

PORENBETON BERICHT 11

Wärme- und Feuchteschutz



WÄRME- UND FEUCHTESCHUTZ

Dr.-Ing. Helmut Künzel

Inhalt

1. Thermische und hygrische Eigenschaften von Porenbeton	3
1.1 Wärmeleitfähigkeit	3
1.2 Wasserdampf-Sorption und praktischer Feuchtegehalt	5
1.3 Wasserdampf-Diffusion	6
1.4 Kapillare Wasserleitfähigkeit und kapillare Wasseraufnahme	6
1.5 Formänderungen	7
2. Feuchteverhältnisse in Außenbauteilen aus Porenbeton	8
2.1 Allgemeines zu Feuchtetransportvorgängen in Porenbeton-Bauteilen	8
2.2 Austrocknung (Baufeuchte)	9
2.3 Feuchteeinwirkung von innen (Wohnfeuchte)	10
2.3.1 Oberflächen-Tauwasser	11
2.3.2 Innere Kondensation	12
2.4 Feuchteeinwirkung von außen (Schlagregen)	12
2.4.1 Beanspruchungsgruppen und Anforderungen	12
2.4.2 Realisierung des Regenschutzes	14
2.5 Feuchteverhältnisse in nicht belüfteten Porenbeton-Flachdächern	15
2.5.1 Porenbeton-Flachdächer ohne Zusatzdämmung	15
2.5.2 Porenbeton-Flachdächer mit Zusatzdämmung	16
3. Außenputze, Bekleidungen	17
3.1 Allgemeine Gesichtspunkte	17
3.2 Außenputze nach DIN 18 550	17
3.3 Beschichtungen, Fugenausbildung	18
3.4 Bekleidungen	19
4. Wärmeschutz und Temperaturverhältnisse	19
4.1 Allgemeines zur Wärmedämmung, Wärmespeicherfähigkeit und Heizenergieverbrauch	19
4.1.1 Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände nach DIN 4108	19
4.1.2 Wärmedämmung und Beheizung	20
4.1.3 Wärmespeicherfähigkeit	21
4.2 Wärmeschutz durch Außenbauteile aus Porenbeton	21
Literaturhinweise	22

Herausgeber: Bundesverband Porenbeton
Vertrieb: BVP Informations-GmbH
Postfach 18 26, 65008 Wiesbaden, Dostojewskistr. 10, 65187 Wiesbaden
Telefon: 06 11/98 50 44-0, Telefax 06 11/80 97 07
E-Mail info@bv-porenbeton.de · Internet www.bv-porenbeton.de
Druck: Druck- und Verlagshaus Chmielorz GmbH, Ostring 13, 65205 Wiesbaden-Nordenstadt
2. durchgesehene Auflage 2003
© Bundesverband Porenbeton
Veröffentlichungen, auch auszugsweise, bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Herausgebers.

Wärme- und Feuchteschutz

1. Thermische und hygrische Eigenschaften von Porenbeton

1.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit eines trockenen Stoffes bei stationärer Wärmeströmung (Beharrungszustand) wird bekanntlich durch die Wärmeleitfähigkeit λ gekennzeichnet. Porenbeton besitzt als Baustoff mit zahlreichen kleinen, gleichmäßig verteilten Luftporen eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit, die naturgemäß vom Gesamt-Porenvolumen und damit von der Rohdichte abhängt. Zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte ρ des Porenbetons besteht eine lineare Abhängigkeit, wie aus Messergebnissen in Bild 1 hervorgeht.

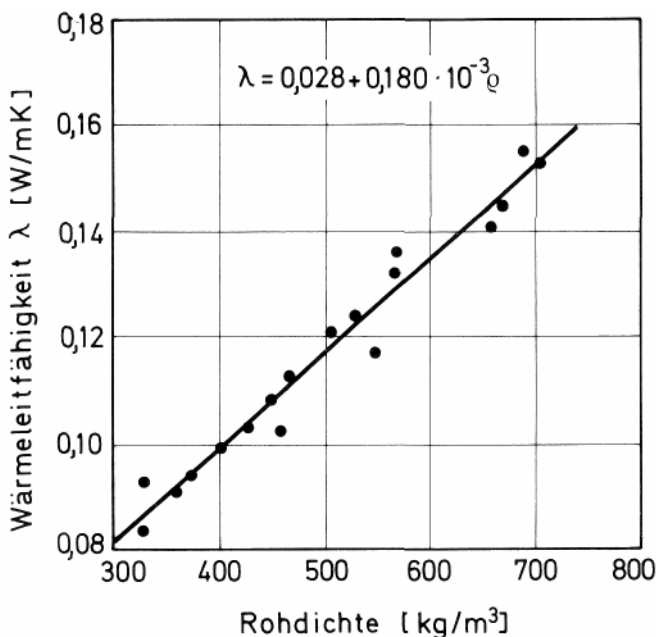


Bild 1: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von trockenem Porenbeton bei 10 °C Mitteltemperatur ($\lambda_{10, tr}$) von der Rohdichte.

Diese Ergebnisse gelten für trockenes Material, für welches die Wärmeleitfähigkeit als Stoffeigenschaft eindeutig definiert ist. Die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte ist durch die Gleichung

$$\lambda = 0,028 + 0,180 \cdot 10^{-3} \rho$$

zu beschreiben. Für die Rohdichte $\rho = 0$ ergibt sich hieraus die Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda = 0,028 \text{ W/(mK)}$$

Dies entspricht mit guter Näherung der Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft, die bei 10 °C 0,025 W/(mK) beträgt.

Man kann dies so interpretieren, dass das eigentlich wärmedämmende Medium in Baustoffen die Luft ist, die durch ein Feststoffgerüst so unterteilt wird, dass abgeschlossene Volumina unbewegter Luft entstehen. Die Anforderungen an das Material des Feststoffgerüsts sind für den Anwendungsfall ausreichende Festigkeit und geringe Wärmeleitfähigkeit.

Bei feuchten Stoffen findet neben dem erhöhten Wärmetransport durch Leitung ein zusätzlicher Wärmetransport infolge Verlagerung der Feuchtigkeit im Material in Dampfform und in flüssiger Form statt. Bei den nach Abgabe erhöhter Baufeuchte und bei ausreichendem Regenschutz in Außenbauteilen auftretenden Feuchteverhältnissen, sowie bei nie-

deren Temperaturen, bei denen der Wärmeschutz von Bauteilen erforderlich ist, sind Vorgänge des Feuchtetransports von vernachlässigbarem Einfluss [1, 3]. In dem praktisch interessierenden Feuchtebereich (hygroskopische Feuchte) ist die Feuchtigkeit als im Feststoff gebunden zu betrachten, welche die Wärmeleitung entsprechend erhöht.

Die Angabe des Feuchtegehalts kann in Prozenten bezogen auf die Masse oder bezogen auf das Volumen erfolgen (Masse-%: u_m , Volumen-%: u_v). Zwischen beiden Wertangaben und der Rohdichte ρ des Stoffes besteht die Beziehung

$$u_v = \frac{\rho}{\rho_w} u_m$$

mit ρ_w : Rohdichte des Wassers (1000 kg/m³).

Die beiden Wertangaben unterscheiden sich somit für einen bestimmten Baustoff nur durch den konstanten Quotienten ρ/ρ_w und es erscheint daher im Prinzip gleichgültig, wie der Feuchtegehalt angegeben wird.

Bisher werden Feuchtegehalte bevorzugt in Prozentwerten bezogen auf das Volumen ausgedrückt. Insbesondere beim Vergleich verschiedener Baustoffe untereinander sind Volumen-Prozente anschaulicher als Masse-Prozente. Neuere Untersuchungen haben aber ergeben [1], dass immer dann, wenn die Feuchte in der Masse (im Feststoffgerüst) des Baustoffes gebunden ist, der massebezogene Feuchtegehalt physikalisch richtig ist und zu einfacheren Zusammenhängen führt als der volumenbezogene Wert.

Grundlage für die folgenden Darlegungen über den Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton sind Messergebnisse an Versuchsmaterial, das unter sehr definierten und kontrollierten Bedingungen hergestellt worden ist, weshalb sich exakte Zusammenhänge ergaben [5]. Die

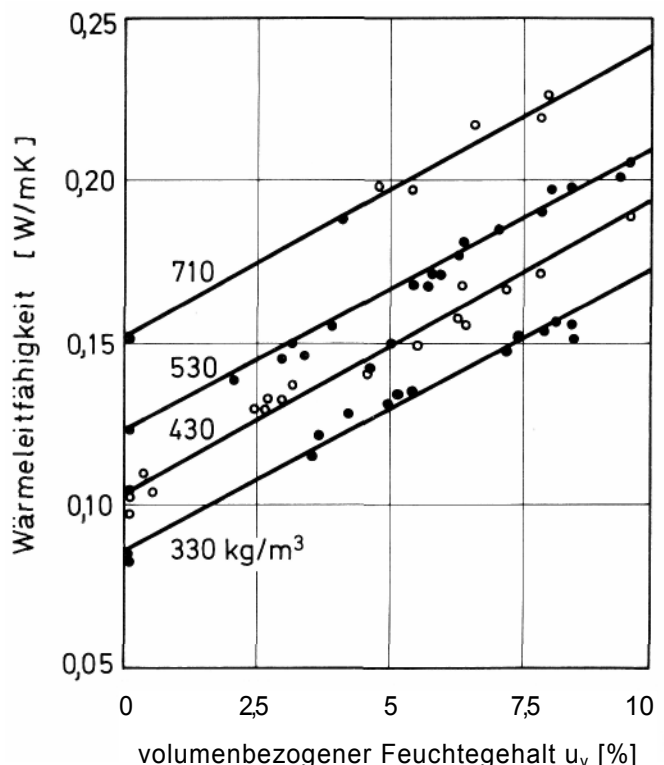


Bild 2: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ von Porenbeton unterschiedlicher Rohdichte vom volumenbezogenen Feuchtegehalt nach Messungen im Plattengerät bei 10°C Mitteltemperatur [5].

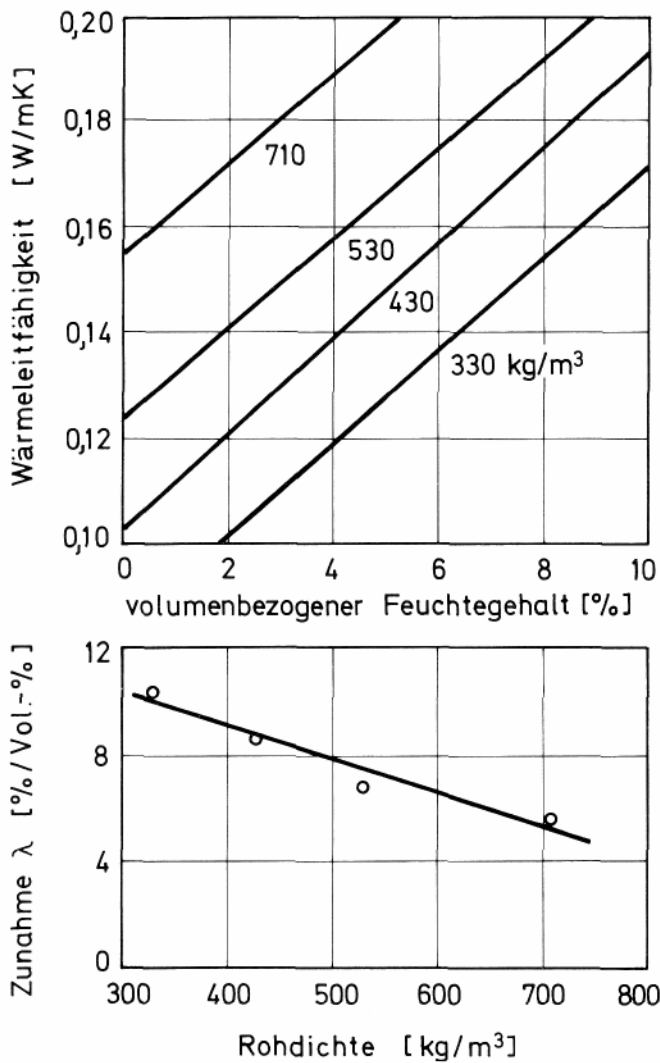


Bild 3: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton unterschiedlicher Rohdichte vom volumenbezogenen Feuchtegehalt (oben) und Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Vol.-% in Abhängigkeit von der Rohdichte (unten).

$$\text{Zunahme } \lambda: \frac{\lambda_{uv} - \lambda_{10, tr}}{\lambda_{10, tr} \cdot u_v} \cdot 100$$

Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 2 enthalten, in dem die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt für vier verschiedene Porenbeton-Rohdichten dargestellt ist. Aus Bild 3 ist dieser Zusammenhang nochmals ohne Messpunkte und zusätzlich die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro 1 Volumen-% Feuchte zu entnehmen. Eine entsprechende Darstellung, aber jeweils umgerechnet auf massebezogene Feuchtegehalte, enthält Bild 4.

Ein Vergleich zwischen den Bildern 3 und 4 lässt folgendes erkennen: Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro 1% Feuchte nimmt bei Bezug auf das Volumen mit zunehmender Rohdichte ab, während diese Zunahme bei Bezug auf die Masse unabhängig von der Rohdichte ist. Mit dem konstanten Faktor b , der im vorliegenden Fall 0,037 beträgt, gilt für die Wärmeleitfähigkeit beim massebezogenen Feuchtegehalt u_m :

$$\lambda_{um} = \lambda_{10, tr} (1 + b \cdot u_m)$$

mit $\lambda_{10, tr}$ = Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand bei 10 °C Mitteltemperatur. Die Rohdichte wirkt sich dabei nur im

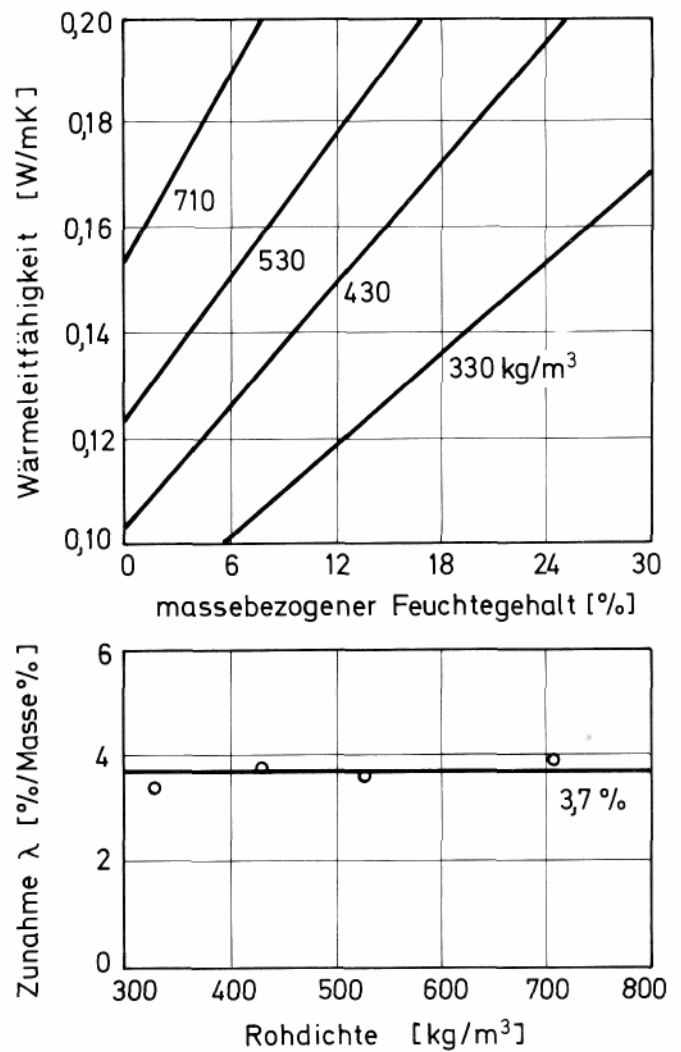


Bild 4: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton unterschiedlicher Rohdichte vom massebezogenen Feuchtegehalt (oben) und Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Masse-% in Abhängigkeit von der Rohdichte (unten).

$$\text{Zunahme } \lambda: \frac{\lambda_{uv} - \lambda_{10, tr}}{\lambda_{10, tr} \cdot u_m} \cdot 100$$

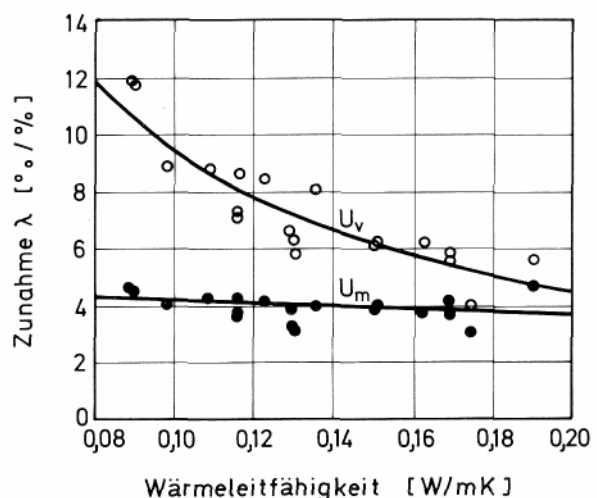


Bild 5: Prozentuale Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton in Abhängigkeit von $\lambda_{10, tr}$, bezogen auf 1 Vol.-% bzw. 1 Masse-% nach [6]. Anstelle der Rohdichte ist in der Abszisse die Wärmeleitfähigkeit eingetragen, die in linearem Zusammenhang mit der Rohdichte steht (siehe Bild 1).

Wert von $\lambda_{10, \text{tr}}$ aus. Auf volumenbezogene Werte umgerechnet gilt

$$\lambda_{\text{um}} = \lambda_{10, \text{tr}} \left(1 + b \frac{1000}{\rho} u_v \right)$$

Die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ist in diesem Fall umgekehrt proportional zur Rohdichte ρ des Porenbetons. Messungen an Porenbetonen verschiedener Art im Forschungsinstitut für Wärmeschutz [6] bestätigen die Konstanz der λ -Zunahme pro Masse-% unabhängig von der Rohdichte bzw. $\lambda_{10, \text{tr}}$ und die hyperbolische Abnahme pro Volumen-% mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$, wie in Bild 5 zu erkennen ist.

Die Festlegung eines Zuschlagswertes auf $\lambda_{10, \text{tr}}$ zur Berücksichtigung des Feuchteinflusses ist daher auf der Basis eines massebezogenen Feuchtegehaltes einfacher und physikalisch richtig. Derzeit gelten aber nach DIN 52612-2, Ausgabe Juni 1984, Zuschlagswerte zwischen 35% und 25%, abhängig von $\lambda_{10, \text{tr}}$.

1.2 Wasserdampf-Sorption und praktischer Feuchtegehalt

Poröse Stoffe sind in der Regel nicht völlig trocken, sondern nehmen einen Feuchtegehalt an, der von der Temperatur und Feuchte der umgebenden Luft abhängt. Der sich einstellende Feuchtegehalt wird durch Feuchteabsorption an den äußeren und inneren Oberflächen und durch Kapillarkondensation in den Poren und Kapillaren des Stoffes bedingt. Unabhängig von der Art der Feuchtigkeitsbindung wird die Fechteaufnahme oder -abgabe eines Stoffes aus der umgebenden Luft als Absorption bzw. Desorption bezeichnet, zusammenfassend als Sorption. Die Sorptionseigenschaften eines Stoffes werden durch den Zusammenhang zwischen Stofffeuchte und Luftfeuchte beschrieben, der für eine konstante Temperatur durch die Sorptionsisotherme gekennzeichnet wird. Der Feuchtegehalt, der sich infolge Sorption bei üblichen Werten der relativen Luftfeuchte in einem Material einstellt, wird als hygroskopischer Feuchtegehalt bezeichnet. Im Gegensatz hierzu versteht man unter einem überhygroskopischen Feuchtegehalt einen höheren Wert, der nicht durch Sorption, sondern durch Zugabe flüssigen Wassers hervorgerufen wird (z. B. Baufeuchte, Regenfeuchte).

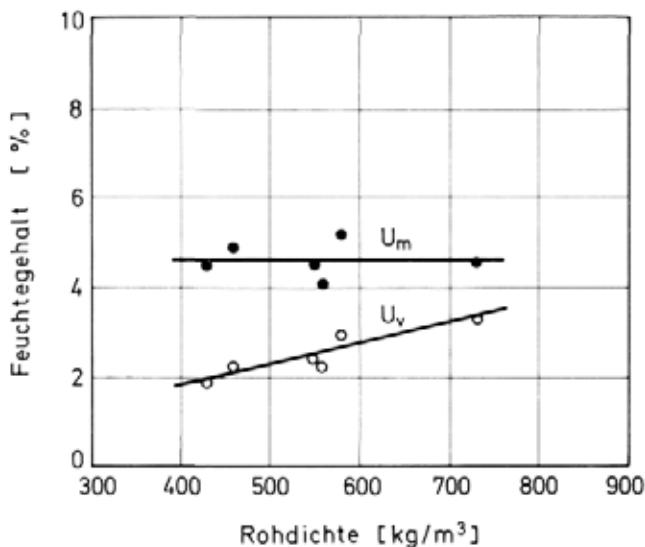


Bild 6: Sorptionsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) von Porenbeton bei 20 °C und 80% r. F., bezogen auf das Volumen (u_v) bzw. die Masse (u_m) des Materials in Abhängigkeit von der Rohdichte.

Die Sorptionsfeuchte von hygroskopischen Stoffen einer einheitlichen Stoffart ist bei Bezug auf die Masse weitgehend unabhängig von der Rohdichte, während der volumenbezogene Sorptionsfeuchtegehalt mit der Rohdichte zunimmt [1]. Für Porenbeton einer bestimmten Herstellungsart ist dies beispielhaft in Bild 6 dargestellt. Dass dies in dem gegebenen Beispiel kein Zufall ist, sondern generell für Stoffe gleicher Art, aber unterschiedlicher Rohdichte, infolge unterschiedlicher Porosierung zutrifft, geht aus der folgenden Überlegung hervor.

Betrachtet werden zwei Materialien unterschiedlicher Rohdichte, die aber aus dem gleichen Feststoff bestehen (gleiche Struktur der Kapillaren und Mikroporen). Die unterschiedliche Rohdichte kommt durch eine unterschiedliche Anzahl und Größe von Hohlräumen zustande, die so groß sind, dass sich in ihnen kein Wasser infolge Sorption einlagert (z. B. die sichtbaren Poren bei Porenbeton oder die Hohlräume bei Lochziegeln). Bei Lagerung im gleichen Klima stellt sich im Feststoff beider Materialien der gleiche Feuchtegehalt infolge Absorption ein, also der gleiche Feuchtegehalt, bezogen auf die Feststoffmasse. Bezogen auf das Volumen ist aber der Feuchtegehalt beim Material mit größerem Hohlraumanteil (kleinere Rohdichte) kleiner. Dieser Sachverhalt wird schematisch in Bild 7 dargestellt.

Vergleich Masse-% - Volumen-%

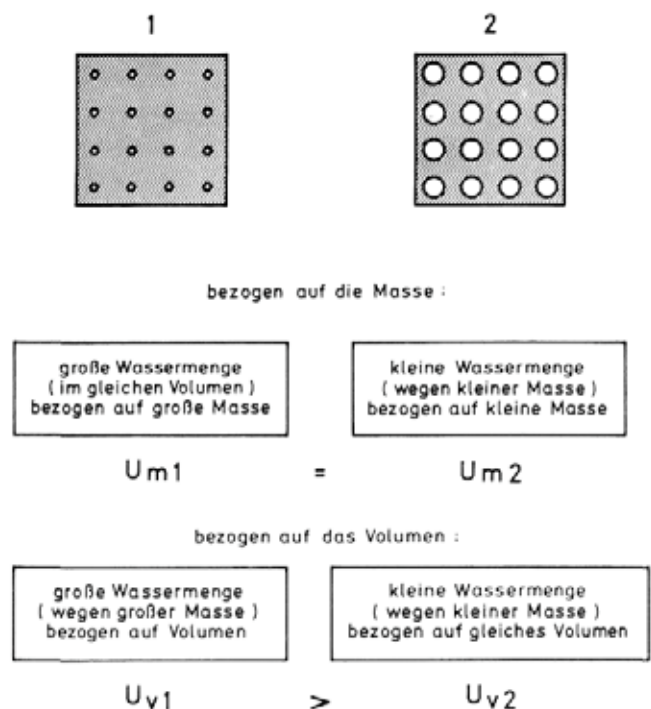


Bild 7: Schematische Darstellung zum Vergleich Vol.-% - Masse-%. Die Feuchtigkeit ist im Feststoffgerüst (Scherben) gebunden, nicht in den sichtbaren Poren oder Hohlräumen.

Da zwischen dem durch Sorption sich einstellenden Gleichgewichtsfeuchtegehalt und dem praktischen Feuchtegehalt von Baustoffen eine direkte Beziehung besteht [2, 3], wird auch der praktische Feuchtegehalt physikalisch richtiger in Masse-% angegeben. Unter praktischem Feuchtegehalt versteht man den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht überschritten wurde. Nach DIN 4108-4 galt für Porenbeton lange Zeit, als man diesen Wert allgemein in Vol-% angegeben hatte, ein praktischer Feuchtegehalt von 3,5 Vol-%.

an bewohnten Gebäuden ermittelten Messwerte, die zu diesem Wert führten [4], sind in Abhängigkeit von der Rohdichte in Bild 8 aufgezeichnet. Es bestätigt sich, dass die mittlere Ausgleichsgerade der massebezogenen Messwerte sich praktisch unabhängig von der Rohdichte darstellt, während die volumenbezogenen Werte mit der Rohdichte zunehmen. Massebezogen ergibt sich ein 90%-Wert (praktischer Feuchtegehalt) von 6,5%. Dieser Wert wurde nunmehr in DIN 4108-4, Ausgabe 10/1998 übernommen und festgelegt. Bei Angaben in Volumen-% müsste man den praktischen Feuchtegehalt eigentlich von der Rohdichte abhängig festlegen. Bei dem früher hauptsächlich verwendeten Porenbetonmaterial mit Rohdichten zwischen 500 und 600 kg/m³ ergab sich hierzu jedoch keine Notwendigkeit. Erst mit der Herstellung leichteren Porenbetons - um 400 kg/m³ - wurde die mit der Art der Feuchteangabe zusammenhängende Problematik offensichtlich: Geht man von einem roh-dichteunabhängigen praktischen Feuchtegehalt für Porenbeton von 6,5 Masse-% aus, dann ergibt sich daraus für Porenbeton einer Rohdichte von ca. 550 kg/m³ ein volumenbezogener Wert von 3,5% - wie früher in DIN 4108-4 festgelegt - für Porenbeton der Rohdichte 400 kg/m³ wären jedoch ca. 2,5 Volumen-% zutreffend.

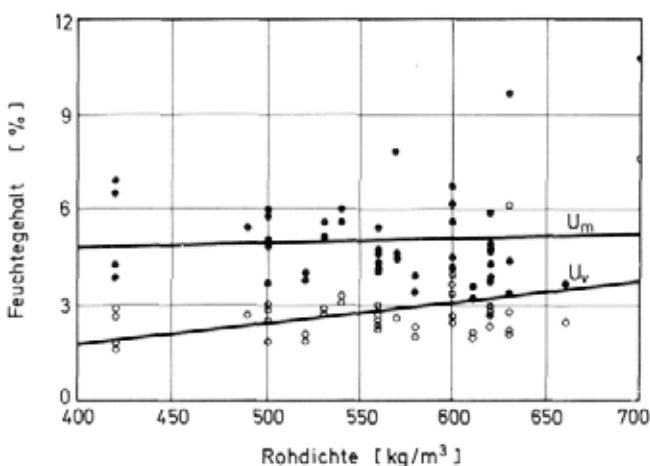


Bild 8: Feuchte von Porenbetonwänden in der Praxis, bezogen auf das Volumen (u_v) bzw. die Masse (u_m) des Materials in Abhängigkeit von der Porenbetonroh-dichte (Messwerte zur Ermittlung des praktischen Feuchtegehalts).

1.3 Wasserdampf-Diffusion

Der Transport von Wasserdampf in einem porösen Material durch Diffusion wird gekennzeichnet durch die Diffusionswiderstandszahl μ , die angibt, wievielfach der Wasserdampf-Durchlasswiderstand des betreffenden Materials größer ist als der einer ruhenden Luftschicht von gleicher Dicke. Das Produkt aus n und der Schichtdicke s [m] eines Stoffes heißt diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d und gibt an, wie dick eine Luftschicht in m sein müsste, um den gleichen Diffusionswiderstand wie die betrachtete Stoffschicht zu haben. Die durch eine Probe der Schichtdicke s unter dem Einfluß eines Dampfdruckunterschiedes p_1-p_2 an den gegenüberliegenden Probenoberflächen im Beharrungszustand hindurchdiffundierende Wasserdampfmenge I wird durch die Gleichung beschrieben:

$$I = \frac{\delta_l}{s_d} A (p_1 - p_2)$$

Hierin bedeuten:

I [kg/h]: Im Beharrungszustand durch die Probe diffundierende Wasserdampfmenge (Diffusionsstrom)
 ρ_L [kg/(mhPa)]: Diffusionsleitkoeffizient von Wasserdampf in Luft

s_d [m]: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
 A [m²]: Prüffläche der Probe
 p_1, p_2 [Pa]: Wasserdampfdrucke an den Probenoberflächen.

Die Prüfung erfolgt bei mineralischen Stoffen nach dem Trockenbereichverfahren. Bei Stoffen mit organischen Bindemitteln (Kunstharzputze) wird die Messung nach dem Feuchtbereichverfahren durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Diffusionswiderstände von Porenbeton verschiedener deutscher Herstellerwerke angegeben. Hieraus ist zu ersehen, dass die Diffusionswiderstandszahl μ zwischen den Werten 5 und 10 schwanken kann. Dieser Wertebereich ist auch in DIN 4108 Teil 4 für Porenbeton angegeben. Gleiche Wertebereiche gelten nach DIN 4108 für Ziegel und Bimsbeton. Kalksandstein liegt im Bereich 5-25, Normalbeton im Bereich 70-140.

Tabelle 1:
Diffusionswiderstandszahlen von Porenbeton verschiedener deutscher Herstellerwerke, ermittelt im Trockenbereichverfahren

Herstellerwerk	Rohdichte [kg/m ³]	Diffusions- Widerstandszahl μ [-]
A	615	6,5
B	535	7,5
C	640	5,0
D	600	5,5
E	630	9,5

1.4 Kapillare Wasserleitfähigkeit und kapillare Wasseraufnahme

In Baustoffen mit Kapillaren und Poren, die untereinander verbunden sind, ist ein Transport von flüssigem Wasser unter der Wirkung von Kapillarkräften möglich. Voraussetzung für eine kapillare Wasserbewegung innerhalb eines Materials ist das Vorhandensein eines Feuchtegefälles ($\text{grad } \psi$), analog zu den Verhältnissen bei der Wärmeleitung, die ein Temperaturgefälle voraussetzt. Bei konstanter Temperatur in einem Material ist die transportierte Wassermenge g_w proportional dem Feuchtegefälle und einer für das jeweilige Material kennzeichnenden Wasserleitzahl χ [7]. Die folgende Darstellung baut noch auf den Theorien von Kirschner [7] auf. Bei heutigen numerischen Verfahren zwei Kapillarleitkoeffizienten definiert, einer für das kapillare Saugen (w -Wert) und einer für das "Weiterverteilen" der Feuchte. Das Grundsätzliche kann aber wie folgt dargestellt werden

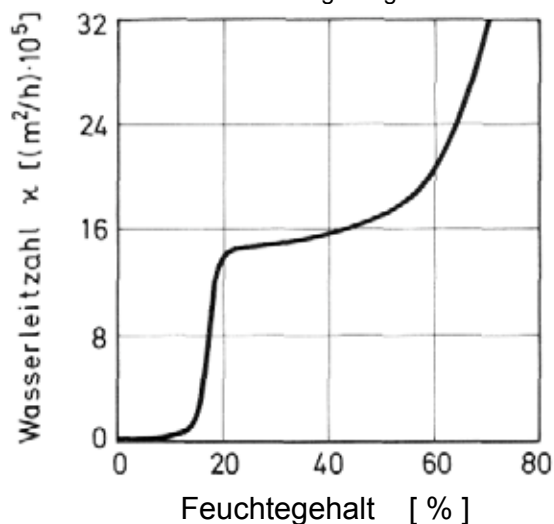


Bild 9: Wasserleitzahl von Porenbeton (Rohdichte 650 kg/m³) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt nach Krischer [7], dort S. 239, Versuche im Beharrungszustand.

$$g_w = -\gamma \chi \text{ grad } \psi.$$

Hierin bedeuten:

g_w [kg/m ² h]	Transportierte Wassermasse
γ [kg/m ³]	Spezifische Masse des Wassers
χ [m ² /h]	Kapillare Wasserleitzahl
ψ [m ³ /m ³]	Wassergehalt (m ³ Wasser/m ³ Material)

Die kapillare Wasserleitzahl ist in hohem Maße vom Stofffeuchtegehalt abhängig. Der Zusammenhang zwischen Wasserleitzahl und Feuchtegehalt für Porenbeton ist nach Angaben von Krischer [7] in Bild 9 dargestellt. Man erkennt, dass die Wasserleitzahl mit abnehmendem Feuchtegehalt zunächst stark abnimmt, sich dann zwischen einem Porenbetonfeuchtegehalt von etwa 50 bis 20 Volumen-% nur noch wenig ändert und unterhalb 20 Volumen-% rasch gegen Null geht. Ähnliche Zusammenhänge gelten auch für andere Baustoffe. Den Feuchtegehalt, unterhalb dessen kein nennenswerter Feuchtetransport durch Kapillarleitung möglich ist, bezeichnet man als den kritischen Feuchtegehalt [8]. Für Porenbeton liegt der kritische Feuchtegehalt zwischen 15 und 20 Volumen-%.

Physikalisch ist dieses Phänomen folgendermaßen zu erklären: Die idealisierte Vorstellung von Röhrchen mit konstantem Durchmesser, von der bei Grundüberlegungen zur Frage der Kapillarleitung ausgegangen wird, trifft bei den üblichen Baustoffen nicht zu. Vielmehr muß man annehmen, dass in porösen Baustoffen Kapillarwege durch untereinander in Verbindung stehende Hohlräume unterschiedlicher Gestalt und Größe vorhanden sind, deren Struktur von der Materialart abhängt. Ist der Materialfeuchtegehalt so groß, dass diese Kapillarwege zusammenhängend mit Wasser gefüllt sind, dann ist ein kapillarer Wassertransport in nennenswertem Umfang möglich. Mit abnehmendem Feuchtegehalt - z. B. bei Trocknung - wird der Fall eintreten, dass die größeren Hohlräume wasserfrei werden, wodurch die Kapillarwege unterbrochen werden und die kapillare Wasserleitzahl gegen Null geht. Der Feuchtegehalt, bei dem dies eintritt, ist der kritische Feuchtegehalt.

Unterhalb des kritischen Wassergehalts erfolgt der Feuchtetransport vorwiegend durch Wasserdampf-Diffusion und damit entsprechend langsamer. Nur so ist es verständlich, daß sich in Porenbeton-Außenbauteilen im Verlauf des Trocknungsprozesses innerhalb eines Feuchtegehaltes von 15 bis 20 Volumen-% größere örtliche Feuchtegradienten halten können (siehe Bilder 13 bis 15).

Ein Sonderfall des kapillaren Wassertransportes ist dann gegeben, wenn trockenes Material unmittelbar mit Wasser in Verbindung gebracht wird, wie es z. B. bei Saugversuchen an Materialproben beim Eintauchen in Wasser der Fall ist. Aus dem durch diese Randbedingung gekennzeichneten Vorgang der kapillaren Wasseraufnahme erhält man in einfacher Weise einen Kennwert, genannt Wasseraufnahmekoeffizient, der zur Beurteilung der Feuchteaufnahme von Baustoffen bei Berechnung nützlich ist [9]. Werden trockene Proben mit einer Oberfläche in Wasser eingetaucht und ermittelt man zu verschiedenen Zeitpunkten gravimetrisch die Wasseraufnahme, dann erhält man bei Darstellung der Messergebnisse, in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit, eine geradlinige Abhängigkeit, wie in Bild 10 beispielhaft für einige Baustoffe dargestellt ist. Dieser Zusammenhang wird

$$g_w = w \cdot \sqrt{t}$$

durch die Beziehung

wiedergegeben, mit den Bezeichnungen:

g_w [kg/m²]: Aufgenommene Wassermasse w [kg/m² h^{0.5}]: Wasseraufnahmekoeffizient
 t [h]: Zeit

Der so definierte Wasseraufnahmekoeffizient (oder „w-Wert“) entspricht der Steigung der Geraden in Bild 10. Bei

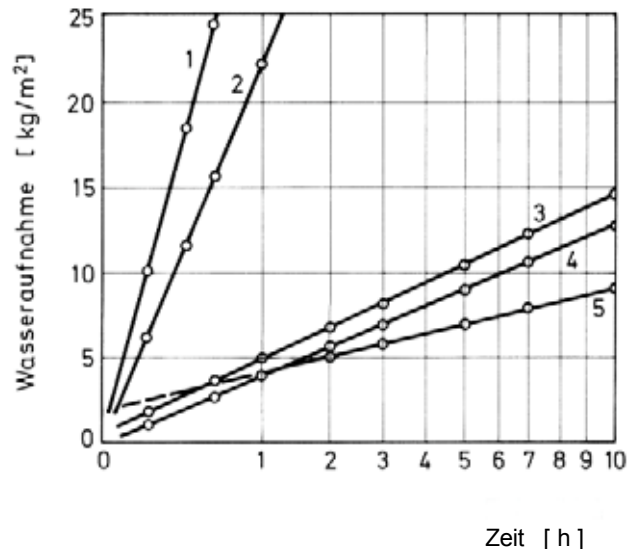


Bild 10: Kapillare Wasseraufnahme verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit der Quadratwurzel der Zeit.

- 1: Gips 1390 kg/m³
- 2: Vollziegel 1730 kg/m³
- 3: Porenbeton 640 kg/m³
- 4: Kalksandstein 1780 kg/m³
- 5: Bimsbeton 880 kg/m³

porösen Materialien ohne haufwerksporige Struktur und ohne makroskopische Risse ist das Messergebnis praktisch unabhängig davon, ob es bei einem Saugversuch oder bei einem Beregnungsversuch ohne oder mit Überdruck gewonnen wurde [9]

Die Wasseraufnahmekoeffizienten von verschiedenen Porenbetonsorten sind in Tabelle 2 zusammengestellt; sie bewegen sich zwischen den Werten 4 und 8 kg/m²h^{0.5}. Ein Vergleich mit einigen anderen Baustoffen ist auf Grund der Ergebnisse in Tabelle 3 möglich. Die Kenntnis des Wasseraufnahmekoeffizienten von Außenputzen und Beschichtungen ist wichtig, um deren Regenschutzwirkung zu beurteilen. Die experimentelle Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt nach der DIN 52617 - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.

Tabelle 2:

Kapillare Wasseraufnahme von Porenbeton verschiedener deutscher Herstellerwerke

Herstellerwerk	Rohdichte [kg/m ³]	Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² h ^{0.5}]
A	615	6,6
B	535	4,0
C	640	7,7
D	600	4,2
E	630	4,6

Tabelle 3:
Kapillare Wasseraufnahme von verschiedenen Materialien

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Wasseraufnahme- koeffizient w [kg/m ² h ^{0,5}]
Vollziegel	1560	30
Vollziegel	1730	22
Lochziegel	1070	25
Lochziegel	1710	9
Porenbeton	500-600	4-8
Kalksandvollstein	1770	4
Kalksandvollstein	1900	8
Bimsbeton	880	2,5
Bimsbeton	1070	1,5
Gips	1390	35

1.5 Formänderungen

Temperatur- und Feuchteänderungen haben bei allen Stoffen gewisse Formänderungen zur Folge.

Die mit zunehmender Temperatur auftretende Wärmedehnung ist durch die zunehmende thermische Bewegung der Moleküle bedingt. Sie erfolgt proportional zur Temperaturänderung und ist in dem im Bauwesen interessierenden Temperaturbereich unabhängig vom Temperaturniveau. Deshalb ist zur Kennzeichnung ein konstanter, linearer Wärmedehnkoeffizient α zu definieren gemäß der Beziehung

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta \theta} \text{ [K}^{-1}\text{]}$$

Dabei ist l_0 die Ausgangslänge einer Probe und Δl die Längenänderung bei der Temperaturänderung $\Delta \theta$. Bei Porenbeton rechnet man mit einem Wärmedehnkoeffizienten α von etwa $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Nicht durch einen einzigen Kennwert sind hingegen die hygrischen Formänderungen (Schwinden und Quellen) zu beschreiben. Bei zementgebundenen Baustoffen erfolgt die Schwindung bei Trocknung nicht mit der Feuchteabnahme proportional, sondern zunächst geringer und im niederen Feuchtebereich verstärkt. Meist werden Schwindkurven in Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen und nicht in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Letzteres würde mehr Aufschluss über die hygrische Verformung geben. Untersuchungen dieser Art wären wünschenswert.

Bei Porenbeton kann man mit einem Schwindmaß von 0,1 mm/m vom Anfangszustand (Entnahme aus dem Autoklaven) bis zur Ausgleichsfeuchte bei ca. 20 °C und 45% r. F. rechnen (Grenzwerte 0,05 bis 0,15 mm/m).

2. Feuchteverhältnisse in Außenbauteilen aus Porenbeton

2.1 Allgemeines zu Feuchtetransportvorgängen in Porenbeton-Bauteilen

Ein Transport von Feuchte ist in Bauteilen in flüssiger Form und in Dampfform möglich entsprechend den Kapillareigenschaften und der Dampfdurchlässigkeit der Baustoffe und der treibenden Kräfte (Feuchtegefälle, Dampfdruckgefälle). Die Dampfdurchlässigkeit von Baustoffen ist leicht zu messen und der Diffusionstransport sowie Tauwasser- und Verdunstungsmenge relativ einfach nach dem Glaserverfahren zu berechnen. Anders ist es hinsichtlich des Feuchtetransports durch Kapillarleitung: Hier gibt es kein einfaches Rechenverfahren und die Ermittlung der feuchteabhängigen Wasserleitzahl (siehe Bild 9) ist sehr aufwendig. Möglich geworden ist die rechnerische Behandlung des Kapillartransports erst durch eine neuere Arbeit von Kießl [10]. Dadurch konnten experimentelle Ergebnisse und praktische Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Feuchtetransport rechnerisch bestätigt werden.

Die Situation der seit langem möglichen einfachen Berechnung von Diffusionsvorgängen im Gegensatz zu Kapillarovorgängen führte zu einer Überbewertung des Diffusionstransports in der Praxis. In vielen Fällen - insbesondere bei monolithischen Wand- und Deckenkonstruktionen - ist der Diffusionstransport gering im Vergleich zum Transport durch Kapillarleitung. Dies ist der Grund, weshalb in Teil 3 der DIN 4108 - Klimabedingter Feuchteschutz - Bauteile mit ausreichendem Wärmeschutz aufgeführt sind, für die kein rechnerischer Tauwasser-Nachweis erforderlich ist.

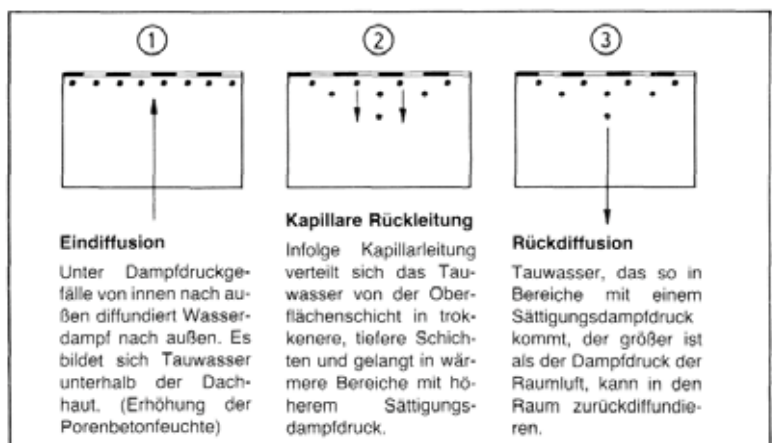
Nach Abschnitt 4.3.2.1 gilt dies z.B. für ein und zweischaliges Mauerwerk nach DIN 1053-1. Hierzu zählen Porenbeton-Plansteine und Planelemente. Ein Innenputz und ein Außenschicht wird dabei vorausgesetzt. Als Außenschicht werden unter anderem Putze, Verblendmauerwerk und angemörtelte oder angemauerte Bekleidungen genannt.

Für belüftete Dächer ist allgemein kein Tauwassernachweis erforderlich. Bei Dächern aus Porenbeton nach DIN 4223 ist auch für nicht belüftete Dächer ohne diffusionshemmende Schicht an der Unterseite und ohne zusätzliche Wärmedämmung kein Nachweis erforderlich.

Zu Konstruktionen und Anwendungsbereichen, bei denen der Feuchtetransport durch Dampfdiffusion wichtig und zu beachten ist, zählen:

- Leichtkonstruktionen mit nicht kapillarleitenden aber dampfdurchlässigen Wärmedämmschichten (z. B. Mineralfaserdämmplatten);
- Mehrschichtige, nicht belüftete Flachdächer;
- Wasserabweisende Außenputze und Kunstharzputze, bei denen durch Anschluss- und Fehlstellen Feuchtigkeit in flüssiger Form eindringen und nur durch Diffusion wieder abgeführt werden kann (Regenschutz).

Bild 11: Schematische Darstellung mit Erläuterung über den Feuchtetransport in nichtbelüfteten Porenbeton-Flachdächern.



Wie ein aus Diffusion und Kapillarleitung kombinierter Feuchte-transport erfolgt, wird am Beispiel des nichtbelüfteten Poren-
beton-Flachdaches erläutert. Man kann dabei drei Vor-
gänge unterscheiden, die in Bild 11 schematisch dargestellt
sind.

Vorgang 1 - Eindiffusion

Im Winter kann unter dem Einfluss eines Dampfdruckgefälles
von innen nach außen Wasserdampf in das Dach eindiffun-
dieren und unterhalb der Dachhaut kondensieren. Dadurch
entsteht dort eine Porenbetonschicht mit erhöhter Feuchte.

Vorgang 2 - kapillare Rückleitung

Infolge des Feuchtegefälles zwischen der feuchten Porenbe-
tonschicht unter der Dachhaut und den angrenzenden trok-
kenen Schichten erfolgt ein teilweiser Rücktransport der
Feuchte entsprechend den Eigenschaften der Kapillarleitung
(siehe Bild 9). Auf diese Weise gelangt die Feuchtigkeit in
wärmere Bereiche mit höherem Sättigungsdampfdruck.

Vorgang 3 - Rückdiffusion

Wasser, das kapillar in Bereiche mit einem Sättigungsdampf-
druck transportiert wird, der größer als der Dampfdruck der
Raumluft ist, kann in den Raum zurückdiffundieren. Durch
Sonneneinstrahlung kann der Bereich mit erhöhtem Sätti-
gungsdampfdruck zeitweilig nach unten erweitert werden.
Dieser Mechanismus gilt nicht nur für Flachdächer, sondern
auch für Außenwände mit dichten Außenbekleidungen. Die
oft gehörte pauschale Aussage „Feuchtigkeit wandert von
der warmen zur kalten Seite“ trifft somit nur mit einer gewis-
sen Einschränkung zu.

Es gibt aber noch einen weiteren Gesichtspunkt, der hinsicht-
lich des Feuchtehaushalts von Bauteilen zu berücksichtigen
ist, nämlich Vorgänge, die mit den Sorptionseigenschaften
des Materials zusammenhängen. In Abschnitt 1.2 wurde
ausgeführt, daß hygroskopische Stoffe einen Feuchtegehalt
annehmen, der vom Feuchtegehalt der umgebenden Luft
abhängt.

Kurzfristige Feuchteschwankungen der Luft können sich nur
auf die unmittelbare Oberflächenschicht eines Bauteils aus-
wirken. Bei wechselnder Feuchtigkeitsproduktion in einem
Raum wird daher der zeitliche Verlauf der Luftfeuchte durch
das Ausmaß der Absorption bzw. Desorption der Oberflä-
chenschicht beeinflusst. Bei Feuchtigkeitsproduktion in einem
Raum, hervorgerufen z. B. durch die Anwesenheit von Per-
sonen oder durch das Kochen, ist die Zunahme der Luft-
feuchte bei stark absorptionsfähigen Oberflächen (z. B. Pa-
piertapeten, Holzverkleidung) geringer als bei Oberflächen
mit kleiner bzw. nicht vorhandener Absorptionsfähigkeit
(z. B. Kunststofftapeten, Ölfarbe, Keramikfliesen). Über
diese kurzfristigen Feuchteschwankungen in den Ober-
flächenschichten hinaus können sich langfristige Feuchte-
schwankungen auch auf die tiefen Wand- bzw. Decken-
schichten auswirken, sofern die innere Oberflächenschicht
entsprechend durchlässig ist. Solche langfristigen Feuchte-
schwankungen treten z. B. in beheizten Räumen im Wech-
sel zwischen winterlichen und sommerlichen Bedingungen
auf: Im Winter liegt die relative Raumluftfeuchte wegen der
niedrigen absoluten Feuchtigkeit der Außenluft in beheizten
Räumen in der Regel zwischen 30 und 50%; im Sommer
zwischen 60 und 70%. Diese langfristigen Schwankungen
der Raumluftfeuchte beeinflussen entsprechend den Sorp-
tionseigenschaften des Materials den Feuchtegehalt von
Bauteilen und überlagern die beschriebenen Vorgänge der
Kapillarleitung und Dampfdiffusion. Wie in Abschnitt 2.5.1
dargelegt wird, kann der Einfluss der Sorption bei Porenbe-
ton-Flachdächern größer sein als der Einfluss der Dampfdif-
fusion.

Diese Vorbemerkung zum Abschnitt Feuchteverhältnisse in
Außenbauteilen aus Porenbeton soll erkennen lassen, wie
komplex die Einflüsse und Mechanismen sind, die den
Feuchtehaushalt von Bauteilen bestimmen und dass einsei-
tige Betrachtungen - wie z. B. über die Dampfdiffusion allein
- keine ausreichende Bewertung erlauben. Die im Folgenden
dargelegten Ergebnisse stammen vorwiegend aus praxisna-
hen Untersuchungen in der Freilandversuchsstelle Holzkir-
chen oder an ausgeführten Bauten.

2.2 Austrocknung (Baufeuchte)

In früheren Zeiten war die Baufeuchtigkeit ein besonderes
Problem. Bedingt durch die dickeren Wände und die weniger
intensive Beheizung - oft wurde nur ein Raum beheizt -
dauerte es viele Jahre, bis eine Wohnung „trockengewohnt“
war. Bei den heutigen Bau- und Wohnverhältnissen kann
man davon ausgehen, dass sich die erhöhte Anfangsfeuchte
im Verlauf von ein bis zwei Jahren so weit reduziert hat, dass
keine wesentlichen Auswirkungen mehr zu spüren sind. Bild
12 zeigt - etwas schematisiert - die Trocknungsverläufe
zweier Außenwände und eines nichtbelüfteten Flachdaches
aus Porenbeton. Die beidseitig mit handelsüblichen, wasser-
dampfdurchlässigen Beschichtungen versehene Außenwand
trocknet stetig aus, anfangs rascher, später langsamer
(Kurve A in Bild 12). Die außenseitig dicht abgesperrte

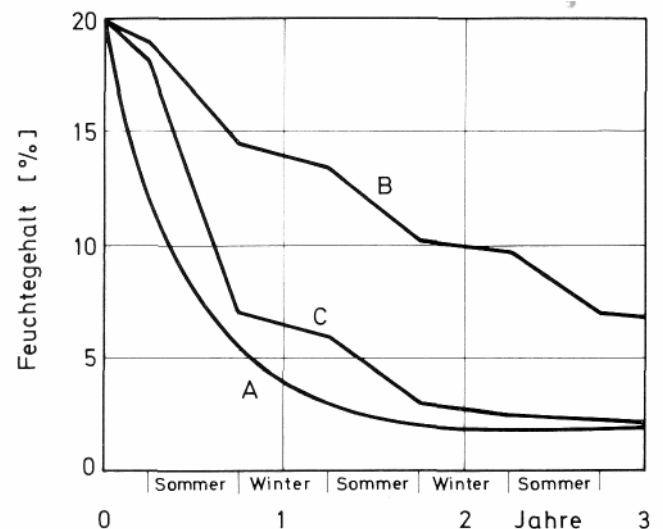


Bild 12: Trocknungsverläufe von Porenbeton-Außenbauteilen auf
Grund von Messungen in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen.

- A: Außenwand beidseitig mit Kunststoff-Beschichtung, nach außen
und innen verdunstungsfähig, selten geregnet (Ostwand).
- B: Außenwand (Nordwand), nach außen dicht abgesperrt, nur nach
innen verdunstungsfähig.
- C: Nichtbelüftetes Flachdach, nur nach innen verdunstungsfähig. In
den angrenzenden Räumen herrschten im Winter etwa gleiche
raumklimatische Verhältnisse (20 °C, 40-50% r. F.).

Außenwand und das nichtbelüftete Flachdach trocknen je-
weils im Sommer rascher und im Winter langsamer. Die
Tatsache, dass auch im Winter entgegen dem vorhandenen
Dampfdruckgefälle nach außen eine Feuchteabgabe nach
innen möglich ist, ist auf den in Abschnitt 2.1 erläuterten
Mechanismus einer kombinierten Kapillarleitung und Dampf-
diffusion zurückzuführen. Die starke Auswirkung der Beson-
nung ist aus einem Vergleich der Trocknungsverläufe der
kaum besonnten Nordwand und des Flachdaches ersichtlich
(vergleiche Kurven B und C in Bild 12). Die im Verlauf der
Trocknung über den Querschnitt von Außenwänden bzw.
Dächern sich einstellenden Feuchteverteilungen sind aus
den Darstellungen in den Bildern 13-15

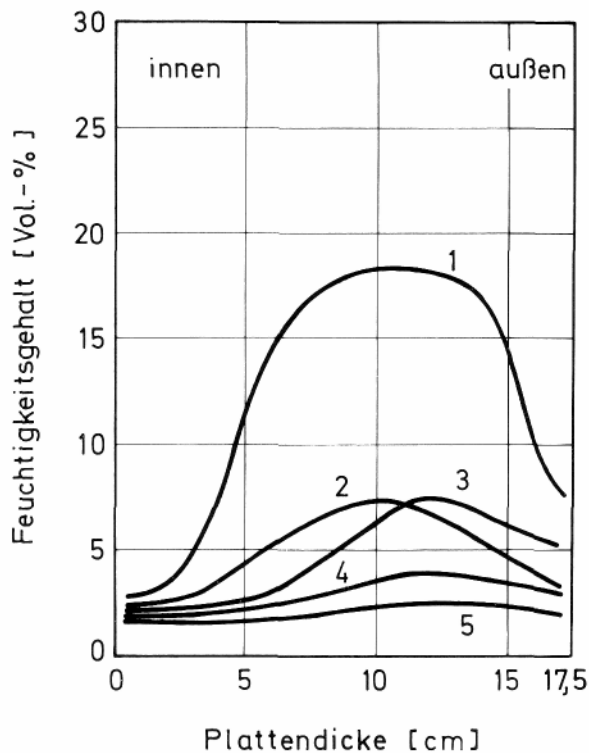


Bild 13: Verteilung der Feuchtigkeit in der Außenwand mit beidseitiger Kunststoff-Beschichtung (Ostwand) zu verschiedenen Zeitpunkten.

- 1: am Ende des 1. Winters
- 2: am Ende des 1. Sommers
- 3: am Ende des 2. Winters
- 4: am Ende des 2. Sommers
- 5: am Ende des 3. Sommers

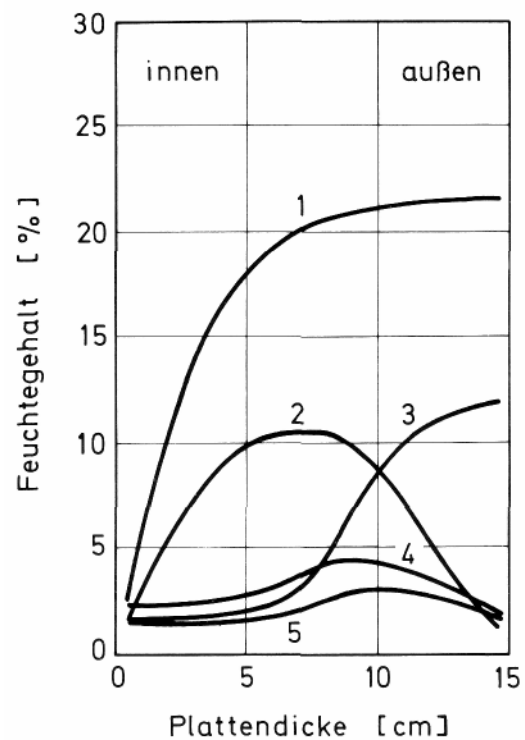


Bild 15: Verteilung der Feuchtigkeit in einem unbelüfteten Flachdach aus Porenbeton zu verschiedenen Zeitpunkten.

- 1: am Ende des 1. Winters
- 2: am Ende des 1. Sommers
- 3: am Ende des 2. Winters
- 4: am Ende des 2. Sommers
- 5: am Ende des 3. Winters

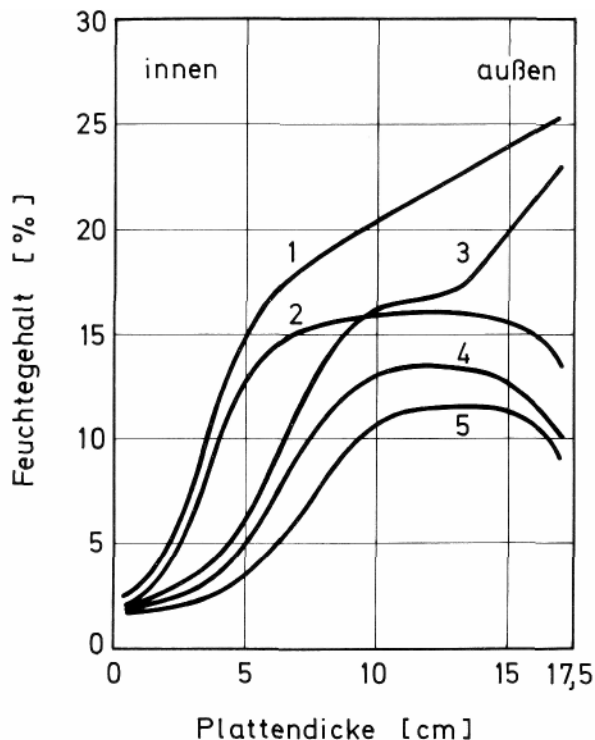


Bild 14: Verteilung der Feuchtigkeit in einer Außenwand aus Porenbetonelementen mit außenseitig dichtem Abschluss (Nordwand) zu verschiedenen Zeitpunkten. 1: am Ende des 1. Winters 2: am Ende des 1. Sommers 3: am Ende des 2. Winters 4: am Ende des 2. Sommers 5: am Ende des 3. Sommers

ersichtlich. Bei der an beiden Oberflächen „diffusionsoffenen“ Außenwand nimmt der Feuchtegehalt nach beiden Seiten hin ab (Bild 13). Bei der außenseitig dicht abgesperrten Außenwand zeigt sich ein deutlich erhöhter Feuchtegehalt auf der Außenseite (Bild 14). Die Besonnung bewirkt beim Flachdach jeweils in den Sommerperioden eine Feuchtigkeitsverlagerung zur Innenseite hin und damit eine raschere Trocknung (Bild 15).

Da die außenseitig dichte, nach Norden orientierte Außenwand den ungünstigsten Fall der Trocknungsbedingungen darstellt (praktisch keine direkte Besonnung), kann man davon ausgehen, dass zwischen den Kurven A und B in Bild 12 die Trocknungsverläufe von Außenbauteilen aus Porenbeton unter den vielfältigen Randbedingungen in der Praxis liegen. Dies wird durch Messungen an Außenwänden und Flachdächern von bewohnten Gebäuden bestätigt, wie aus Bild 16 hervorgeht.

2.3 Feuchteeinwirkung von innen (Wohnfeuchte)

Durch das Wohnen - durch die Feuchteabgabe der Menschen, durch Kochen, Waschen, Baden - entsteht Feuchtigkeit, die man zusammengefasst als Wohnfeuchte bezeichnet und die die raumklimatischen und wohngygienischen Verhältnisse unmittelbar beeinflusst. Im Gegensatz zu der Baufeuchte, die nur vorübergehend und nur bei Bauten oder Baustoffen auftritt, bei deren Herstellung Wasser erforderlich ist und im Gegensatz zu der Regenfeuchte, die durch bauliche Maßnahmen abgewendet werden muss, hängt das Entstehen und das Abführen der Wohnfeuchte entscheidend vom Verhalten der Bewohner ab. Man vergegenwärtige sich einmal, auf welche verschiedene Arten Feuchtigkeit in Wohnungen produziert wird. Dass durch Kochen und Waschen Feuchtigkeit entsteht, ist jedem klar. Dass aber der Mensch

oder auch Zimmerpflanzen stetig Feuchtigkeit abgeben - siehe Tabelle 4 - wird weniger berücksichtigt. Diese Feuchtigkeit muß durch Lüften über die Fenster oder Lüftungsvorrichtungen nach außen abgeführt werden.

Tabelle 4:
Feuchtigkeitsabgabe (Verdunstung) in Wohnungen

Mensch, leichte Aktivität	30 -40 g pro Stunde
Trocknende Wäsche (4,5 kg Trommel) geschleudert tropfnass	50 -200 g pro Stunde 100 -500 g pro Stunde
Zimmerblumen	5- 10g pro Stunde
Topfpflanzen	7- 15 g pro Stunde
Mittelgroßer Gummibaum	10- 20 g pro Stunde
Freie Wasseroberfläche (Aquarium)	ca. 40 g pro Quadratmeter und Stunde

Falsches Lüften und sparsames Heizen führt heute nicht selten zu Feuchteschäden (Tauwasser, Schimmelbildung), die früher bei weniger sparsamem Heizen und größerem Luftwechsel infolge undichter Fenstern nicht bekannt waren. Tauwasser kann dabei unmittelbar an den Oberflächen oder in vermindertem Maße im Inneren von Konstruktionen auftreten.

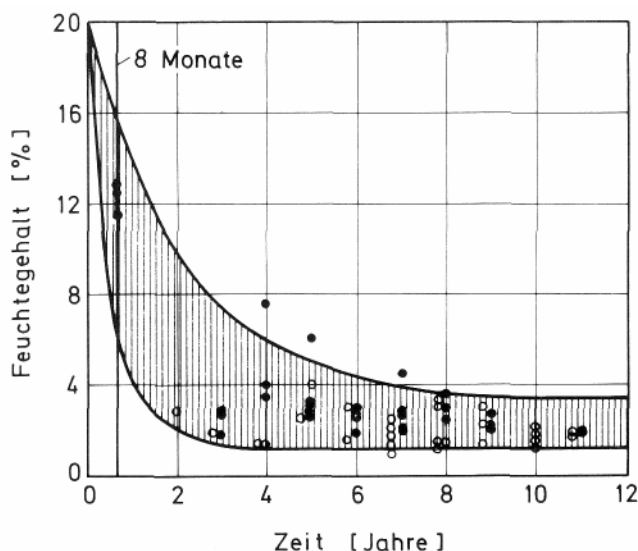


Bild 16: Zeitlicher Verlauf der Austrocknung von Porenbeton-Außenbauteilen (Außenwände und Flachdächer).

Der Anfangsverlauf des angegebenen Bereiches stammt von Messungen an Außenwänden auf dem Versuchsgelände Holzkirchen (untere Begrenzung: beidseitig verdunstungsfähige Außenwand; obere Begrenzung: außenseitig dicht abgesperrte Außenwand, nur nach innen verdunstungsfähig).

Punkte: Messwerte von Gebäuden in der Praxis [4], [11]

- Außenwände
- Flachdächer

2.3.1 Oberflächen-Tauwasser

Warme Luft kann mehr Wasser in Form von unsichtbarem Wasserdampf aufnehmen als kalte Luft. Der Zusammenhang zwischen der maximal möglichen Wasserdampf-Aufnahme und der Temperatur der Luft wird durch die Taupunktkurve in Bild 17 dargestellt. Wäre dieser Zusammenhang nicht so, dann gäbe es auf unserer Erde weder Regen noch Tau und damit kein Leben. Diese Taupunktkurve ist allerdings auch dafür verantwortlich, dass Schweißwasser an Wänden

Tauwasserbildung

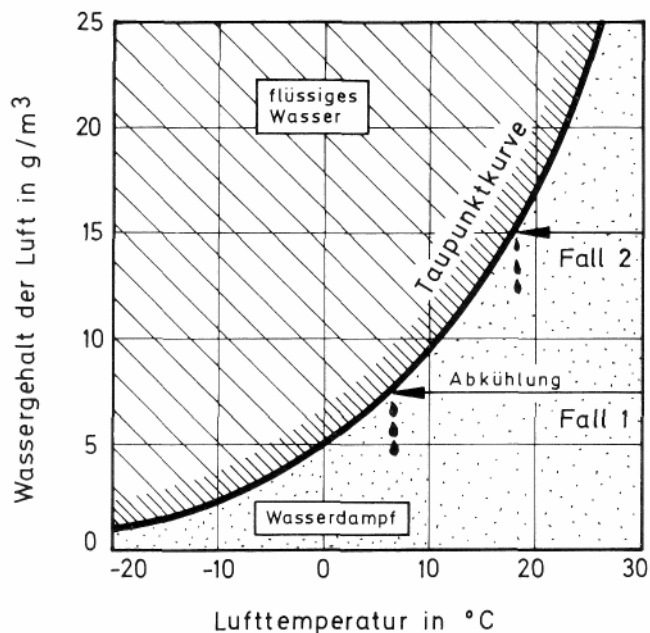


Bild 17: Entstehen von Tauwasser durch Abkühlen feuchter Luft. Fall 1: Luft mit einem Wassergehalt von $7,5 \text{ g/m}^3$ erreicht bei 6°C den maximalen Wassergehalt (Taupunkt), bei weiterer Abkühlung fällt flüssiges Wasser aus.

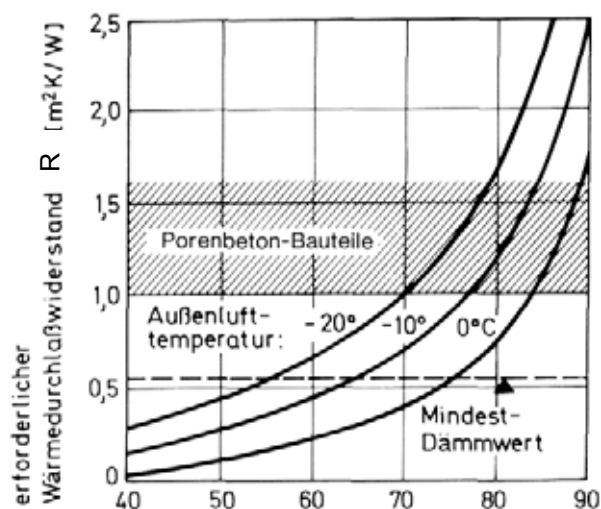
Fall 2: Luft mit einem Wassergehalt von 15 g/m^3 kann nur bis $17,5^\circ\text{C}$ abgekühlt werden, bis der Taupunkt erreicht ist.

entsteht, das eine Voraussetzung für Schimmelpilzbildung in Wohnungen ist.

Der Sättigungsgrad der Luft wird durch die relative Feuchte angegeben. Wird Luft mit einer bestimmten relativen Feuchte abgekühlt, dann steigt der Sättigungsgrad bis die maximale Sättigung entsprechend der Taupunktkurve erreicht ist. Bei weiterer Abkühlung fällt Tauwasser aus. Je größer der Feuchtegehalt der Luft ist, desto eher ist der Fall erreicht, wie in Bild 17 dargestellt ist.

Um Tauwasserbildung in Wohnungen zu vermeiden, sind daher hohe Oberflächentemperaturen der raumumschließenden Flächen und/oder niedrige Werte der Luftfeuchte anzustreben. Das erstere erfordert eine entsprechende Wärmedämmung in Verbindung mit ausreichender Beheizung, das zweite hängt von der Feuchtigkeitsproduktion in der Wohnung und von der Lüftung ab. Bei der hohen Wärmedämmung von Porenbeton-Außenbauteilen ist die Bildung von Oberflächentauwasser bei üblichen, „normalen“ Wohnverhältnissen nicht zu erwarten. Mit mindestens 20 bis 25 cm dicken Wänden aus bewehrten Porenbetonplatten oder aus Porenbetonsteinen sind Wärmedurchlasswiderstände zwischen etwa $1,0$ und $1,6 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ zu erreichen. Wie aus Bild 18 zu ersehen ist, ist in solchen Fällen erst bei Werten der relativen Luftfeuchte über 70 bis 80% -je nach Außenlufttemperatur bzw. Bauteilart - mit Tauwasserbildung zu rechnen. Solche Verhältnisse treten langfristig nur im Industriebau auf, wenn produktionsbedingt eine erhöhte Raumluftfeuchte erforderlich ist. In diesen Fällen wird dann sicherheitshalber eine erhöhte Wärmedämmung (größere Bauteildicke) vorzusehen sein, abhängig von der produktionsbedingten Feuchtebelastung.

Da beim Bauen mit Porenbeton als monolithischem Wandbildner bei richtiger Ausführung keine nachteiligen konstruktiven Wärmebrücken auftreten, sind Oberflächentauwasser in



rel. Raumluftfeuchte [%]

Bild 18: Erforderlicher Wärmedurchlasswiderstand von Außenbauteilen, um Tauwasserbildung an der Innenoberfläche zu vermeiden in Abhängigkeit von der rel. Raumluftfeuchte bei 20 °C Raumlufttemperatur und für verschiedene Werte der Außenlufttemperatur ($h_i = 8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, $h_e = 23 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$). Mit Porenbeton sind bereits bei einer Wanddicke von 24 cm Wärmedurchlasswiderstände zwischen 1,1 und 2,7 $\text{m}^2\text{K/W}$ zu erreichen. Dabei werden Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,09 und 0,21 W/(mK)

Wohnungen und Folgeschäden wie Schimmelbildung in der Regel auf mangelhaftes Heizen und Lüften zurückzuführen.

2.3.2 Innere Kondensation

Zwischen Tauwasserbildung an einer Oberfläche und im Inneren einer Konstruktion besteht kein genereller Unterschied, sondern nur ein gradueller. Dies wird am Beispiel einer 30 cm dicken, verputzten Porenbetonwand erläutert. Unter den in Bild 19 angegebenen Randbedingungen tritt an dieser Wand bei 82% rel. Luftfeuchte Oberflächentauwasser auf. Die Menge des kondensierten Wassers nimmt mit zunehmender Luftfeuchte rapid zu; sie ist nur abhängig vom Wasserdampf-Übergangskoeffizienten. Unterhalb einer rel. Luftfeuchte von 82% tritt die Tauwasserbildung innerhalb der Porenbetonwand auf. Die Kondensationszone wandert mit abnehmender Luftfeuchte in der Wand von innen nach außen, wie im unteren Diagramm in Bild 19 zu erkennen ist. Bei 26% r. F. diffundiert Wasserdampf durch die Wand hindurch ohne Tauwasserbildung. Aus dem oberen Diagramm in Bild 19 ist ersichtlich, dass im Gegensatz zur Oberflächenkondensation die Menge des Tauwassers im Inneren nur geringfügig mit sinkender Luftfeuchte abnimmt. Dies ist dadurch zu erklären, dass mit der Verlagerung der Kondensationszone von innen nach außen sowohl die Dampfdruckdifferenz bis zu dieser Zone, als auch der Diffusionswiderstand zunehmen. Die entstehende Tauwassermenge ist vom Verhältnis dieser beiden Werte abhängig.

Zu erkennen ist auch, dass die bei -10 °C Außenlufttemperatur im Wandinneren auftretende Tauwassermenge im Vergleich zur Wasseraufnahmefähigkeit von Porenbeton gering ist. Dies erklärt nochmals, warum diffusionstechnische Berechnungen bei Porenbetonwänden bzw. bei Mauerwerk im Allgemeinen nicht erforderlich sind.

2.4 Feuchteeinwirkung von außen (Schlagregen)

2.4.1 Beanspruchungsgruppen und Anforderungen

Die Regenbeanspruchung einer Außenwand nimmt mit der Niederschlagsmenge und mit der Windgeschwindigkeit zu. In

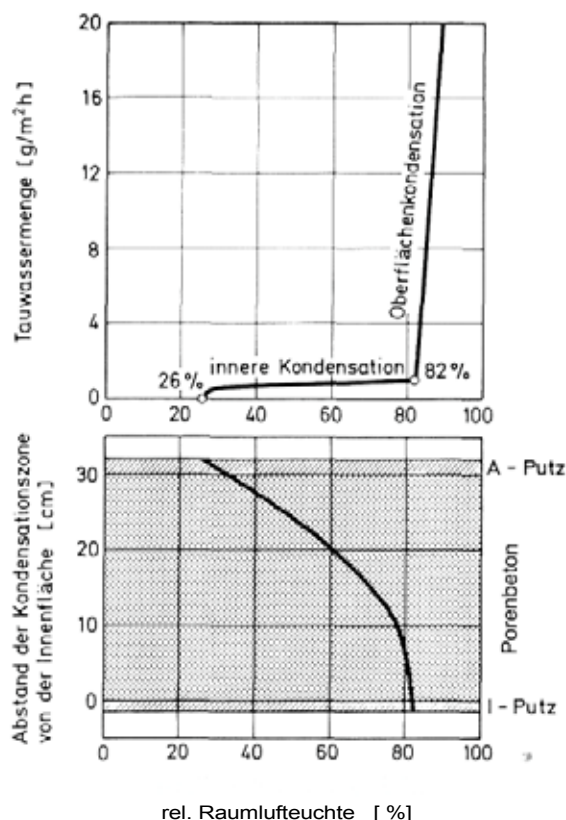


Bild 19: Abhängigkeit der Tauwassermenge und der Lage der Kondensationszone von der rel. Raumluftfeuchte bei einer 30 cm dicken, verputzten Porenbetonwand, Raumlufttemperatur 20 °C, Außenlufttemperatur -10 °C.

Weitere Annahmen bei der Berechnung:

$h_i = 6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, $h_e = 23 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, $R \text{ Porenbeton} = 1,36 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ (μ -Werte: Innenputz (15 mm) : 15

Außenputz (20 mm) : 35

Porenbeton (300 mm) : 6

niederschlagsreichen und windreichen Gebieten ist daher die Schlagregenbeanspruchung besonders groß. Im Einzelfall beeinflussen aber die regionale Landschaftsstruktur, die Bebauung und der Bewuchs in der Nähe eines Gebäudes - zusammenfassend als Umgebungsbedingungen zu bezeichnen - die Windverhältnisse entscheidend. Schon das hinsichtlich der Schlagregenbeanspruchung zu beurteilende

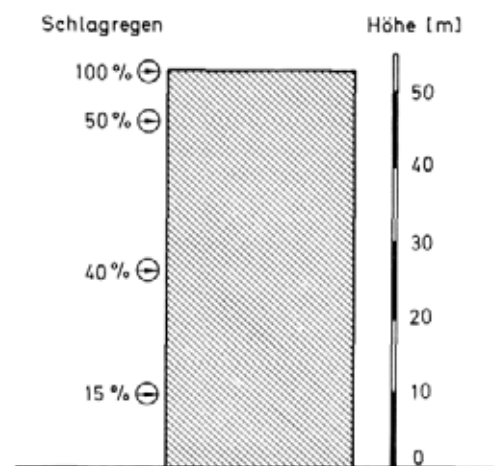


Bild 20: Verteilung der Schlagregenmenge an der dem Wetter ausgesetzten Fassadenfläche eines Gebäudes mit 53 m Höhe. Die am höchsten Punkt der Fassade gemessene Schlagregenmenge wurde = 100% gesetzt.

Gebäude stört die Windverhältnisse; es muss umströmt werden. Dadurch treten in Gebäudenähe andere Strömungsrichtungen und Geschwindigkeiten auf als im ungestörten Bereich vor dem Gebäude. Durch die Umströmung wird die Schlagregenbelastung an den Rändern - oben wie seitlich - größer als im übrigen Fassadenbereich. Das hierdurch bedingte Ausmaß der unterschiedlichen Schlagregenbeanspruchung einer Fassade zeigen die in Bild 20 dargestellten Messergebnisse, gewonnen an einem hohen Gebäude am Stadtrand von München. Danach sind die oberen Stockwerke des Hochhauses ungleich stärker durch Schlagregen beansprucht als die mittleren und unteren. Wegen der großen Bedeutung der jeweiligen Umgebungseinflüsse ist es nicht sinnvoll, regionale „Schlagregenzonen“ festzulegen. Um neben den großräumigen meteorologischen Verhältnissen die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigen zu können, wurden zur Beurteilung der Schlagregenbeanspruchung in DIN 4108 Teil 3 Beanspruchungsgruppen folgendermaßen definiert:

Beanspruchungsgruppe I

Geringe Schlagregenbeanspruchung: Im allgemeinen Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen unter 600 mm sowie besonders windgeschützte Lagen auch in Gebieten mit größeren Niederschlagsmengen.

Beanspruchungsgruppe II

Mittlere Schlagregenbeanspruchung: Im allgemeinen Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen von 600 bis 800 mm sowie windgeschützte Lagen auch in Gebieten mit größeren Niederschlagsmengen. Hochhäuser und Häuser in exponierten Lagen in Gebieten, die auf Grund der regionalen Regen- und Windverhältnisse einer geringen Schlagregenbeanspruchung zuzuordnen wären.

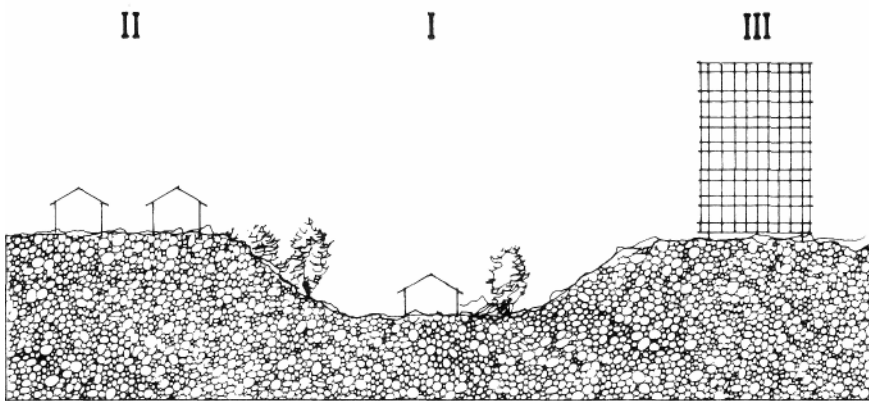
Beanspruchungsgruppe III

Starke Schlagregenbeanspruchung: Im allgemeinen Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen über 800 mm sowie windreiche Gebiete auch mit geringeren



Bild 21: Schlagregenbeanspruchung nach DIN 4108-3.

Beanspruchungsgruppe



Niederschlagsmengen (z. B. Küstengebiete, Mittel- und Hochgebirgslagen, Alpenvorland). Hochhäuser und Häuser in exponierten Lagen in Gebieten, die auf Grund der regionalen Regen- und Windverhältnisse einer mittleren Schlagregenbeanspruchung zuzuordnen wären. Zur Beurteilung der regionalen, klimatischen Bedingungen ist in DIN 4108 Teil 3 eine Regenkarte enthalten (Bild 21). Wie die Höher- oder Rückstufung in der Bewertung der Schlagregenbeanspruchung gemeint ist, wird durch die schematische Darstellung in Bild 22 verdeutlicht.

Der Regenschutz für eine Außenwand soll entsprechend der Schlagregenbeanspruchung gewählt werden. Ist diese gering (Beanspruchungsgruppe I), dann sind keinerlei Maßnahmen des Regenschutzes erforderlich. Unverputztes, geschlammtes oder irgendwie beschichtetes Mauerwerk ist dann ausreichend. Bei Beanspruchungsgruppe III - starke Schlagregenbeanspruchung - sind hingegen geeignete Maßnahmen mit Sorgfalt zu wählen und auszuführen. Diese können im Aufbringen eines wasserabweisenden Putzes bestehen, zweckmäßigerweise aus Werkmörtel, oder durch vorgesetzte Wandschalen oder Bekleidungen erreicht werden. In der Mehrzahl der Fälle wird Beanspruchungsgruppe II

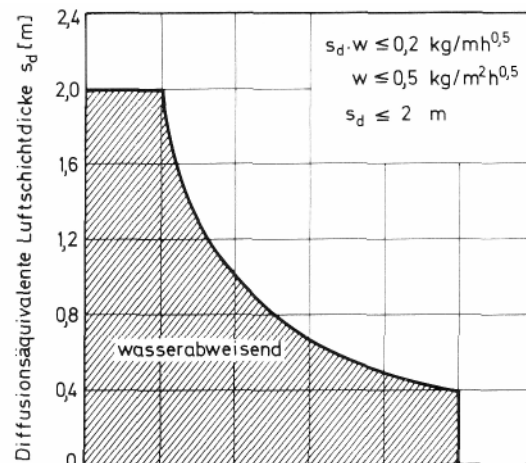
- mittlere Schlagregenbeanspruchung - zutreffen mit Maßnahmen des Regenschutzes, die keinen besonderen Aufwand bedeuten.

Beispiele für die Zuordnung von genormten Wandbauarten und den Beanspruchungsgruppen enthält DIN 4108 Teil 3. Im norddeutschen Küstengebiet mit starker Schlagregenbeanspruchung hat sich speziell die zweischalige Bauart als geeignet erwiesen. Um den Wärmeschutz zu erhöhen, wird heute vielfach die Luftschicht mit einem Wärmedämmstoff ausgefüllt (Kerndämmung). Dies ist bei Verwendung hierfür zugelassener Dämmstoffe möglich. Die Ausführung mit Schalenfuge ist schadensanfällig und deshalb zu vermeiden (siehe Bild 23).

2.4.2 Realisierung des Regenschutzes

Neben zweischaligem Verblendmauerwerk nach DIN 1053, angemauerten oder angemörtelten Bekleidungen und hinterlüfteten Bekleidungen nach DIN 18515 bzw. DIN 18516 sind wasserhemmende und wasserabweisende Außenputze die hauptsächlich angewandten Maßnahmen zur Realisierung des erforderlichen Regenschutzes. Wasserhemmende Außenputze, die für Beanspruchungsgruppe II ausreichen, sind Putze nach DIN 18550 Teil 1, für die bei entsprechender Zusammensetzung kein gesonderter Nachweis erforderlich ist.

0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Q6



Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$]

Bild 24: Anforderungen an wasserabweisende Außenputze nach DIN 18550. Putze gelten als wasserabweisend, wenn die Koordinaten w und s_d innerhalb des schraffierten Bereiches liegen.

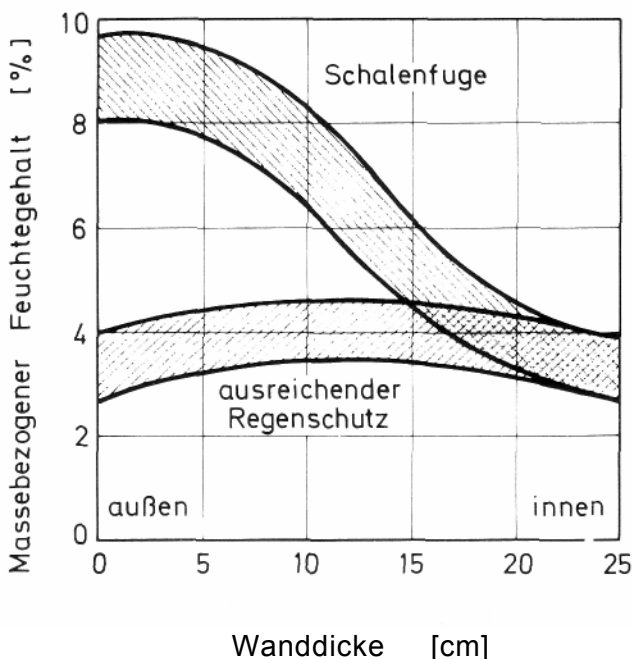


Bild 23: Feuchteverteilung in schlagregenbeanspruchtem Porenbetonmauerwerk bei Verblendmauerwerk mit Schalenfuge und bei Mauerwerk mit Putz bzw. hinterlüfteter Bekleidung als Regenschutz nach Messungen an ausgeführten Bauten.

Bei wasserabweisenden Außenputzen, die für Beanspruchungsgruppe III ausreichen, müssen die den Regenschutz hauptsächlich bewirkende Putzlage (oder Putzlagen) die in Bild 24 dargestellten Anforderungen hinsichtlich Wasseraufnahmekoeffizient w und diffusionsäquivalenter Luftschichtdicke s_d erfüllen. Diese Anforderungen beinhalten folgendes:

1. Je größer der Wasseraufnahmekoeffizient ist, desto kleiner muß der Diffusionswiderstand (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d) sein, damit die aufgenommene Feuchtigkeit wieder abgegeben werden kann. Dies wird beschrieben durch die Anforderung $s_d \cdot w \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$. Der Wert $0,2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ ist empirisch ermittelt worden und gilt für starke Schlagregenbeanspruchung.
2. Der Wasseraufnahmekoeffizient soll einen gewissen Wert nicht überschreiten, auch wenn die Austrocknung langfristig gesichert wäre, um eine kurzfristige Feuchtigkeitserhöhung bei Beregnung zu begrenzen, daher $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$.
3. Bei sehr kleiner Wasseraufnahme ($w \leq 0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$) wären nach der generellen Anforderung 1 relativ große Diffusionswiderstände des Außenputzes zulässig. Da aber mit gewissen Fehlstellen im Putz gerechnet werden muss, wird die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke beschränkt auf $s_d \leq 2 \text{ m}$.

Aus Bild 25 ist die Wirkung eines wasserabweisenden Putzes, der die genannten Anforderungen erfüllt, im Vergleich zu einem üblichen Putz auf einer Porenbetonwand zu erkennen. Die von Porenbeton-Herstellern empfohlenen oder gelieferten Außenputze sind in der Regel wasserabweisend eingestellt. Bei der Verwendung solcher Putze sind von vornherein Fehler bei der Wahl der Beanspruchungsgruppe zu vermeiden und die volle Wärmedämmfähigkeit des Porenbetonmauerwerks sichergestellt. Weitere Hinweise über Putze mit mineralischen und organischen Bindemitteln sind in Abschnitt 3 enthalten.

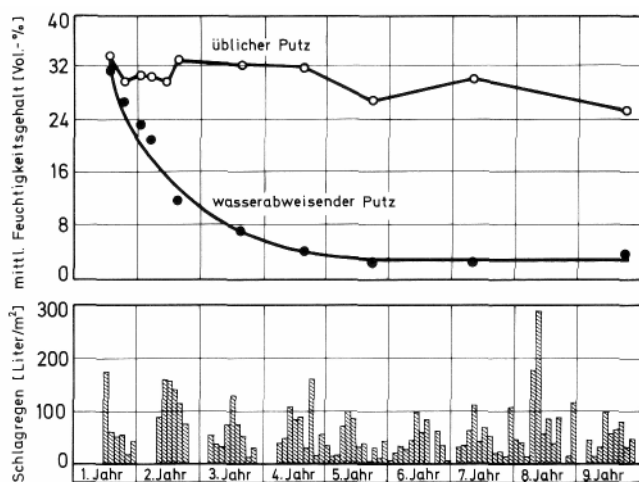


Bild 25: Mittlerer Feuchtegehalt einer nach Westen orientierten Porenbetonwand mit wasserabweisendem Putz bzw. üblichem Putz im Verlauf von 9 Jahren mit Angabe der Schlagregenbeanspruchung. Untersuchungen an einem beheizten Versuchsgebäude in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen.

2.5 Feuchteverhältnisse in nichtbelüfteten Porenbeton-Flachdächern

Ein Flachdach besteht im Allgemeinen aus einer tragenden Schicht, einer Dampfsperre, einer Wärmedämmschicht und einer Dachhaut. Das besondere beim Porenbeton-Flachdach ist, dass sowohl die tragende als auch die wärmedämmende

Funktion durch ein Material, nämlich bewehrte Porenbetonplatten, erfüllt werden. Eine Dampfsperre ist nicht erforderlich, sondern lediglich eine Dachabdichtung. Ein Porenbeton-Flachdach ist somit eine denkbar einfache Konstruktion. Belüftete Flachdächer unterscheiden sich bauphysikalisch nicht von Wänden mit hinterlüfteten Bekleidungen. Es gibt dabei keine Probleme. Über die Feuchteverhältnisse bei nichtbelüfteten Porenbeton-Flachdächern ohne und mit zusätzlicher Wärmedämmschicht (einschichtige bzw. zweischichtige Porenbeton-Flachdächer) wird im folgenden berichtet.

2.5.1 Porenbeton-Flachdächer ohne Zusatzdämmung

In Abschnitt 2.1 wurde bereits der Feuchtetransport in Außenbauteilen aus Porenbeton allgemein erläutert. Es wurde dargelegt, daß Diffusionsvorgänge im Vergleich zu anderen Mechanismen des Feuchtetransports von geringerer Bedeutung sind, weshalb nach DIN 4108 Teil 3 für Porenbeton-Flachdächer kein rechnerischer Nachweis über den Tauwasserausfall infolge von Dampfdiffusion erforderlich ist. Die Erfahrungen und Kenntnisse über die Feuchteverhältnisse in Porenbeton-Flachdächern stammen neben Untersuchungen in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen aus Messungen an ausgeführten Bauten in der Praxis.

Zur Ermittlung der Feuchteverhältnisse in Porenbeton-Flachdächern unter praktischen Bedingungen wurden am Beginn und Ende einer Heizperiode jeweils aus den gleichen Dächern Proben zur Feuchtebestimmung entnommen (Winter 1965/66 und 1967/68), [11]. Erfaßt wurden insgesamt 32 Flachdächer aus bewehrten Porenbeton-Dachplatten mit einer Dicke zwischen 7,5 cm und 17,5 cm, die über Wohnräumen, Werkstätten und Fabrikationshallen lagen. Die Unterseite der Porenbetondachplatten war unbehandelt oder mit einem nicht dampfsperrenden Anstrich versehen. Die klimatischen Verhältnisse in den Innenräumen unterhalb der Dächer sind durch Messungen der Lufttemperatur und Luftfeuchte ermittelt worden. Die Räume waren teils temperiert, teils intermittierend beheizt oder ständig klimatisiert. Einige Räume (z. B. Wäschereien, Industrierräume) besaßen eine erhöhte Luftfeuchte. Das Baualter der überprüften Dächer lag zwischen 3 und 11 Jahren (im Mittel 7 Jahre).

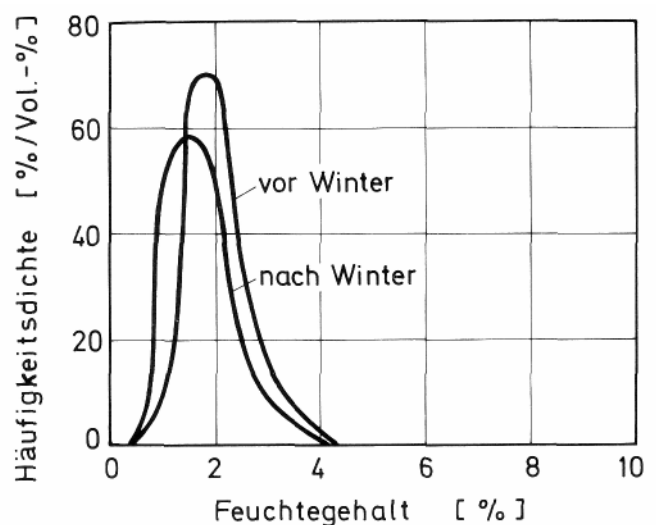


Bild 26: Verläufe der Häufigkeitsdichten des mittleren Feuchtegehaltes der in der Praxis überprüften Porenbetondächer vor und nach der winterlichen Heizperiode. Der häufigste Wert des Porenbetonfeuchtegehaltes (Maximum der Kurven) ist vor dem Winter etwas höher als nach dem Winter.

Die statistische Auswertung der Meßergebnisse, die vor und nach der Winterperiode gewonnen wurden, erbrachte folgende kennzeichnende Werte:

Feuchtegehalte, die in 90% aller Fälle nicht überschritten wurden 3,0 Vol.-%

Feuchtegehalte, die in 50% aller Fälle zutrafen (häufigste Werte) 1,9 Vol.-%

Allgemein wurde für Außenbauteile aus Porenbeton (Außenwände und Flachdächer) einheitlich ein praktischer Feuchtigkeitsgehalt von 3,5 Vol.-% festgelegt¹⁾.

Eine gesonderte Betrachtung der an den überprüften Dächern vor und nach der Winterperiode ermittelten Werte ergab die in Bild 26 dargestellte Häufigkeitskurve. Danach war der Porenbeton - überraschenderweise - nach dem Winter im Mittel geringfügig trockener als vor dem Winter. Statt der zu erwartenden Erhöhung der Porenbetonfeuchte durch Eindiffundieren und Kondensieren von Raumlufffeuchte ist im statistischen Mittel eine Abnahme der Porenbetonfeuchte aufgetreten. Dies ist auf eine Überlagerung der Diffusionsvorgänge durch Sorptionsvorgänge zurückzuführen, die bei den gegebenen Bedingungen offensichtlich eine größere Auswirkung hatten als die erstgenannten Diffusionsvorgänge. In Abschnitt 2.1 wurde bereits auf die Gegenläufigkeit der beiden Vorgänge hingewiesen. Dass auch in Räumen mit produktionsbedingt höherer Raumlufffeuchte keine unzulässig hohen Feuchtegehalte im Porenbeton auftreten, ist aus Tabelle 5 zu entnehmen. Ergänzende Untersuchungen an einem Versuchsdach in der Versuchsstelle Holzkirchen bei unterschiedlich hoher Luftfeuchte im angrenzenden Raum bestätigen, dass nichtbelüftete Porenbetondächer bis zu einer rel. Luftfeuchte von stän-

Tabelle 5: Raumluffbedingungen im Winter in Fabrikationsräumen, in denen produktionsbedingt höhere Werte der Raumlufffeuchte eingehalten wurden sowie Messwerte des mittleren Feuchtegehalts von Porenbeton-Flachdächern vor und nach der Winterperiode.

Art des Betriebes, Ort	mittlere Luft- temperatur [°C]	mittlere rel. Luft- feuchte [%]	mittlerer Porenbeton- feuchtegehalt [Vol. -%]	
			vordem Winter	nachdem Winter
Strumpffabrik, Horstmar	21	46	2,2	2,3
Strumpffabrik, Neustadt/Lahn	22	60	2,6	3,1
Strumpffabrik, Landsberg	21	46	1,0	1,2
Spinnerei, Etringen	21	48	1,8	1,5
Druckerei, Dorsten	21	53	2,5	2,5
Papierfabrik, Isny	20	55	2,6	2,2

dig 60% bei 20 °C Raumlufftemperatur Anwendung finden können. Es kann zwar dann im Winter eine gewisse Feuchtigkeitserhöhung auftreten, die aber im Laufe des Sommers wieder zurückgeht. Bei höheren Werten der Luftfeuchte ist dies nicht mehr gesichert der Fall (siehe Bild 27).

¹⁾ Dieser Wert ist derzeit in DIN 4108 Teil 4 enthalten. Zu erwarten ist eine Umstellung auf Masse-% bzw. ein Ersatz der praktischen Feuchte durch die Sorptionsfeuchte.

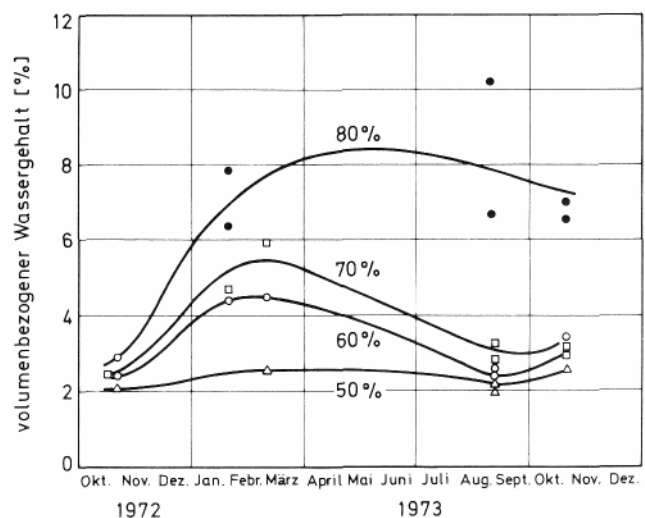


Bild 27: Zeitliche Verläufe des mittleren Feuchtegehaltes eines 15 cm dicken Porenbeton-Flachdaches während einer Jahresperiode (November 1972 bis Oktober 1973) in Dachbereichen mit unterschiedlicher rel. Feuchte der angrenzenden Luft (50% bis 80%). Zum Teil wurden zwei Einzelmessungen an verschiedenen Dachstellen vorgenommen.

2.5.2 Porenbeton-Flachdächer mit Zusatzdämmung

Bei einschichtigen Porenbeton-Flachdächern hängt die Wärmedämmung von der Dicke der bewehrten Porenbetondachplatten ab. Aus wirtschaftlichen Erwägungen wird im allgemeinen eine Dicke von 25 cm nicht überschritten. Wenn eine größere Wärmedämmung gewünscht wird, besteht die Möglichkeit, auf die Dachplatten zusätzlich Wärmedämmplatten (z. B. Hartschaumplatten) aufzubringen. Nach Untersuchungen sowohl an ausgeführten Bauten als auch im definierten Freilandversuch ist dabei eine Dampfsperre zwischen den Porenbetondachplatten und den Wärmedämmplatten nicht erforderlich [16]. Zur Bestätigung dieser Aussage dienen die

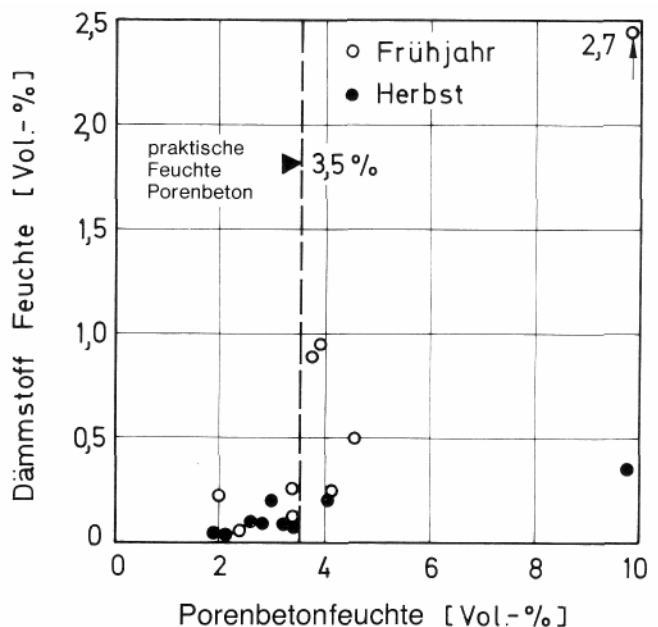


Bild 28: Feuchtegehalte der Dämmschichten in Abhängigkeit von den mittleren Feuchtegehalten der Porenbetondecken aufgrund der Messungen an ausgeführten Bauten im Frühjahr und Herbst.

Nach Erreichen des praktischen Feuchtegehalts des Porenbetons waren die Feuchtegehalte der Dämmschichten niedrig und Feuchteänderungen zwischen Frühjahr und Herbst gering.

Mittelwerte Dämmstoff-Feuchte Herbst: 0,10 Vol.-%
Frühjahr: 0,65 Vol.-%

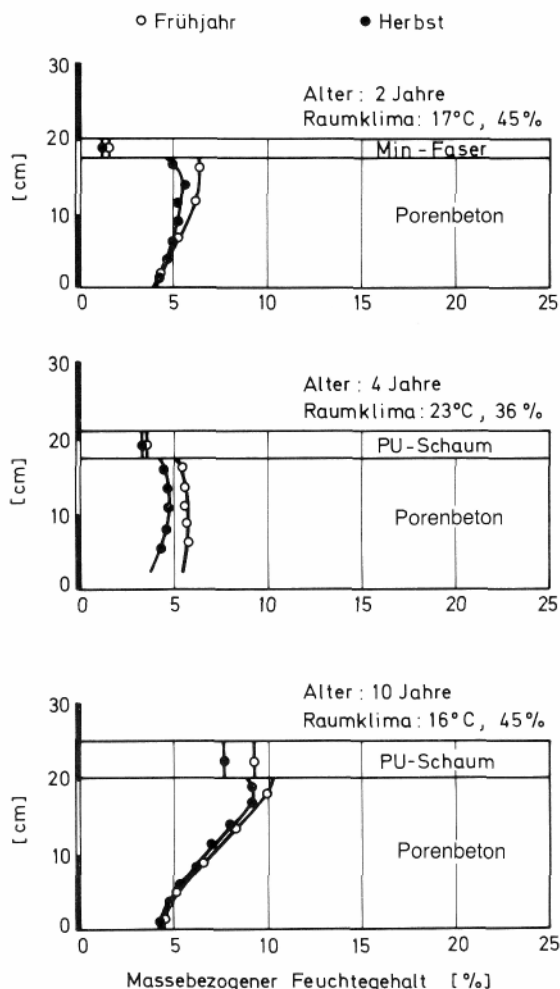


Bild 29: Feuchteverteilung in der Porenbetondecke und mittlere Feuchte in der oberseitigen Dämmschicht, jeweils im Herbst und Frühjahr, bei drei Objekten unterschiedlichen Alters.

in Bild 28 dargestellten Ergebnisse des Dämmstoff-Feuchtegehalts von ausgeführten Porenbeton-Flachdächern mit Zusatzdämmung, jeweils ermittelt im Herbst und Frühjahr. Die Messungen wurden mehrheitlich an Objekten mit normaler Nutzung durchgeführt (Wohnungen, Büros). Die Dächer waren bei der Überprüfung zwischen 2 und 10 Jahre alt, im Mittel 5 Jahre alt. Man erkennt aus Bild 28, daß bei Feuchtegehalten des Porenbetons um oder unter dem praktischen Feuchtegehalt die Dämmstoff-Feuchte gering ist und so gut wie keine Feuchteänderungen des Dämmstoffes zwischen Herbst und Frühjahr auftreten. Merkbare Feuchteänderungen des Dämmstoffes sind nur bei erhöhter Porenbetonfeuchte festzustellen. Beispielhaft sind im Bild 29 die Feuchteverteilung im Porenbeton und in der oberseitigen Dämmschicht bei drei Objekten unterschiedlichen Alters dargestellt.

3. Außenputze, Bekleidungen

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Das Aussehen - „die Fassade“ - eines Gebäudes ist ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Auswahl von Putz, Beschichtung oder Bekleidung von Außenwänden. Nicht minder wichtig ist aber der Witterungsschutz der Fassade, der den Regenschutz, die Frostbeständigkeit und das Alterungsverhalten einschließt.

Über den Regenschutz von Außenputzen gibt es seit dem Vorliegen der Neufassungen der DIN 4108 (Wärmeschutz im

Hochbau) und der DIN 18550 (Putz, Begriffe und Anforderungen) Bewertungskriterien, wie in Abschnitt 2.4 ausgeführt. Voraussetzung dabei ist, dass sich die Wasseraufnahme und die Wasserdampf-Durchlässigkeit der Putze nicht im Laufe der Zeit nachteilig verändern (Erhöhung der Wasseraufnahme bzw. des Diffusionswiderstands). Durch Rissbildungen im Putz kann sich z. B. die Wasseraufnahme in wesentlich stärkerem Maße erhöhen als der Diffusionswiderstand reduziert wird. Dadurch kann beim Wechsel von Beregnung und Trocknung ein „Aufschaukeln“ der Wandfeuchte entstehen, wodurch eine merkliche Minderung der Wärmedämmung oder auch Feuchtedurchschlag bedingt sein können.

Neben Anforderungen an den Regenschutz sind daher auch Anforderungen an dessen dauerhafte Funktionsfähigkeit zu stellen. Dies bedeutet, dass eine gewisse Beständigkeit gegen Alterung (Versprödung, Rissanfälligkeit) gegeben sein soll. Diese Alterung ist zweifellos bei mineralisch gebundenen Putzen mit größerem E-Modul und höherer Festigkeit anders zu bewerten als bei Kunstharzputzen mit temperaturabhängigem E-Modul und einem plastischen Verformungsanteil. Versuche zur Formulierung von Bewertungskriterien für das Alterungsverhalten von mineralisch und organisch gebundenen Putzen waren bisher leider nicht erfolgreich. Trotz eingehender Untersuchungen konnte bisher kein eindeutiger Zusammenhang zwischen thermomechanischen Eigenschaften von Putzen (Wärmedehnkoeffizient, E-Modul und Festigkeit) und deren Schadensanfälligkeit gefunden werden [12, 17]. Daher ist man auf diesem Gebiet weiterhin auf praktische Erfahrungen und davon abgeleitete empirische Aussagen angewiesen.

Für Außenputze und Beschichtungen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Ausführung. Entweder muss die gesamte aufgetragene Schicht eine solche Festigkeit haben, dass auftretende Spannungen aufgenommen werden können (Putze nach DIN 18550, Beschichtungen mit Gewebeamierung), oder müssen mögliche Bewegungs- oder Dehnungsfugen so behandelt werden, dass die auftretenden Bewegungen möglich sind (plastoelastische Stoffe).

3.2 Außenputze nach DIN 18550

Aus der Zeit des Mauerns mit kleinformatischen Steinen und Bruchsteinen hat sich die Meinung überliefert, dass ein Mauer- und Putzmörtel umso besser ist, je mehr Bindemittel er enthält. Wer gute Arbeit leisten wollte, hat eher etwas mehr Zement verwendet als zu wenig. Vorrangiger Gesichtspunkt war dabei die Tragfähigkeit einer Wand, die „Wandstärke“, die in der Regel mit der Dicke zugenommen hat. Deshalb spricht man heute noch häufig von Wandstärke, wenn die Dicke gemeint ist.

Das einseitige Festigkeitsdenken hat in der Anfangszeit der Verwendung von Porenbeton zu vielen Putzschäden geführt. Heute weiß man, dass dies keine porenbetonspezifische Eigenschaft war, sondern dass das Verputzen von wärmedämmendem Mauerwerk allgemein mit größerer Sorgfalt bei der Materialauswahl und der handwerklichen Ausführung erfolgen muss als bei den früher üblichen Mauerwerksarten. Die größere Wärmedämmung führt zu größeren Temperaturschwankungen und damit größeren thermischen Spannungen im Außenputz.

Hinzu kommt, dass Mauerwerk aus kleinformatischen Steinen (Vollziegelformat) eher einen „homogenen“ Putzgrund liefert als Mauerwerk aus großformatigen Hohl- oder Vollblocksteinen. Rissbildungen längs der großformatigen Blocksteine sind auf unterschiedliche Formänderungen von Stein und Fugenmörtel zurückzuführen. Diese unterschiedlichen Formänderungen bzw. die dadurch induzierten Spannungen müssen

durch die Putzschicht aufgenommen werden, die ihrerseits keine zusätzlichen „Eigenspannungen“ in das Mauerwerkssystem einbringen soll. Hierunter sind „weiche“, an den Porenbeton angepasste Putzsysteme zu verstehen, ggf. mit Leichtzuschlägen. Ratsam ist die Verwendung von Werkmörteln, die gleichmäßige und erprobte Mischungsverhältnisse gewährleisten. Es gibt eine ganze Reihe von Werkmörteln, die speziell für Porenbeton als Putzgrund entwickelt worden sind. Insbesondere wenn wasserabweisende Putze vorgesehen sind, sind Werkmörtel zu verwenden. Auch Baustellenmörtel nach DIN 18550, Teil 2 kann zur Anwendung kommen.

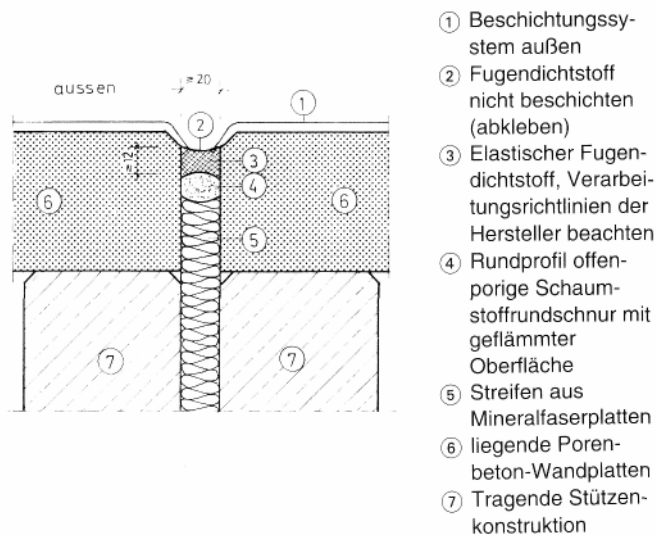
Beim Verputzen von Porenbeton ist zu beachten, dass Maßnahmen zur Feuchthaltung des mineralischen Putzmörtels zu berücksichtigen sind. Bei trockenem Wetter kann es zweckmäßig sein, den Untergrund und die späteren Putzla-

gen anzufeuchten. Dies ist auch erforderlich, wenn ein Spritzbewurf aufgebracht werden soll. Des weiteren ist ein Schutz gegen zu raschen Wasserentzug infolge Besonnung oder Wind wichtig (siehe auch DIN 18550 Teil 2). Das unmittelbare Aufbringen von Kunstharzputzen auf Planblockmauerwerk hat sich nicht bewährt, wenn es auch bei der Ebenheit des Putzgrundes möglich erscheint. Deshalb ist nach DIN 18550 Teil 1 ein mineralischer Unterputz der Mörtelgruppe PII erforderlich vor dem Aufbringen eines Kunstharzputzes nach DIN 18558.

3.3 Beschichtungen, Fugenausbildung

Bei Wandflächen aus großformatigen Porenbeton-Wandplatten sind größere Bewegungen der Plattenfugen zu erwarten als bei den Fugen im Mauerwerk. Deshalb ist ein Überputzen der Gesamtfläche nicht zweckmäßig, sondern ein Ausbilden

a) Fugen mit dichtender Funktion bei größerer Zug- und Druckbeanspruchung, z. B. Gebäudetrennfuge:



b) Fugen mit dichtender Funktion bei geringer Zug- und Druckbeanspruchung, z. B. Vertikalfugen bei liegenden Wandplatten:

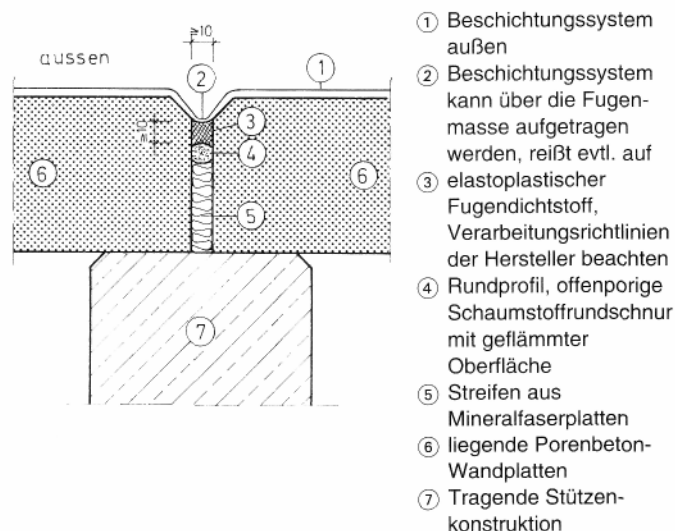


Bild 30: Schematische Darstellung der Fugenausbildung bei Porenbeton-Wandplatten nach [18].

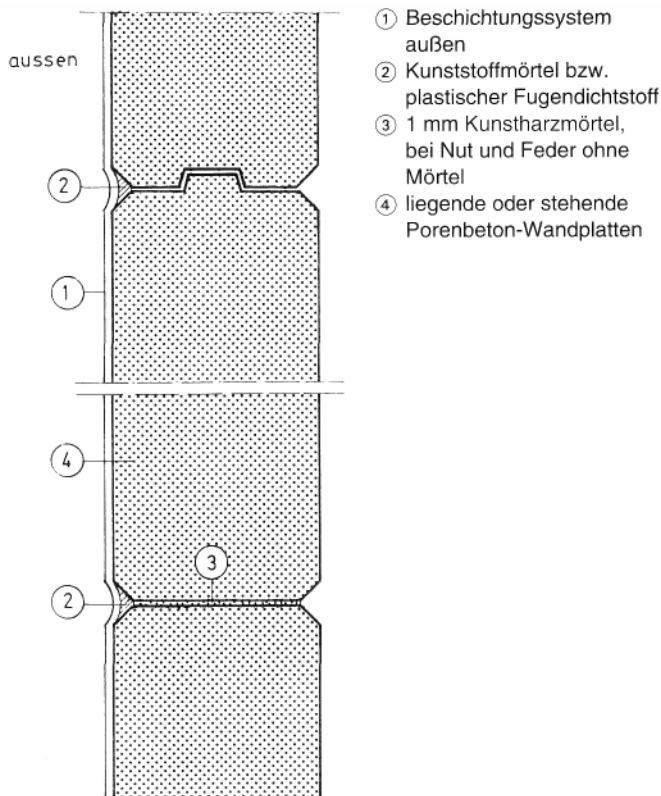


Bild 31: Schematische Darstellung der Ausbildung der Fugen mit nur dichtender Funktion, wie z. B. Horizontalfugen bei liegenden oder Vertikalfugen bei stehenden Wandplatten [18]

der Plattenfugen als sichtbare Fuge. Die Platten selbst müssen außen mit einem geeigneten Beschichtungssystem versehen werden. In Bild 30 und 31 ist die Fugenausbildung schematisch dargestellt.

3.4 Bekleidungen

Vorgesetzte, hinterlüftete Bekleidungen - wie Holzverschalungen und Schindeln aller Art - bilden einen guten Regenschutz für die Außenwand und ergeben keine Probleme hinsichtlich der Abgabe der Wandfeuchte (Baufeuchte). Durch angemörtelte oder angemauerte Bekleidungen nach DIN 18515 ist bei sorgfältiger Ausführung ebenfalls ein guter Schlagregenschutz möglich. Fehlstellen in der Fugenausführung können aber leicht zu einem Mißverhältnis zwischen der Wasseraufnahme bei Beregnung und der Möglichkeit der Wiederabgabe führen, was eine erhöhte Wandfeuchte zur Folge haben kann. Derartige Bekleidungen werden daher von den Porenbetonherstellern nicht empfohlen. Der große Fugenanteil bei keramischen Bekleidungen in unmittelbarem Zusammenhang mit saugfähigem Mauerwerk bildet einen größeren Risikofaktor hinsichtlich des Schlagregenschutzes als eine geschlossene Putzschicht oder eine durchgehende Luftschicht bei vorgesetzten Bekleidungen. Auch zweischalige Wände ohne Luftschicht (mit Schalenfuge) sind offensichtlich anfällig für Ausführungsmängel. Jedenfalls ist bei solchen Außenwänden häufiger erhöhte Wandfeuchte bei berechneten Außenwänden festzustellen als bei Wänden mit anderem Regenschutz (siehe Bild 23).

4. Wärmeschutz und Temperaturverhältnisse

4.1 Allgemeines zu Wärmedämmung, Wärmespeicherfähigkeit und Heizenergieverbrauch

4.1.1 Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände

In DIN 4108 Teil 2 sind Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände von Bauteilen angegeben (dort Tabelle 1). Diese Mindestwerte sind aus Gründen der Hygiene und Behaglichkeit bzw. zum Schutz der Konstruktion einzuhalten. Die Werte sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Der Mindestwärmedurchlasswiderstand $R = 1,00 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ für Außenwände ist zur Vermeidung von Tauwasser an den Innenoberflächen gefordert. Dieser Wert - bzw. eine dem Mindestwert entsprechende Oberflächentemperatur - soll auch an ungünstigen Stellen gegeben sein, z. B. auch im Bereich von Wärmebrücken. Ecken zwischen Außenwänden mit gleichartigem Aufbau sind in diesem Sinne nicht als Wärmebrücken zu behandeln.

Für ans Erdreich grenzende Böden und Böden über Durchfahrten werden relativ hohe Mindestwerte gefordert, um ausreichende Fußwärme zu gewährleisten ($R = 0,9 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ bzw. $R = 1,75 \text{ m}^2 \text{ K/W}$).

Die höheren Werte für Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen ($R = 0,9 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) und Flachdächer ($R = 1,20 \text{ m}^2 \text{ K/W}$) dienen zur Reduzierung thermischer Schubkräfte von Massivdecken und damit zur Vermeidung von Bauschäden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Wärmedämmung auf der Oberseite der Massivdecken angeordnet wird.

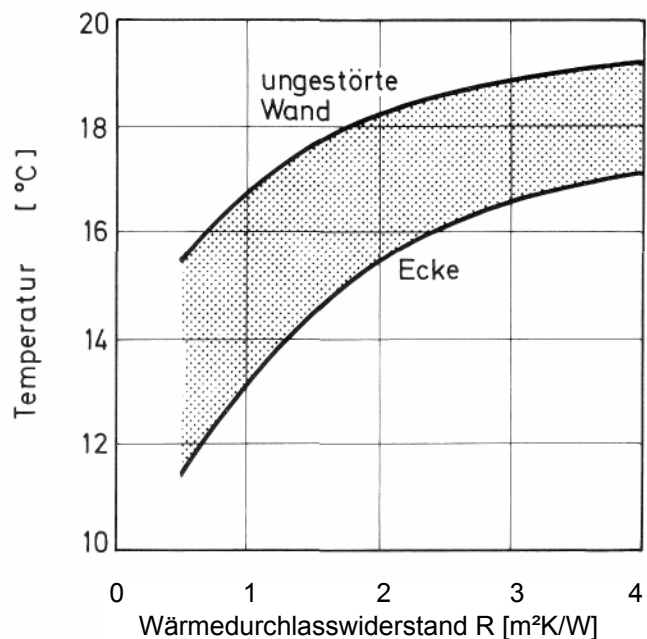


Bild 32: Oberflächentemperaturen an einer ungestörten Außenwandoberfläche und in einer Ecke zwischen zwei Außenwänden in Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand der Wand bei 20 °C Raumlufttemperatur und -10 °C Außenlufttemperatur. Im Bereich zwischen beiden Kurven (punktiert) dürften die Oberflächentemperaturen in bewohnten Räumen bei konvektiver Raumerwärmung liegen.

4.1.2 Wärmedämmung und Beheizung

Je größer die Wärmedämmung (Wärmedurchlasswiderstand) eines Bauteiles, desto höher ist dessen raumseitige Oberflächentemperatur bei Beheizung. Der oft dargestellte Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Wärmedämmung gilt nur für ungestörten konvektiven Wärmeübergang vom Heizkörper zur Wand- oder Deckenfläche und für ungestörte - theoretisch unendlich ausgedehnte - Bauteilflächen (siehe obere Kurve in Bild 32). Nun ist aber jedes Bauteil begrenzt. Zwischen zwei Außenwänden entsteht eine Ecke; Außenwände sind durch Fenster unterbrochen. Eckbereiche, Fensterlaibungen und Fensterstürze beeinflussen den Wärmedurchgang; sie wirken als Wärmebrücken. Durch Möbel an Außenwänden wird die konvektive Erwärmung der Wand

stark beeinträchtigt. Schließlich hat auch die Raumgeometrie und die Anordnung und Art der Heizkörper einen Einfluss auf die Luftumwälzung in einem beheizten Raum und damit auf die konvektive Erwärmung von Außenbauteilen. All dies hat zur Folge, dass zwischen der Oberflächentemperatur und der Wärmedämmung kein eindeutiger Zusammenhang besteht. Man kann davon ausgehen, dass bei einer vorgegebenen Wärmedämmung die Oberflächentemperaturen in einem Bereich zwischen den optimalen Verhältnissen bei ungestörten Flächen liegt und den Verhältnissen in Ecken, die unvermeidlich und in jedem Raum vorhanden sind. Dieser Bereich ist in Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand in Bild 32 dargestellt. Möbel an Außenwänden können noch niedrigere Oberflächentemperaturen bewirken als entsprechend Bild 32.

Tabelle 6: Mindestwerte der Wärmedurchlasswiderstände R von Bauteilen nach DIN 4108-2

Bauteile			Wärmedurchlass- widerstand, R m ² • K/ W
1	Außenwände; Wände von Aufenthaltsräumen gegen Bodenräume, Durchfahrten, offene Hausflure, Garagen, Erdreich		1,2
2	Wände zwischen fremdgenutzten Räumen; Wohnungstrennwände		0,07
3	Treppenraumwände	zu Treppenträumen mit wesentlich niedrigeren Innentemperaturen (z. B. indirekt beheizte Treppenträume); Innentemperatur $\theta \leq 10\text{ °C}$, aber Treppenraum mindestens frostfrei	0,25
4		zu Treppenträumen mit Innentemperaturen $\theta \geq 10\text{ °C}$ (z. B. Verwaltungsgebäuden, Geschäftshäusern, Unterrichtsgebäuden, Hotels, Gaststätten und Wohngebäude)	0,07
5	Wohnungstrenndecken, Decken zwischen fremden Arbeitsräumen; Decken unter Räumen zwischen gedämmten Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen		0,35
6	in zentralbeheizten Bürogebäuden		0,17
7	Unterer Abschluss nicht unterkellerten Aufenthaltsräume	unmittelbar an das Erdreich bis zu einer Raumtiefe von 5m	0,90
8		über einen nicht belüfteten Hohlraum an das Erdreich grenzend	
9	Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen; Decken unter bekriechbaren oder noch niedrigeren Räumen; Decken unter belüfteten Räumen zwischen Dachschrägen und Abseitenwänden bei ausgebauten Dachräumen, wärmegeämmte Dachschrägen		1,75
10	Kellerdecken; Decke gegen abgeschlossene, unbeheizte Hausflure u. ä.		
11.1	Decken (auch Dächer), die Aufenthaltsräume gegen die Außenluft abgrenzen	nach unten, gegen Garagen (auch beheizte), Durchfahrten (auch verschließbare) und belüftete Kriechkeller ^a	1,2
11.2		nach oben, z. B. Dächer nach DIN 18530, Dächer und Decken unter Terrassen; Umkehrdächer nach 5.3.3. Für Umkehrdächer ist der berechnete Wärmedurchgangskoeffizient U nach DIN EN ISO 6946 mit den Korrekturwerten nach Tabelle 4 um ΔU zu berechnen.	

^a Erhöhter Wärmedurchlasswiderstand wegen Fußkälte.

^a Erhöhter Wärmedurchlasswiderstand wegen Fußkälte.

An kalten Wandoberflächen (Wärmebrücken) kann bekanntlich Tauwasser und nachfolgend Schimmelbildung auftreten. Durch hohe Wärmedämmung allein ist dies - wie aus diesen Darlegungen hervorgeht - nicht unbedingt zu vermeiden. Oft können durch andere Beheizung oder Umstellen der Möbel Schäden vermieden werden.

4.1.3 Wärmespeicherfähigkeit

Hohe Wärmespeicherfähigkeit, die oft gleichgesetzt wird mit massiver, schwerer Bauweise, hat in unserem Land einen großen Stellenwert. Dies ist durch die geschichtliche Entwicklung zu erklären. Unsere Tradition ist der Mauerwerksbau, während z. B. in Skandinavien früher der Holzbau vorherrschte. Ein solides Haus war für unsere Vorfahren ein Haus aus massiven, dicken Wänden. Die damit verbundene große Wärmespeicherfähigkeit hatte Vorteile bei der früheren Einzelofenheizung mit unvergleichbar schlechterer Regelbarkeit als bei unseren modernen Heizanlagen. Eine Überheizung konnte durch Wärmeaufnahme der Speichermassen in Grenzen gehalten werden und nach Verlöschen des Ofenfeuers wurde die Wärme wieder an den Raum zurückgegeben. Die raumklimatischen Verhältnisse waren dabei wohl nicht vergleichbar mit denen, die wir heute fordern bzw. als selbstverständlich annehmen, aber sicher besser als in Bauten mit geringerer Wärmespeicherfähigkeit. Die Bedeutung und der Wert der Wärmespeicherung ist in der temperatursausgleichenden Wirkung zu sehen. Dies gilt nicht nur für die Verhältnisse im Winter, sondern auch für das Raumklima unter sommerlichen Bedingungen. Der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Heizenergieverbrauch ist hingegen gering, wie im Folgenden dargelegt wird. In einem Raum mit großer Wärmespeicherfähigkeit ist es auch nach Abschalten der Heizung noch einige Zeit angenehm warm. Aus der Tatsache, dass dies ohne unmittelbaren Heizaufwand der Fall ist, wird oft der Schluss gezogen, dass große Wärmespeicherfähigkeit auch energiesparend ist. Dieser Schluss ist aber falsch. Die Wärme, die nach Abschalten der Heizung an den Raum zurückgeliefert wird, muss zuvor aufgewendet und gespeichert werden. Es liegen sowohl experimentelle als auch theoretische Untersuchungen vor, die eindeutig darlegen, dass der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Heizenergieverbrauch von untergeordneter Auswirkung ist (z. B. [13, 14]). Diese Auswirkung ist in zweifacher Hinsicht möglich: Einmal bei intermittierendem Heizen (Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur) zum anderen bei der Nutzung der durch Fenster eingestrahlteten Sonnenenergie.

Bei intermittierendem Heizen ist eine geringe Wärmespeicherfähigkeit energetisch günstiger. Bei gleichem k-Wert einer Wand und gleicher mittlerer Außenlufttemperatur ist die Wärmetransmission durch die Wand nur von der mittleren Raumlufttemperatur abhängig. Diese ist aber in Räumen mit geringer Wärmespeicherfähigkeit kleiner als in Räumen mit großer Wärmespeicherfähigkeit, da im ersten Fall die Temperatur nach Abschalten der Heizung rascher und tiefer absinkt (siehe Bild 33).

Im Zusammenhang mit der Möglichkeit der Solarenergienutzung in einfacher Weise, nämlich der Nutzung der durch große Fensterflächen eingestrahlteten Sonnenwärme, ist eine große Wärmespeicherfähigkeit positiv zu bewerten. Bei Sonneneinstrahlung steigt dann die Raumlufttemperatur langsamer an als bei geringer Speicherfähigkeit (siehe Bild 34). Die Differenz entspricht der von der Speichermasse aufgenommenen Wärme, die später wieder abgegeben werden kann. Die beiden möglichen Einspareffekte auf Grund der Wärmespeicherfähigkeit - durch intermittierendes Heizen und durch Solarenergienutzung - sind somit gegenläufig und insgesamt

gering. In beiden Fällen liegen sie in der Größenordnung von 5% bis 10%. Eine eindeutige Bewertung ist nicht möglich. Im Einzelfall kann je nach den gegebenen Bau- und Heizverhältnissen der Vorteil oder Nachteil der Wärmespeicherfähigkeit auf den Heizenergieverbrauch überwiegen. Über die Temperaturverhältnisse unter sommerlichen Bedingungen wurden Untersuchungen in Wohngebäuden schwerer und leichter Bauart durchgeführt [15]. Auch dabei bestätigte sich die temperatursausgleichende Wirkung der Wärmespeicherfähigkeit: In Häusern schwerer Bauart (Mauerwerk) waren die Schwankungen der Raumlufttemperatur zwischen Tag und Nacht kleiner als in Häusern leichter Bauart (Holz-Fertighäuser). Der Unterschied ist jedoch nicht groß. Von größerem Einfluss auf das sommerliche Raumklima sind die Größe und Orientierung der Fenster bzw. ein geeigneter Sonnenschutz der Fenster.

Generell kommt es bei diesen Betrachtungen mehr auf die Wärmespeicherfähigkeit der innenliegenden Bauteile an

(Zwischenwände, Decken) als auf diejenigen der Außenwände, die rein flächenmäßig einen kleineren Anteil ausmachen.

Porenbeton ist weder zu den schweren noch zu den leichten Baustoffen zu zählen. Die Verwendung dieses Baustoffes führt daher zu günstigen Verhältnissen hinsichtlich der Wärmespeicherfähigkeit und zur Vermeidung extremer Verhältnisse in der einen oder anderen Richtung.

4.2 Wärmeschutz durch Außenbauteile aus Porenbeton

Bis auf einen Mindestwärmeschutz gemäß DIN 4108-2 zur Erhaltung technischer und hygienischer Standards sowie bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen stellt die Energieeinsparverordnung keine Anforderungen an die Wärmedämmung von Außenbauteilen. Trotzdem spielt die Wärmedämmung von Außenbauteilen eine maßgebende Rolle bei der Umsetzung der Anforderungen der EnEV. Porenbeton besitzt als massiver Baustoff eine hohe Wärmedämmung. Verantwortlich hierfür ist seine porige Struktur. Das Resultat sind äußerst niedrige Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $\lambda = 0,09 \text{ W/(mK)}$ für Porenbeton-Plansteine PPW bei einer Rohdichte von 350 kg/m^3 . Eine 30 cm dicke, beidseitig verputzte monolithische Porenbetonwand weist dann einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ auf. Wird die Wanddicke aus statischen, energetischen oder anderen bauphysikalischen Gründen auf 36,5 cm erhöht, sinkt der U-Wert auf $U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, dass Niedrigenergiehäuser aus Porenbeton auch ohne zusätzliche Wärmedämmung im Bereich der Außenwände gebaut werden können. Ebenso wurden 3-Literhäuser, Ultra-Niedrigenergiehäuser bis hin zu Passivhäusern in Massivbauweise aus Porenbeton ausgeführt.

Porenbeton kann in modernen Werken mit gezielten Rohdichten und Porenstrukturen hergestellt werden. Daher können viele Produkte mit günstigeren Wärmedämm-Eigenschaften als nach Norm gefordert angeboten werden. Die in Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik ausgewiesenen Wärmeleitwerte werden dabei durch Eigen- und Fremdüberwachungen gesichert.

In Verbindung mit der in dieser Schrift dargestellten richtigen Anwendung und Ausführung von Porenbetonbauteilen und der Beachtung eines dauerhaften Feuchteschutzes ist ein optimaler Wärmeschutz entsprechend den Materialeigenschaften zu erzielen: Guter Feuchteschutz ist die wichtigste Voraussetzung für den Wärmeschutz.

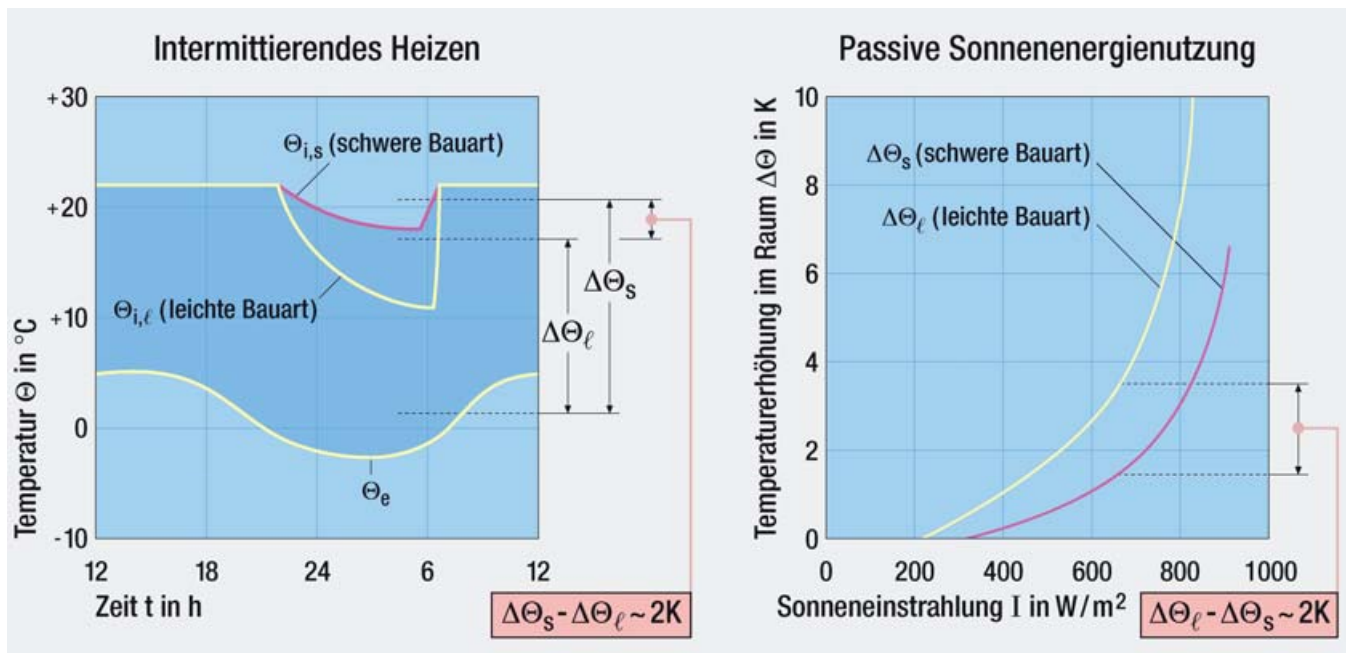


Bild 33: Zeitverläufe der Außenlufttemperatur in Versuchsräumen leichter und schwerer Bauart (Freilandversuchsstelle Holzkirchen) bei Nachabschaltung der Heizung. Die Rasterfelder kennzeichnen die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft. Bei leichter Bauart beträgt die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft 18,2 K gegenüber 20 K bei schwerer Bauart. Bei durchgehendem Heizen (ohne Nachabschaltung) hätte diese Differenz 21 K betragen. Je größer diese Temperaturdifferenz, desto größer ist der Transmissionswärmeverlust bei gleichem k-Wert.

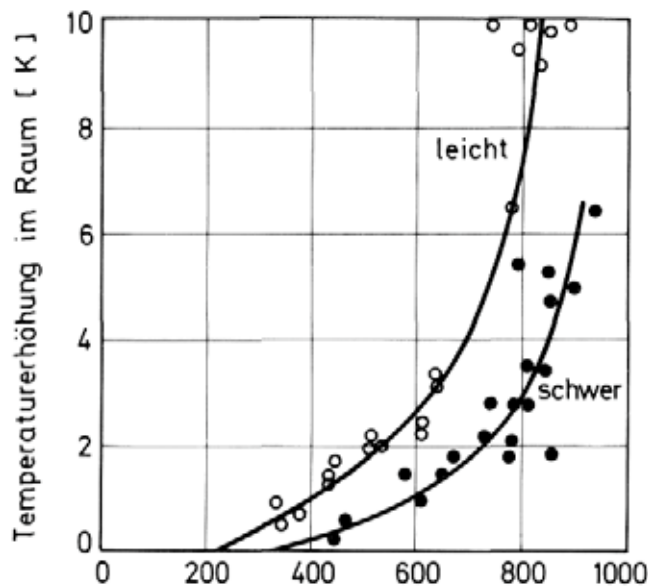


Bild 34 Sonneneinstrahlung [W/m²]

Bild 34: Temperaturerhöhung in Versuchsräumen leichter und schwerer Bauart (Freilandversuchsstelle Holzkirchen), abhängig von der Sonneneinstrahlung auf die nach Süden orientierten Fenster durchschnittlichen Winterbedingungen. Bei schwerer Bauart kann eine Zuheizung infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster besser genutzt werden, da eine Überwärmung erst bei größerer Einstrahlung auftritt, auf die in der Regel durch Fensteröffnen reagiert wird bei durchschnittlichen Winterbedingungen. Bei schwerer Bauart kann eine Zuheizung infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster besser genutzt werden, da eine Überwärmung erst bei größerer Einstrahlung auftritt, auf die in der Regel durch Fensteröffnen reagiert wird.

Literaturhinweise

- [1] Künzeli, H.: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? Bauphysik 8 (1986), Heft 2
- [2] Künzeli, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 4 (1982) H. 3 S. 101-107.
- [3] Künzeli, H.: Zur Frage des Zuschlags auf Messwerte der Wärmeleitfähigkeit zur Ermittlung des Wärmeschutzes von Baukonstruktionen. WKS B Sonderausgabe Mai 1985.
- [4] Künzeli, H.; Herold, P.: Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in Außenwänden aus Gasbeton. Betonsteinzeitung 8 (1969), S. 493-495.
- [5] Akgün, H.: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit von Porosität und Feuchte von Calcium-Silicat-Hydrat-Produkten. Diplomarbeit Universität Erlangen Nürnberg 1982.
- [6] Achtziger, J. und Cammerer, J.: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht des Forschungsinstitutes für Wärmeschutz e.V. München vom 20. 12. 1984.
- [7] Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag 1963.
- [8] Vos, B. H. und Tammes, E.: Flow of water in the liquid phase. Bericht Nr. BI-68-38, IBBC-TNO, Delft 1968.
- [9] Künzeli, H.; Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. Berichte aus der Bauforschung Heft 51 (1968) Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [10] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität Essen 1983.
- [11] Künzeli, H.; Gertis, K.: Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in Gasbetondächern. Betonsteinzeitung 35 (1969) S. 660-662.
- [12] Künzeli, H.: Beurteilung der thermo-mechanischen Eigenschaften von Außenputzen. Bauphysik 6 (1984), H. 3, S. 98-102.
- [13] Künzeli, H.: Einfluss der Wärmespeichereigenschaft auf den Heizenergieverbrauch von Gebäuden. Arcus 1 (1983) S. 30-34.
- [14] Hauser, G.: Vergleich des jährlichen Wärme- und Energieverbrauchs von Einfamilienhäusern in Leicht- und Schwerbauweise. WKS B 18/1984, S. 10-15.
- [15] Künzeli, H.; Frank, W.: Die sommerlichen Temperaturverhältnisse in Wohngebäuden schwerer und leichter Bauart. Ges.-Ing. 100 (1979) H. 3, S. 85-92.
- [16] Künzeli, H.: Keine Dampfsperre zwischen Dämmstoff und Gasbeton. Das Dachdecker-Handwerk 108 (1987), H. 19, S. 14-18.
- [17] Künzeli, H.; Böhm, H.: Außenseitige Wärmedämmung von Außenwänden in Verbindung mit mineralischen Putzen. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik FB-11/1986 (1986).
- [18] Bewehrte Wandplatten - Fugenausbildung. Bericht 6 des Bundesverbandes Porenbetonindustrie e.V., September 1997.