonplatte oder ähnl., wird beim Verlegen der Dampfsperre und der Wärmedämmschicht im allgemeinen noch nicht soweit ausgetrocknet sein, daß sie ihren praktischen Wassergehalt erreicht hat. Ist die verwendete Dampfsperre, wenn auch in geringem Maße, dampfdurchlässig, so kann aus der Tragdecke Wasserdampf in den Dämmstoff gelangen. Ist die Dampfsperre aber absolut dampfdicht, so kann bei Annahme einer völlig dampfdichten Dachhaut die Wärmedämmschicht — sofern sie feucht war — nicht austrocknen. Zwar wären ideale Verhältnisse dann gegeben, wenn der Dämmstoff praktisch trocken eingebaut würde und Dachhaut und Dampfsperre völlig dampfdicht wären. Dies ist aber vielfach nicht der Fall. Enthält der Dämmstoff Wasser oder dringt Wasser nach einer Beschädigung der Dachhaut in den Dämmstoff ein, dann erweist sich eine völlig dampfdichte Dampfsperre als nachteilig. Die Sperre verhindert ein Verdampfen von Wasser in die Räume unter dem Dach.

Um Klarheit über die Feuchtigkeitsbewegungen im nichtbelüfteten Flachdach vor allem im Hinblick auf die Austrocknung zu gewinnen, wurden rechnerische Untersuchungen an Flachdächern durchgeführt, um den Einfluß der Dampfdurchlässigkeit der Dampfsperre bzw. des Wärmedämmstoffes sowie der raum- und außenklimatischen Verhältnisse auf die Austrocknung der Dachdecke und des Wärmedämmstoffes zu zeigen. Diese Untersuchung stellt eine Erweiterung und Ergänzung der früheren Untersuchung dar¹⁾. Bei den früheren Untersuchungen war angenommen worden, daß die Dachdecke, eine Betonplatte, schon auf ihren praktischen Wassergehalt ausgetrocknet sei und demnach die Feuchtigkeitsbewegung im Flachdach nur aufgrund ihres Diffusionswiderstandes beeinflusse, ihren Wassergehalt dabei aber nicht ändere. Die vorliegenden neuen Untersuchungen gehen davon aus, daß die Dachdecke noch einen erhöhten Wassergehalt aufweist, der sich zeitlich ändert und so die Feuchtigkeitsbewegung im Flachdach entscheidend mit beeinflusst.

1. Annahmen für die Untersuchung

Den durchgeführten Untersuchungen wurden die folgenden baulichen und klimatischen Annahmen zugrunde gelegt.

1.1 Bauliche Annahmen

Die Untersuchung wurde an Flachdächern durchgeführt (Bild 1), deren Wärmedurchlaßwiderstand $1/\Lambda$ mit $1,25 \text{ m}^2 \text{ h K/kcal}$ der Mindestwert nach DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ entsprach. Der Wärmedurch-

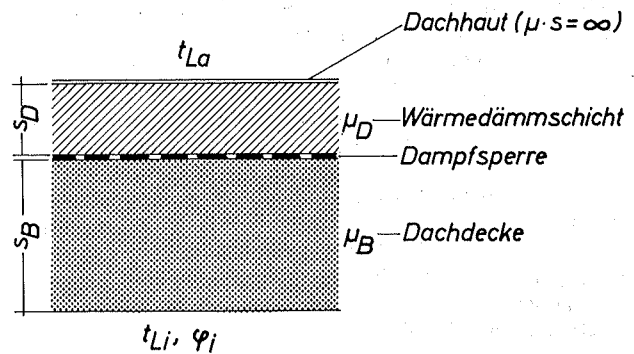


Bild 1: Aufbau der untersuchten Flachdächer

laßwiderstand der Wärmedämmschicht wurde mit rund $1,15 \text{ m}^2 \text{ h K/kcal}$, der der Dachdecke (Stahlbetonplatten-decke) mit rund $0,1 \text{ m}^2 \text{ h K/kcal}$ angenommen. Unter Annahme einer Wärmeleitfähigkeit λ des Wärmedämmstoffes von $0,035 \text{ kcal/(m h K)}$ (z. B. Polystyrol-Schaumstoff) ist die Dämmstoffdicke rund 40 mm.

Die Dicke der Dachdecke aus Stahlbeton wurde mit 140 bzw. 175 mm angenommen. Die Diffusionswiderstandszahl μ des Betons der Dachdecke wurde zu 50, der volumetrische Wassergehalt des Betons zu 3 % über dem praktischen Wassergehalt (rund 5 %) angenommen.

Die Wärmedämmschicht wurde zusammen mit der Dampfsperre bezüglich ihrer Dampfdurchlässigkeit durch die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $\mu_D \cdot s_D$ (in m) gekennzeichnet. Dieser Wert kann als die Summe der äquivalenten Luftschichtdicken des Dämmstoffes und der Dampfsperre angesehen werden.

Die Dachhaut wurde als völlig dampfdicht angenommen.

1.2 Klimatische Annahmen

Die Kondensations- und Austrocknungsverhältnisse infolge von Wasserdampfdiffusion beim Flachdach werden durch die klimatischen Verhältnisse zu beiden Seiten des Daches wesentlich mitbestimmt. Im Raum unter dem Dach sind dies die Lufttemperatur und die rel. Luftfeuchte, die den Dampfdruck und die Taupunkttemperatur der Raumluft bestimmen. Die Raumlufttemperatur wurde mit $20 \text{ }^\circ\text{C}$, die rel. Luftfeuchte mit 50 % bei der Untersuchung angenommen. Diese Werte treffen für Wohn- und Büroräume mit genügender Sicherheit zu.

Unter der Annahme einer völlig dampfdichten Dachhaut, spielt die Feuchte der Außenluft für das Ergebnis der Untersuchung keine Rolle. Dagegen hat die Temperatur der Dachhaut einen wesentlichen Einfluß. Diese wird durch die Außenlufttemperatur, die Sonneneinstrahlung zum Dach, dessen Wärmedämmung, die Absorptionszahl der Dachoberfläche, die Raumlufttemperatur und die Wärmeübergangskoeffizienten auf der Innen- und Aussenseite des Daches bestimmt.

Die außenklimatischen Daten (Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung) hängen vom Standort des betreffenden Gebäudes ab. Um einen möglichst breiten außenklimatischen Bereich zu erfassen, wurden zwei Standorte mit extremen Außentemperaturverhältnissen gewählt. Zur Kennzeichnung der Temperaturverhältnisse des Standortes wurden die Jahresmitteltemperatur und die Monatsmittelwerte der Außentemperaturen verwendet. Die beiden gewählten Standorte waren Karlsruhe, mit einer Jahresmitteltemperatur von $9,9 \text{ }^\circ\text{C}$ und Clausthal-Zellerfeld mit $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Monatsmittelwerte der Außenluft-

1) SCHULE, W. u. R. JENISCH: Kondensations- und Austrocknungsverhältnisse bei nichtbelüfteten Flachdächern. Berichte aus der Bauforschung, Heft 80, S. 39.

temperatur der beiden Orte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Oberflächentemperatur der Dachhaut wurde unter Verwendung dieser Werte errechnet. Bei Sonneneinstrahlung zum Dach wurde dessen Oberflächentemperatur unter Verwendung der Sonnenlufttemperatur ermittelt¹⁾. Zur Berechnung der Sonnenlufttemperatur und damit der Oberflächentemperatur der Dachhaut bei Sonneneinstrahlung zum Dach an den beiden Standorten wurden die Monatsmittelwerte der Globalstrahlung von Hamburg (einem Standort mit verhältnismäßig wenig günstigen Sonnenstrahlungsverhältnissen) herangezogen, da von den beiden anderen Standorten Monatsmittelwerte der Globalstrahlung nicht vorlagen.

Tabelle 1: Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur in Karlsruhe und in Clausthal-Zellerfeld sowie Monatsmittelwerte der Globalstrahlung in Hamburg

Monat	Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur in		Monatsmittelwerte der Globalstrahlung in Hamburg
	Karlsruhe	Clausthal-Zellerfeld	
	°C	°C	kcal/m ² h
Januar	1,0	-2,0	21,5
Februar	2,4	-1,5	17,1
März	5,6	0,9	78,2
April	9,6	4,6	128,0
Mai	14,3	9,8	165,5
Juni	17,4	12,6	186,0
Juli	19,1	14,3	164,0
August	18,1	13,5	136,5
September	14,5	10,7	104,0
Oktober	9,6	6,2	54,0
November	5,0	1,7	24,9
Dezember	2,2	-1,1	14,4
Jahresmittelwert	9,9	5,8	91,2

2. Mathematische Behandlung des Problems²⁾

Der Dampfdruckverlauf in einem Bauteil wird bestimmt von den Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen zu beiden Seiten des Bauteils und vom Wassergehalt der Baustoffe. Ist der Wassergehalt der Baustoffe höher als die Gleichgewichtsfeuchtigkeit, so ist der Dampfdruck im Bauteil an dieser Stelle gleich dem Sättigungsdruck³⁾. Solange dies der Fall ist, kann eine Austrocknung des Baustoffes erfolgen. Die Austrocknung ist beendet, wenn die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist. Der Dampfdruck sinkt dann unter den Wert des Sättigungsdruckes und gleicht sich dem Dampfdruckverlauf beim Diffusionsvorgang ohne Feuchtigkeitsquellen im Bauteil an.

Bei der Untersuchung des Austrocknungsvorganges im Flachdach wird angenommen, daß nur der Beton einen Wassergehalt besitzt, der über seiner Gleichgewichtsfeuchte liegt, während der Dämmstoff praktisch trocken ist. Im Flachdach ist dann unter Winterverhältnissen ein Dampfdruckverlauf entsprechend Bild 2 zu erwarten. Wenn die Stahlbetonplatte teilweise noch feucht ist, wird die Feuchtigkeit teils zum Raum unterhalb des Daches, teils zur Dämmschicht über der Stahlbetonplatte diffundiert (Winterverhältnisse). Während das in den Raum diffundierte Wasser durch Lüftung an die Umgebung abgeführt wird, kann das in den Dämmstoff eindiffundierte Wasser wegen der unendlich dichten Dachhaut nicht ans Freie abgegeben werden und sammelt sich im Dämmstoff an. Bei höheren Außentemperaturen (Sommerverhältnis-

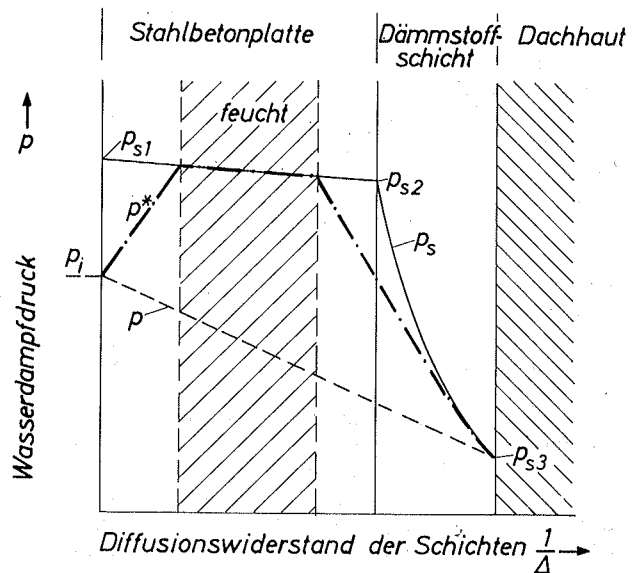


Bild 2: Sättigungsdruck- und Dampfdruckverlauf in einem Flachdach mit unendlich dichter Dachhaut unter Winterverhältnissen.

p_s : Sättigungsdruckverlauf

p : Dampfdruckverlauf, wenn alle Baustoffschichten trocken sind

p^* : Dampfdruckverlauf im Flachdach, wenn ein Teil der Stahlbetonplatte feucht ist

se) kehrt sich die Richtung des Diffusionsstromes in der Dämmschicht um und Wasserdampf diffundiert wieder zur Betonplatte zurück (s. Bild 3).

2.1 Verlauf des Sättigungsdruckes in der Dachdecke

Unter stationären Winterverhältnissen stellt sich in einem Flachdach ein Temperaturverlauf nach Bild 4 ein. An der Stelle x in der Betonplatte herrscht die Temperatur

$$t(x) = A - Bx \text{ für } 0 \leq x \leq s_1 \quad (1)$$

Hierbei ist

$$A = t_1 - \frac{k}{\alpha_1} (t_1 - t_a)$$

$$B = \frac{t_1 - t_2}{s_1}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

s_1 und s_2 sind die Dicken der Stahlbetonplatte und der Wärmedämmschicht, λ_1 und λ_2 ihre Wärmeleitfähigkeiten.

Für die Berechnung des Dampfdruckverlaufes in der Stahlbetonplatte wird die folgende Dampfdruckgleichung verwendet, die die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdruckes wiedergibt⁴⁾:

$$p_s = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \quad (2)$$

a_1 , a_2 und a_3 sind Konstanten mit folgenden Zahlenwerten:

1) Siehe Seite 21

2) Unter Beteiligung von Herrn St. Egi.

3) GLASER, H.: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. Kältetechnik 11 (1959), S. 345-349.

4) GLASER, H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958), S. 358-364 u. 386-390.

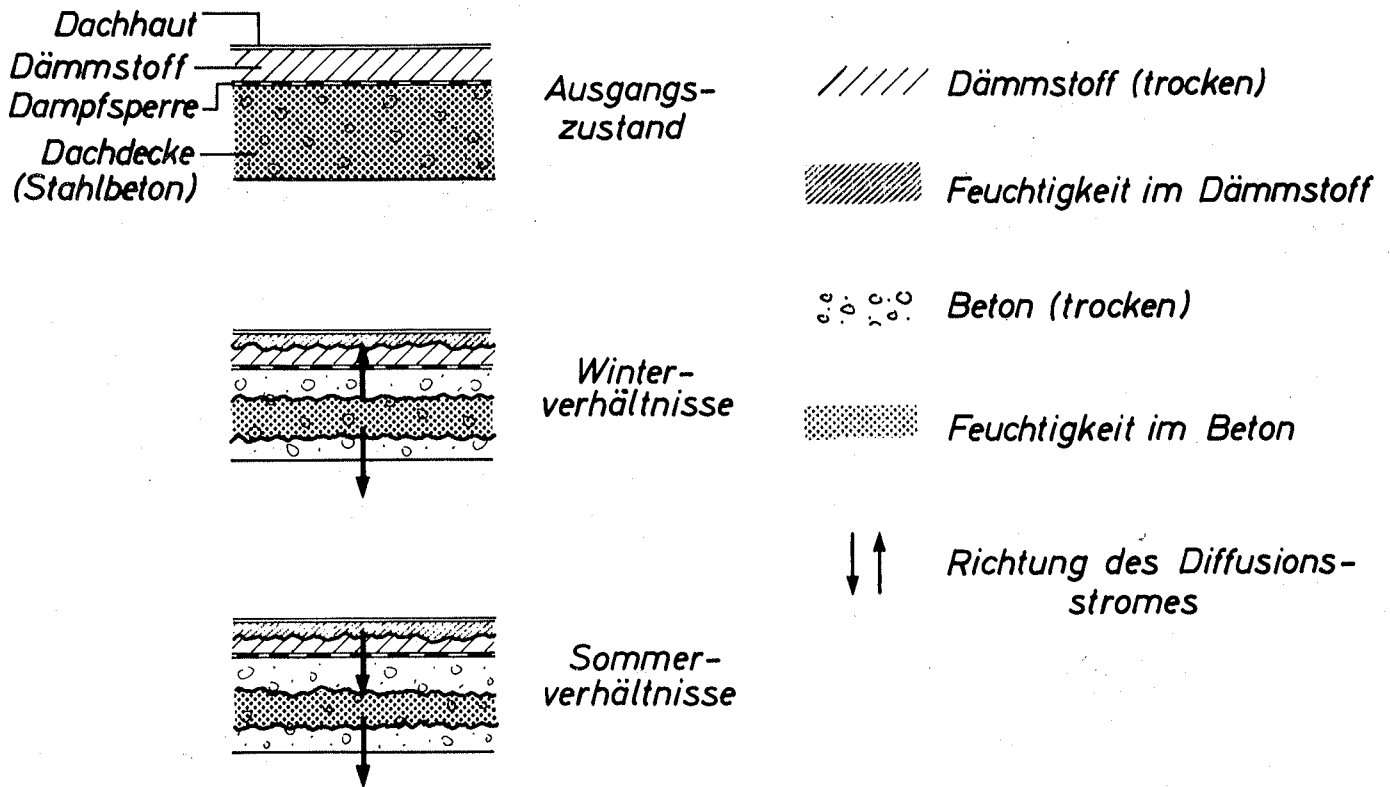


Bild 3: Feuchtigkeitsbewegung im Flachdach (schematisch).

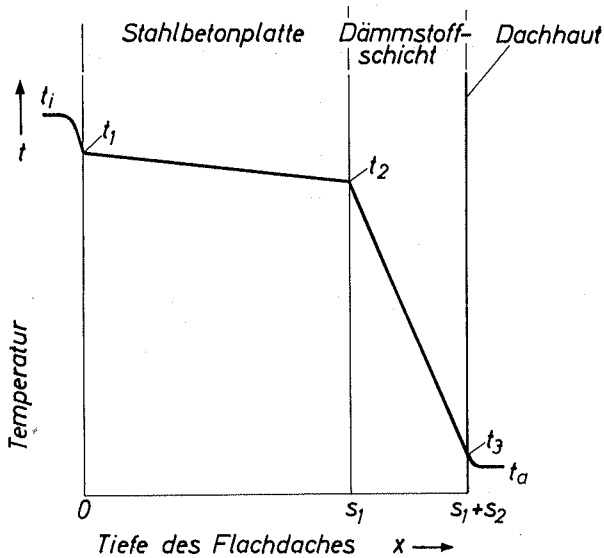


Bild 4: Temperaturverlauf in dem untersuchten Flachdach (schematisch)

Für $t \geq 0$ ist $a_1 = 63,43 \text{ kp/m}^2$
 $a_2 = 3,65 \text{ kp/(m}^2 \text{ K)}$,
 $a_3 = 0,2515 \text{ kp/(m}^2 \text{ K}^2)$;
 für $t < 0$ ist $a_1 = 61,6 \text{ kp/m}^2$
 $a_2 = 4,51 \text{ kp/(m}^2 \text{ K)}$,
 $a_3 = 0,0994 \text{ kp/(m}^2 \text{ K}^2)$.

Der Sättigungsdruck in Abhängigkeit von der Tiefe der Stahlbetonplatte ergibt sich zu

$$p_s = H_1 + H_2 x + H_3 x^2 \quad (3)$$

Dabei wurde zur Abkürzung gesetzt:

$$H_1 = a_1 + a_2 A + a_3 A^2$$

$$H_2 = -(a_2 B + 2 a_3 A B)$$

$$H_3 = a_3 B^2$$

2.2 Austrocknung der Dachdecke zum Raum

Die Dampfdruckverhältnisse im Flachdach bei der Austrocknung der Stahlbetonplatte zum Raum unterhalb des Daches werden in Bild 5 gezeigt.

Der Diffusionsstrom in positiver Richtung der X-Achse wird als positiv angenommen. Die Austrocknung der Stahlbetonplatte erfolgt durch den Diffusionsstrom (Diffusionsstromdichte g_1) in Richtung zum Raum und durch einen Diffusionsstrom (Diffusionsstromdichte g_2) ins Innere der Stahlbetonplatte. Es ist

$$g_1 = -\frac{1}{\mu_1 N} \cdot \frac{p_s(x) - p_i}{x} \quad (4)$$

und

$$g_2 = -\frac{1}{\mu_1 N} \cdot \left(\frac{dp_s}{dx} \right)_x \quad (5)$$

μ_1 und μ_2 sind die Diffusionswiderstandszahlen des Betons und der Wärmedämmschicht.

$N = 0,15 \cdot 10^6 \text{ m h (kp/m}^2\text{)/kg}$ ist der Kehrwert des Wasserdampfleitkoeffizienten der Luft bei $+10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Diffusionsstromdichte g ergibt sich aus der zeitlichen Änderung des flächenbezogenen Wassergehaltes G in der Ebene x während der Zeit z .

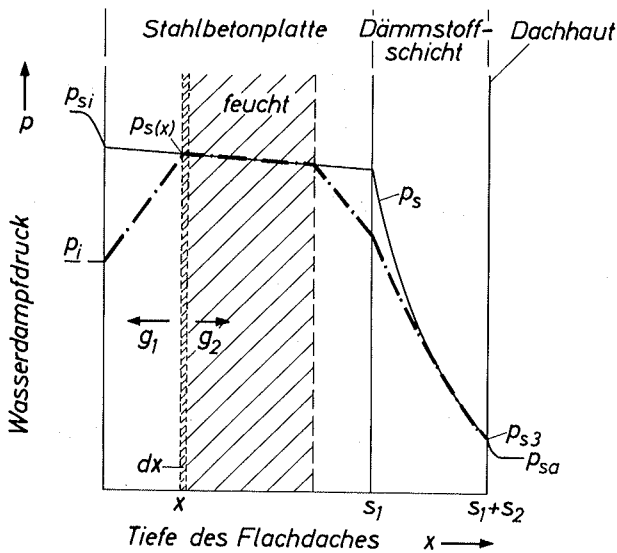


Bild 5: Dampfdruckverhältnisse in einem Flachdach bei der Austrocknung der Stahlbetondecke zum Raum.

- x : Grenzfläche zwischen trockenem und feuchtem Bereich des Betons
 $p_s(x)$: Sättigungsdampfdruck in der Grenzfläche x
 g_1 : Diffusionsstrom aus der Grenzfläche zum Raum
 g_2 : Diffusionsstrom aus der Grenzfläche in die Stahlbetondecke.

Somit ist

$$g = \frac{dG}{dz} \quad (6)$$

Hieraus ergibt sich

$$\frac{dG}{dz} = \frac{dG}{dx} \cdot \frac{dx}{dz} = K \cdot \frac{dx}{dz}$$

$K = \frac{dG}{dx}$ ist die als konstant angenommene Wassermenge, um die das Volumen $F \cdot dx$ austrocknet. Bei einer Abnahme des volumetrischen Wassergehaltes des Betons um 3 % ist $K = 30 \text{ kg/m}^3$ (s. Abschnitt 1.1).

Die Austrocknung des Betons berechnet sich aus den beiden Diffusionsströmen

$$-\frac{dG}{dz} = g_1 - g_2 \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen [4], [5] und [6] ergibt sich

$$-K \mu_1 N \frac{dx}{dz} = \frac{p_i - p_s(x)}{x} + \left(\frac{dp_s}{dx} \right)_x \quad (8)$$

Nach Gleichung [3] ist

$$p_s = H_1 + H_2 x + H_3 x^2$$

und

$$\frac{dp_s}{dx} = H_2 + 2 H_3 x$$

Eingesetzt in Gleichung [8] ergibt dies die Differentialgleichung

$$-K \mu_1 N x \frac{dx}{dz} = p_i - H_1 + H_3 x^2 \quad (9)$$

Das Integral der Gleichung [9] ergibt die Verlagerung der Grenzfläche von x_1 nach x_2 zwischen dem trockenen und feuchten Bereich des Betons durch den Austrocknungsvorgang im Zeitabschnitt $z_2 - z_1$

$$-\frac{1}{K \mu_1 N} \int_{z_1}^{z_2} dz = \int_{x_1}^{x_2} \frac{x}{p_i - H_1 + H_3 x^2} dx \quad (10)$$

Das Jahr wird in gleiche Zeitabschnitte $z_2 - z_1 = z$ eingeteilt (z. B. in Monate). Während des Zeitabschnittes z sei die Innen- und Außentemperatur konstant. Damit ist dann auch H_1 und H_3 für diese Zeit konstant.

Die Integration der Gleichung [10] führt zu folgender Lösung

$$-\frac{2 H_3}{K \mu_1 N} z = \ln \frac{p_i - H_1 + H_3 x_2^2}{p_i - H_1 + H_3 x_1^2} \quad (11)$$

oder

$$e^{-\frac{2 H_3}{K \mu_1 N} z} = \frac{p_i - H_1 + H_3 x_2^2}{p_i - H_1 + H_3 x_1^2} \quad (12)$$

Für $|x| < 0,045$ ist

$$e^{-x} \approx 1 - x \quad (13)$$

Um festzustellen, ob die Näherungsformel [13] verwendet werden darf, wurde der Betrag von $\frac{2 H_3}{K \mu_1 N} \cdot z$ abgeschätzt.

- Annahmen: $K = 30 \text{ kg/m}^3$ (Austrocknung um 3 %)
 $\mu_1 = 50$ (Beton)
 $z = 720 \text{ h}$ (1 Monat)
 $t_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t_a = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Abschätzung ergab einen Betrag von 0,032. Somit kann die Näherungsformel [13] verwendet werden. Mit Gleichung [12] ergibt sich

$$1 - \frac{2 H_3}{K \mu_1 N} \cdot z = \frac{p_i - H_1 + H_3 x_2^2}{p_i - H_1 + H_3 x_1^2} \quad (14)$$

Dies ergibt folgende Gleichung für x_2

$$x_2 = \sqrt{x_1^2 - \frac{2 z}{K \mu_1 N} (p_i - H_1 + H_3 x_1^2)} \quad (15)$$

Bei der Berechnung wird vorausgesetzt, daß zu Anfang die gesamte Stahlbetondecke feucht ist. Für $z_1 = 0$ wird somit $x_1 = 0$.

2.3 Austrocknung der Dachdecke zur Wärmedämmschicht

Die Dampfdruckverhältnisse im Flachdach bei der Austrocknung der Stahlbetondecke zur Wärmedämmschicht werden in Bild 6 gezeigt. Zur Vereinfachung der Berechnung wurde angenommen, daß der Dampfdruck im trockenen Bereich der Stahlbetondecke und in der

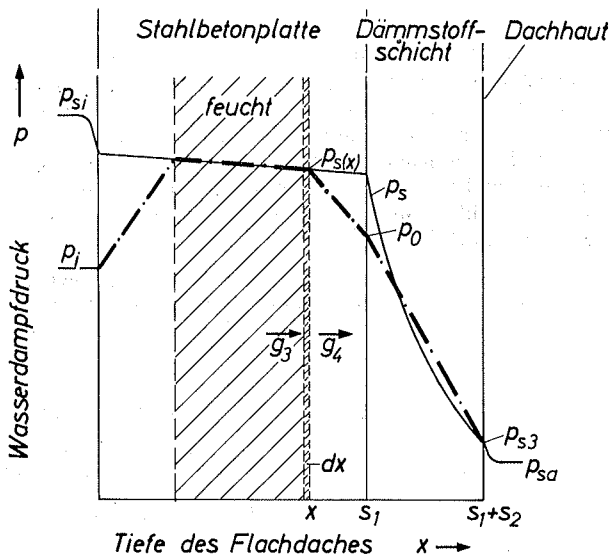


Bild 6: Dampfdruckverhältnisse in einem Flachdach bei der Austrocknung der Stahlbetondecke zur Wärmedämmschicht.

- x : Grenzfläche zwischen trockenem und feuchtem Bereich des Betons
 $p_s(x)$: Sättigungsdampfdruck in der Grenzfläche x
 g_3 : Diffusionsstrom aus der Stahlbetondecke zur Grenzfläche x
 g_4 : Diffusionsstrom aus der Grenzfläche zur Wärmedämmschicht.

Wärmedämmschicht linear zum Druck p_{s3} an der Dachhaut abfällt und nicht der Kurve des Sättigungsdampfdruckes in der Wärmedämmschicht folgt, wie es in Bild 2 dargestellt wurde. Um einen Einblick in die Austrocknungsverhältnisse zu bekommen, ist diese Vereinfachung zulässig.

Die Austrocknung der Stahlbetondecke erfolgt durch den Diffusionsstrom (Diffusionsstromdichte g_4) in Richtung zur Wärmedämmschicht. Dieser Vorgang wird verzögert durch den Diffusionsstrom (Diffusionsstromdichte g_3) aus der Stahlbetondecke in Richtung zur Grenzfläche.

Es ist

$$g_3 = -\frac{1}{\mu_1 N} \left(\frac{dp_s}{dx} \right)_x \quad (16)$$

und

$$g_4 = \frac{p_s(x) - p_o}{\mu_1 N (s_1 - x)} \quad (17)$$

Da die Diffusionsstromdichte g_4 sich beim Übergang aus der Stahlbetondecke in die Wärmedämmschicht nicht verändert, ergibt sich für den unbekannten Dampfdruck p_o in Gleichung [17] folgende Beziehung

$$\frac{p_s(x) - p_o}{\mu_1 N (s_1 - x)} = \frac{p_o - p_{s3}}{\mu_2 N s_2} \quad (18)$$

Hieraus ergibt sich

$$p_o = p_s(x) - \frac{\mu_1 (s_1 - x)}{\mu_1 (s_1 - x) + \mu_2 s_2} (p_s(x) - p_{s3}) \quad (19)$$

Die Austrocknung des Betons in Richtung zur Wärmedämmschicht an der Stelle x ist

$$-\frac{dG}{dz} = g_4 - g_3$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen [6], [16], [17] und [19] ergibt sich

$$-K \mu_1 N \frac{dx}{dz} = \frac{\mu_1 (s_1 - x)}{\mu_1 (s_1 - x) + \mu_2 s_2} (p_s(x) - p_{s3}) + \left(\frac{dp_s}{dx} \right)_x \quad (20)$$

Dies führt zur Differentialgleichung

$$-K \mu_1 N (s' - x) \frac{dx}{dz} = H_1 + H_2 s' - p_{s3} + (2s' - x) H_3 x \quad (21)$$

Dabei wurde zur Abkürzung gesetzt

$$s' = s_1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} s_2$$

Das Integral der Gleichung [21] ergibt die Verlagerung der Grenzfläche von x_3 nach x_4 zwischen dem trockenen und feuchten Bereich des Betons durch den Austrocknungsvorgang im Zeitabschnitt $z_2 - z_1$

$$-\frac{1}{K \mu_1 N} \int_{z_1}^{z_2} dz = \int_{x_3}^{x_4} \frac{s' - x}{H_1 + H_2 s' - p_{s3} + (2s' - x_3) H_3 x} dx \quad (22)$$

Die Integration der Gleichung [22] führt zu folgender Lösung

$$-\frac{1}{K \mu_1 N} Z = \frac{1}{2 H_3} \ln \frac{H_1 + H_2 s' - p_{s3} + (2s' - x_4) H_3 x_4}{H_1 + H_2 s' - p_{s3} + (2s' - x_3) H_3 x_3} \quad (23)$$

Unter Verwendung der Näherungsformel [13] erhält man folgende Gleichung für x_4

$$x_4 = s' - \sqrt{(s' - x_3)^2 - \frac{2Z}{K \mu_1 N} (p_{s3} - H_1 - H_2 s' - H_3 x_3)} \quad (24)$$

Bei der Berechnung wird vorausgesetzt, daß zu Anfang die gesamte Stahlbetondecke feucht ist. Dann wird $x_3 = s_1$ für $z_1 = 0$.

3. Rechnerische Untersuchungen und Ergebnisse

3.1 Austrocknungsverlauf und Austrocknungsdauer der Dachdecke

Zur Berechnung der Austrocknung des Betons wird angenommen, daß die Raumlufttemperatur t_1 während des ganzen Jahres konstant ist. Für die Außenlufttemperatur werden die mittleren Monatstemperaturen des Standortes gewählt. Die Zeitdauer eines Monats wird im Mittel mit 720 Stunden angenommen. Die Verlagerung der Grenzfläche zwischen trockenem und feuchtem Bereich bei der Austrocknung des Betons zum Raum unterhalb des Daches und die Kurve b den der Grenzfläche bei der Austrocknung durch die mehr oder weniger dampfdurchlässige Dampfsperre zur Wärmedämmschicht.

Bei der Austrocknung der Betonplatte zum Raum wandert die Grenze zwischen trockenem und feuchtem Bereich von der Anfangslage an der Unterseite der Betonplatte ins Innere (Kurve a). Die Austrocknung des Betons zum Raum hin erfolgt sowohl im Sommer als auch im Winter.

Bei der Austrocknung der Betonplatte zur Wärmedämmschicht wandert die Grenze zwischen trockenem und feuchtem Bereich unter Winterverhältnissen aus der Anfangslage an der Oberseite der Betonplatte ins Innere der Platte (Kurve b). Das Wasser diffundiert hierbei durch

die Dampfsperre in die Wärmedämmschicht und kondensiert unterhalb der Dachhaut. Unter Sommerverhältnissen kehrt sich die Richtung des Diffusionsstromes zwischen Betondecke und Dämmstoff um. Der Wasserdampf bewegt sich aus dem Dämmstoff zurück in die Betondecke und kondensiert an der Grenze zwischen trockenem und feuchtem Bereich. Deshalb wandert unter Sommerverhältnissen diese Grenze wieder in Richtung zur Wärmedämmschicht.

Die beiden Grenzen bewegen sich während der Austrocknung des Betons entsprechend der Kurven a und b auf-

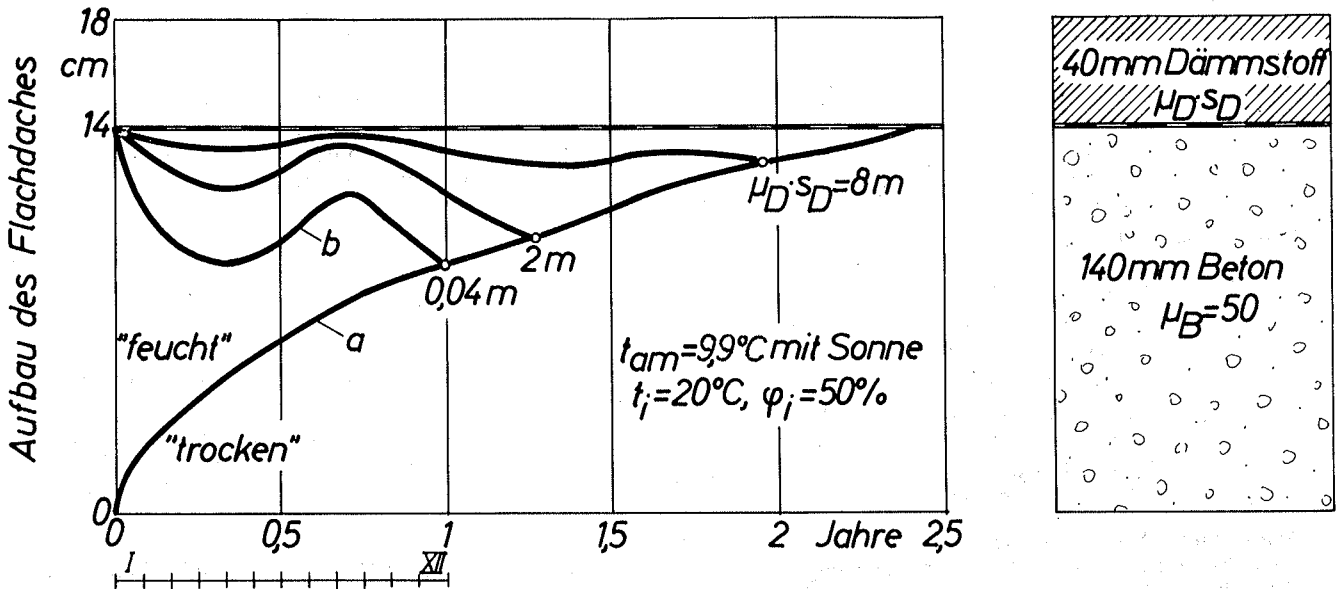


Bild 7: Zeitliche Veränderung der Grenze zwischen feuchtem und ausgetrocknetem Beton der Dachdecke während der Austrocknung des Flachdaches.

Standort: Karlsruhe ($t_{am} = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}$) mit Sonneneinstrahlung.

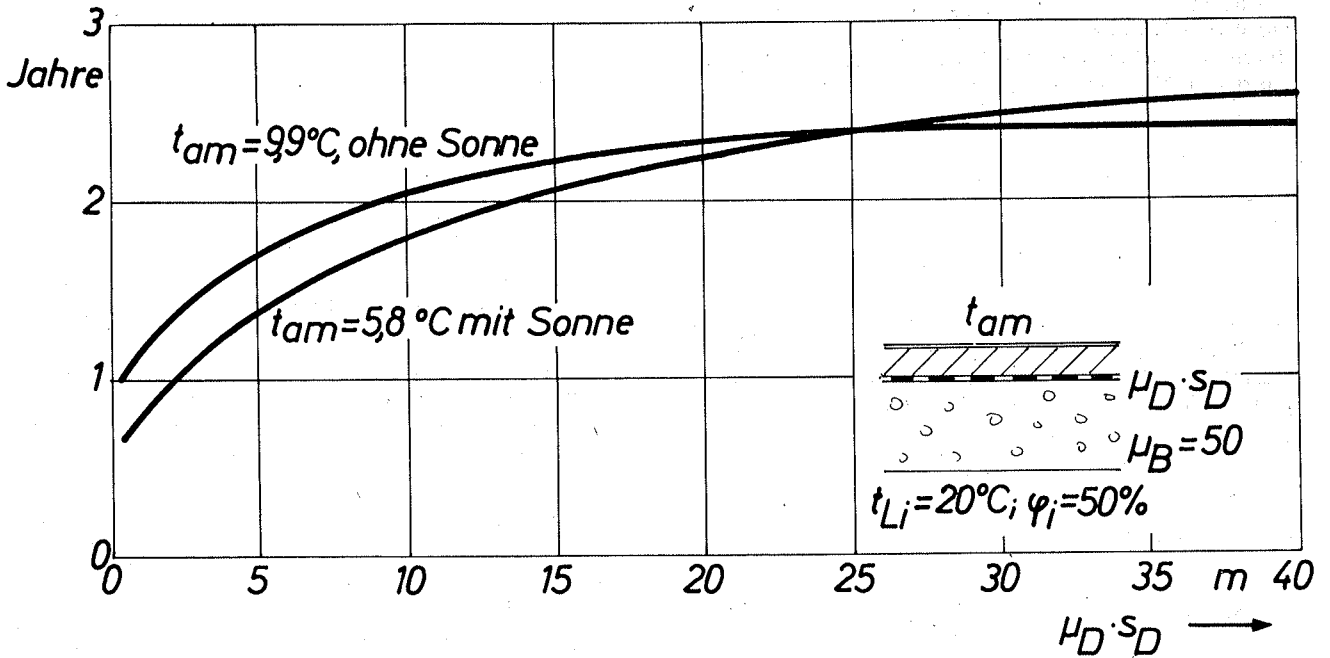


Bild 8: Zeit, nach der der volumetrische Wassergehalt des Betons eines Flachdaches um 3% abgenommen hat, bei verschiedenen Außenklimaten, abhängig von der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre.

t_{am} : Jahresmitteltemperatur des Standortes.

einander zu, bis sie sich schneiden. Die Austrocknung der Betonplatte ist dann beendet. Wenn dieser Zustand erreicht ist, bleibt der Wassergehalt des Betons konstant, die Betondecke stellt nur noch einen Diffusionswiderstand dar ($\mu_B \cdot s_B = 10 \text{ m}$), gibt aber aus ihrem Wassergehalt weder Wasser an den Raum noch an den Dämmstoff ab. Der Zeitpunkt, bis zu dem dieser Zustand erreicht wird, hängt hauptsächlich von der Dampfdurchlässigkeit der Dampfsperre und weniger von den außenklimatischen Verhältnissen (s. Bild 7 u.8) ab. Je geringer die Dampfdurchlässigkeit der Dampfsperre und des Dämmstoffes ist, umso schneller wird dieser Zustand erreicht. Ist die Dampfsperre völlig dampfdicht, dann erfolgt die Austrocknung der Betondecke ausschließlich nach dem Raum unter der Decke zu. Unter den angenommenen raum- und außenklimatischen Verhältnissen erreicht der Beton dann den praktischen Wassergehalt nach etwa 2,5 Jahren.

3.2 Wassergehalt des Wärmedämmstoffes

Aus der Verschiebung der Grenze zwischen trockenem und feuchtem Bereich des Betons während der Austrocknung und der Abnahme des volumetrischen Wassergehaltes des Betons um 3 % läßt sich die Wassermenge berechnen, die durch Diffusion aus der feuchten Betonplatte durch die Dampfsperre hindurch in die Wärmedämmschicht verlagert wird. Die Wasserzunahme des Dämmstoffes entspricht der aus dem Beton im Bereich zwischen Oberkante der Betonplatte und der Grenzfläche entsprechend Kurve b abgeführten Feuchtigkeitsmenge.

Bei nicht völlig dampfdichter Dampfsperre weist der Wärmedämmstoff am Ende der Austrocknungsperiode der Betondecke einen Wassergehalt auf, der umso geringer ist, je größer der Diffusionswiderstand der Dampfsperre ist. Das Wasser, das bei der Austrocknung der Betonplatte in den Wärmedämmstoff verlagert wurde, muß nach Beendigung des Austrocknungsvorganges der Betonplatte durch die Dampfsperre und die ausgetrocknete Platte mit ihrem nun zur Wirkung kommenden Diffusionswiderstand ($\mu_B \cdot s_B = 10 \text{ m}$) in den Raum unterhalb der Decke durch Diffusion abgeführt werden. Unter der Voraussetzung, daß die Bilanz der Feuchtigkeitsbewegung im Flachdach positiv ist¹⁾, d. h. daß die aus dem Dach jährlich abgeführte Wassermenge größer ist als die jährlich aus dem Raum eindiffundierende und im Dach kondensierende, wird nach einer bestimmten Zeit der Wassergehalt des Wärmedämmstoffes wieder auf den Anfangswert gesunken sein.

Die Kenntnis der Feuchtigkeitsverhältnisse im Dämmstoff bis zum Erreichen des praktischen Wassergehaltes der Betondecke und im weiteren Verlauf der Austrocknung ist für die Beurteilung des Daches von wesentlicher Bedeutung. Im folgenden wird dies für die Fälle gezeigt, daß der Dämmstoff völlig trocken verlegt worden ist bzw. daß er bei der Verlegung einen bestimmten Wassergehalt besessen hat.

3.2.1 Trockener Wärmedämmstoff

Im Diagramm des Bildes 9 ist der zeitliche Verlauf des Wassergehaltes des anfänglich trockenen Dämmstoffes bei verschiedenen Werten von $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre während der Austrocknung der feuchten Betonplatte und der anschließenden Austrocknung des Dämmstoffes gezeichnet. Die Kurven zeigen bis zum Punkt a die Feuchtigkeitszunahme des Dämmstoffes infolge von Wasserabgabe der Betonplatte und anschließend die Austrocknung des Wärmedämmstoffes. Bei den hier angenommenen Verhältnissen dauert die Austrocknung

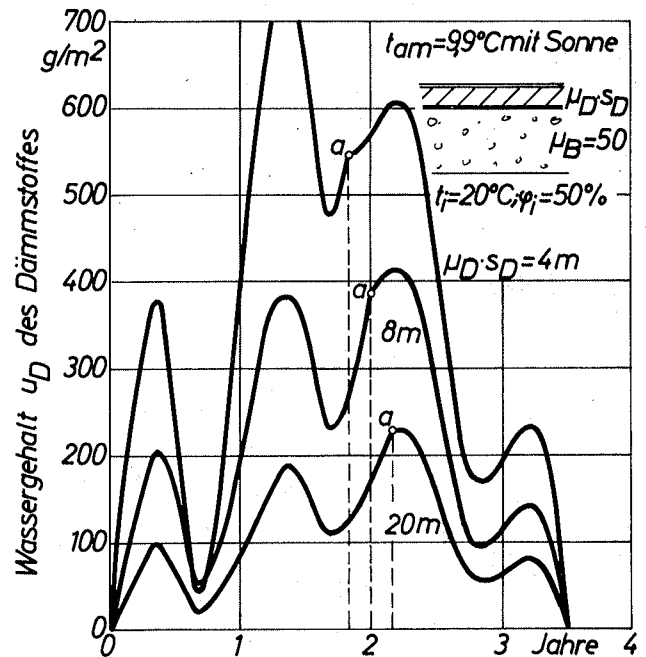


Bild 9: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes u_D des anfänglich trockenen Dämmstoffes eines Flachdaches über einer feuchten Betondecke während der Austrocknung des Flachdaches mit Sonneneinstrahlung.

a: Zeitpunkt, zu dem die Austrocknung der Stahlbetondecke beendet ist.

Standort: Karlsruhe ($t_{am} = 9,9 \text{ °C}$) mit Sonneneinstrahlung.

der Betonplatte, je nach dem Wert der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der Dampfsperre, etwa 2 Jahre. Die gesamte Austrocknungsdauer des Flachdaches einschließlich Dämmstoff wird jedoch nicht von der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der Dampfsperre beeinflusst und beträgt hier etwa $3 \frac{1}{2}$ Jahre.

Der Wassergehalt des Dämmstoffes nach Beendigung der Austrocknung der Betonplatte ist abhängig von der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der Dampfsperre und von den außenklimatischen Verhältnissen des Standortes. Der Wassergehalt des Dämmstoffes nach Austrocknung der Betonplatte wurde für die Standorte Karlsruhe und Clausthal-Zellerfeld mit und ohne Sonneneinstrahlung abhängig von $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre berechnet. Das Ergebnis ist in Bild 10 enthalten. Geht man davon aus, daß im ursprünglich trockenen Dämmstoff ein bestimmter Wassergehalt nicht überschritten werden soll — z. B. 500 g/m^2 —, dann gibt das Diagramm des Bildes 10 die Möglichkeit, die geringste noch zulässige Dampfdurchlässigkeit bzw. diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre zu entnehmen. Unter den strengen außenklimatischen Verhältnissen des Standortes mit einer Jahresmitteltemperatur von $5,8 \text{ °C}$ (Clausthal-Zellerfeld) ergibt sich ohne Berücksichtigung einer Sonneneinstrahlung zum Dach ein Minimalwert $\mu_D \cdot s_D$ von etwa 20 m (Raumlufttemperatur 20 °C , rel. Feuchte 50%).

¹⁾ Siehe Seite 21

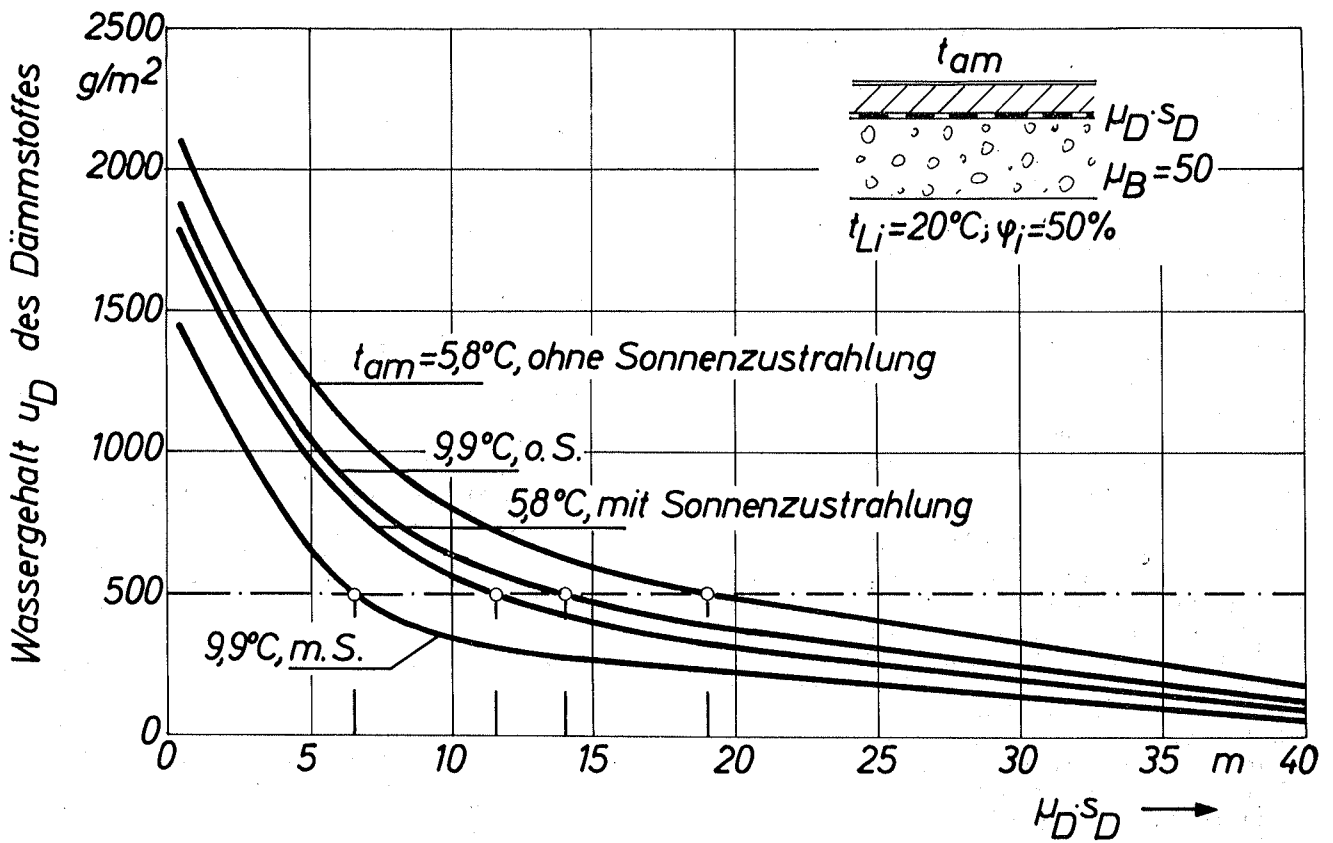


Bild 10: Wassergehalt u_D des anfänglich trockenen Dämmstoffes eines Flachdaches über der Betondecke am Ende der Austrocknungsperiode der Decke, abhängig von $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre.
 t_{am} : Jahresmitteltemperatur des Standortes.

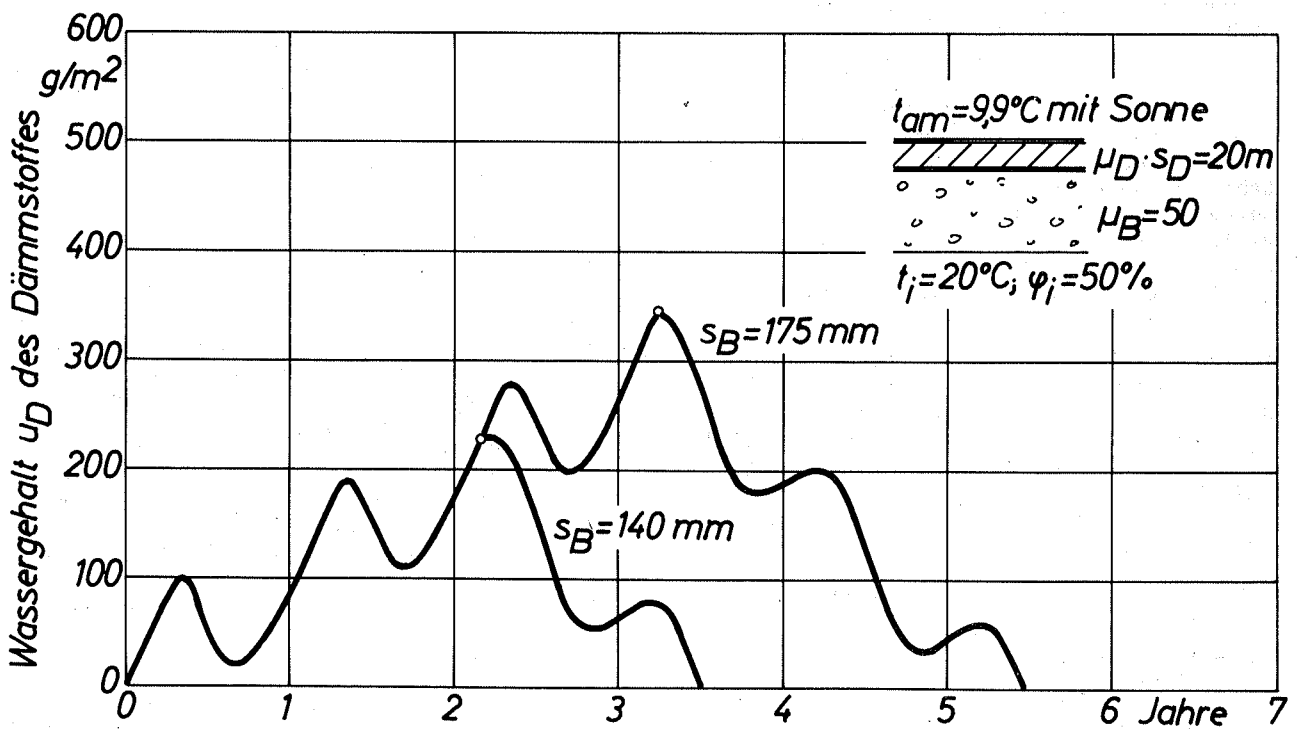


Bild 11: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes u_D des anfänglich trockenen Dämmstoffes eines Flachdaches über einer feuchten Betondecke von 140 mm bzw. 175 mm Dicke während der Austrocknung des Flachdaches.
 Standort: Karlsruhe ($t_{am} = 9,9^\circ C$) mit Sonneneinstrahlung.

Auch die Dicke der Stahlbetonplatte des Flachdaches hat einen Einfluß auf die Austrocknungsdauer. Je dicker die Betonplatte ist, umso größer ist ihr absoluter Wassergehalt und umso länger dauert der Austrocknungsvorgang. Die Berechnung des zeitlichen Verlaufes der Austrocknung eines Flachdaches mit einer 175 mm dicken Stahlbetonplatte ergab, daß im Vergleich zur 140 mm dicken Stahlbetonplatte die gesamte Austrocknungszeit um 2 Jahre auf 5,5 Jahre erhöht wird (s. Bild 11).

Der zeitliche Verlauf des Wassergehaltes des anfänglich trockenen Dämmstoffes eines Flachdaches über einer feuchten Betondecke ist für zwei extreme außenklimatische Standortverhältnisse (Clausthal-Zellerfeld 5,8 °C ohne Sonneneinstrahlung und Karlsruhe 9,9 °C mit Sonneneinstrahlung) für den Wert $\mu_D \cdot s_D = 20$ m der Dampfsperre in Bild 12 gezeichnet. Am Standort Clausthal-Zellerfeld ohne Sonneneinstrahlung ist unter den angenommenen raumklimatischen Verhältnissen (20 °C, 50 % rel. Feuchte) eine positive Bilanz der Feuchtigkeitsbewegung im Dach nicht mehr gegeben, der Wassergehalt des Dämmstoffes steigt im Laufe der Zeit mehr und mehr an. In diesem Fall muß die Dampfsperre völlig dampfdicht sein und der Dämmstoff möglichst trocken eingebaut werden.

3.2.2 Feuchter Dämmstoff

Geht man davon aus, daß der Dämmstoff beim Einbau einen Wassergehalt von 300 g/m² aufweist, dann gelten für die weiteren Feuchtigkeitsverhältnisse die im Diagramm des Bildes 13 dargestellten Zusammenhänge. Bei einer Dampfsperre mit dem Wert 100 m für $\mu_D \cdot s_D$ bleibt der Wassergehalt des Dämmstoffes bis zum Ende der Austrocknungsperiode der Betondecke, also etwas über 2 Jahre lang praktisch konstant bei 300 g/m². Dann

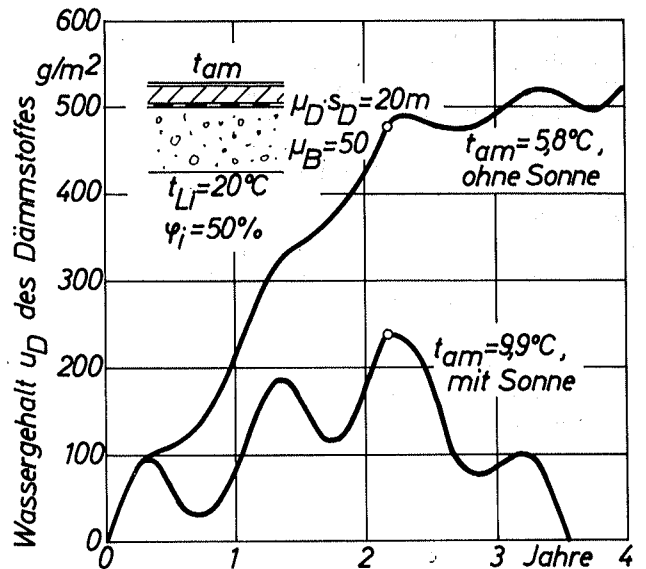


Bild 12: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes u_D des anfänglich trockenen Dämmstoffes eines Flachdaches über einer feuchten Betondecke während der Austrocknung des Daches.

t_{am} : Jahresmitteltemperatur des Standortes.

nimmt der Wassergehalt langsam ab, liegt aber nach insgesamt 7 Jahren immer noch bei rund 150 g/m². Ist dagegen der Wert $\mu_D \cdot s_D$ der Dampfsperre nur 20 m, so steigt zwar der Wassergehalt des Dämmstoffes während der ersten 2 Jahre bis auf nahezu 550 g/m², nimmt aber dann verhältnismäßig schnell ab und ist nach insgesamt

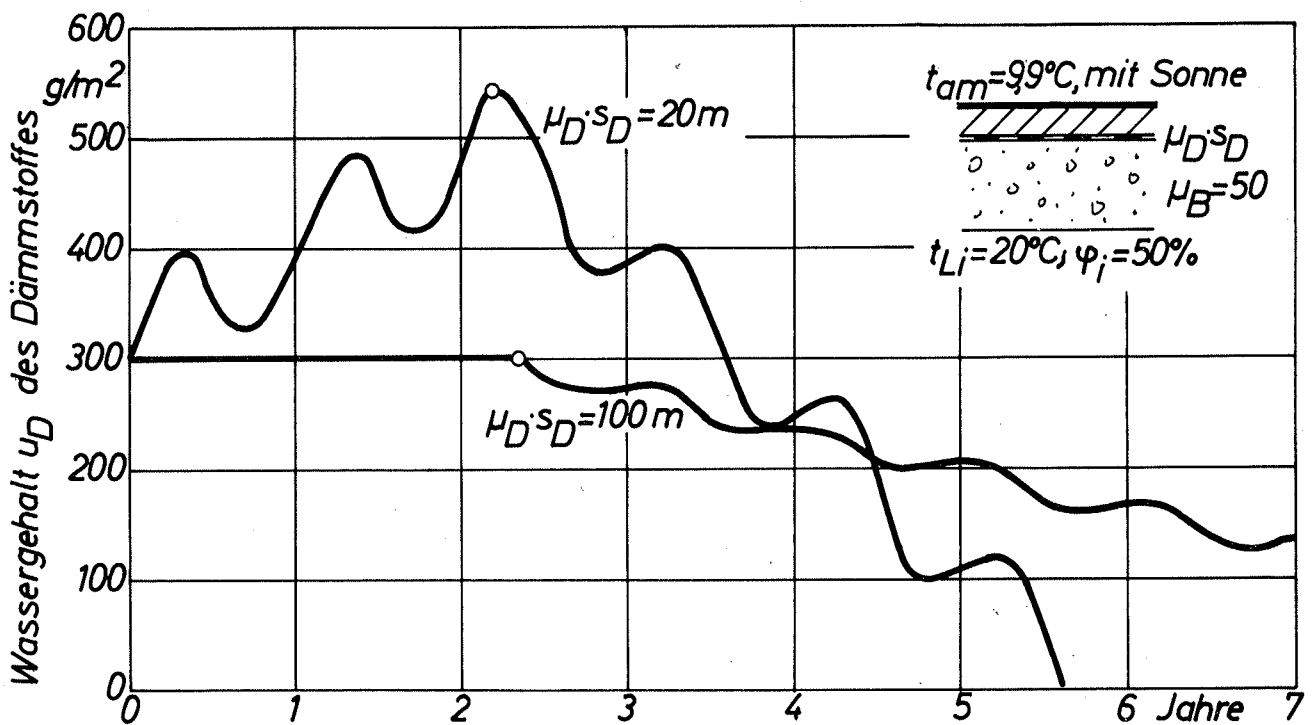


Bild 13: Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes des Dämmstoffes eines Flachdaches über einer feuchten Betondecke während der Austrocknung des Daches. Anfänglicher Wassergehalt des Dämmstoffes: 300 g/m². Standort: Karlsruhe ($t_{am} = 9,9$ °C) mit Sonneneinstrahlung.

5,5 Jahren auf Null gesunken. Durch einen hohen Diffusionswiderstand der Dampfsperre ($\mu_D \cdot s_D = 100 \text{ m}$) wird zwar die Verlagerung von Wasser aus dem Beton in die Dämmschicht praktisch unterbunden, die Austrocknung einer bei der Verlegung mit der Wärmedämmschicht eingebrachten Wassermenge wird jedoch stark behindert. Zieht man die Möglichkeit in Betracht, daß durch irgendwelche Umstände der Wärmedämmstoff bei der Verlegung einen überhöhten Wassergehalt aufweist, so ist für die spätere Austrocknung der Dämmschicht ein hoher Diffusionswiderstand der Dampfsperre hinderlich, während ein niedriger Diffusionswiderstand die Austrocknung begünstigt.

4. Folgerungen

Aus den Ergebnissen der Untersuchung lassen sich nachstehende Folgerungen ableiten:

Eine völlig dampfdichte Dampfsperre in einem nicht-belüfteten Flachdach ist nur dann notwendig, wenn — bedingt durch die raumklimatischen und die außenklimatischen Verhältnisse — ein im Laufe der Zeit mehr und mehr zunehmender Wassergehalt im Dämmstoff des Daches infolge von Dampfdiffusion zu erwarten ist (negative Bilanz der Feuchtigkeitsbewegung im Dach).

Kann mit einer Wiederaustrocknung des im Dach unter Winterverhältnissen anfallenden Kondensates im Laufe des Jahres gerechnet werden (positive Bilanz der Feuchtigkeitsbewegung im Dach), so ist es zweckmäßig, eine Dampfsperre zu verwenden, die nicht völlig dampfdicht ist, damit eine eventuell bei der Verlegung der Wärmedämmschicht mit eingebrachte Feuchtigkeitsmenge wieder austrocknen kann.