



## Einsatz einer diffusionsoffenen Folie für schwimmenden Estrich zur Vermeidung von Feuchteschäden

Martin Krus  
Lorentz Reinhold  
Steffen Träger-Müller

# Einsatz einer diffusionsoffenen Folie für schwimmenden Estrich zur Vermeidung von Feuchteschäden

Die Problematik, dass Wasser aufgrund von Unachtsamkeit oder Rohrbrüchen bzw. kleinerer permanenter Leckagen unter den Estrich fließt und deshalb aufwendige und teure Trocknungsmaßnahmen notwendig werden, ist aufgrund der hohen Fallzahlen sicher bekannt. Auch bei kleineren Schadensfällen ist aufgrund der Verwendung der relativ diffusionsdichten Standard-Estrichfolie eine ausreichend schnelle natürliche Abtrocknung meist nicht möglich. Es wurde untersucht, bei welchen Schadensfällen und bis zu welchem Ausmaß der Ersatz der konventionellen durch eine diffusionsoffene Folie unkritisch ist und Trocknungsmaßnahmen ersetzen kann. In die Untersuchungen werden die beiden verbreitetsten Estricharten, Zement-Fließestrich und Calciumsulfat-Fließestrich, einbezogen. Als Estrichdämmung kommen Polystyrol, Holzweichfaser- und Mineralfaserdämmung zum Einsatz und als Bodenbelag Teppich, Parkett, Kork und Laminat. Außerdem wird die Situation mit und ohne Fußbodenheizung einbezogen. Aus den Berechnungen lässt sich schließen, dass der Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie bei schwimmendem Fließestrich aus Calciumsulfat eine deutliche Verbesserung bringt. Beim diffusionsdichteren Zement-Fließestrich sind die Ergebnisse etwas ungünstiger und nicht in allen Fällen vorteilhaft. Ideal wäre eine Folie, welche im Ausgangszustand relativ diffusionsdicht ist und somit den hohen Eintrag durch die Baufeuchte blockieren kann und erst nach ausreichender Abtrocknung der Baufeuchte diffusionsoffen wird.

**Stichworte** Estrichfolie; Schadensvermeidung; Trocknung; hygrothermische Berechnung

## 1 Problemstellung

Um eine gute Trittschalldämmung bei Bodenaufbauten zu erreichen und eine Flankenübertragung über die umlaufenden Wände zu vermeiden, wird häufig ein Aufbau mit schwimmendem Estrich eingesetzt, bei dem durch umseitig verlaufende Dämmstreifen ein direkter Kontakt des Estrichs mit den umgebenden Wänden vermieden wird (Bild 1). Zur Vermeidung von Schallbrücken durch zwischen die Dämmung laufenden flüssigen Estrich wird auf die Dämmung vor dem Aufbringen des Estrichs eine Folie, meist aus Polyäthylen (PE), gelegt. Diese Folie muss normalerweise keine feuchtetechnische Funktion erfüllen, besitzt aber meist einen recht hohen Diffusionswiderstand. Havarien, bei denen Wasser unter den Estrich fließt, sei es durch Rohrbruch, kleinere Leckagen oder Überschwemmungen, treten bekanntermaßen aber immer wieder auf. In allen Schadensfällen werden, abhängig von Ursprung und Ausmaß, Trocknungsmaßnahmen notwen-

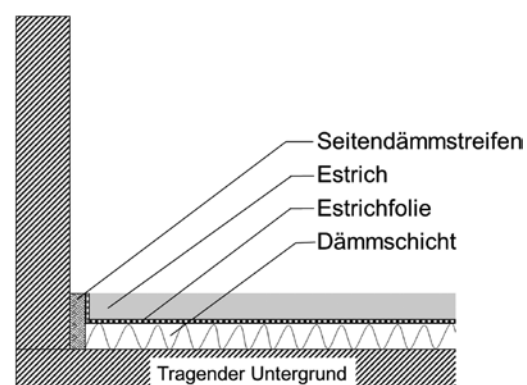
## Use of a high permeable film for floating screed to avoid moisture damage

The problem that water flows under the screed due to carelessness or pipe breaks or smaller permanent leaks and therefore complex and expensive drying measures are necessary is well known due to the high number of cases. Even in the case of minor damage, the use of the diffusion-tight standard screed film usually means that it is not possible to dry naturally fast enough. It was examined in which cases of damage and to what extent the replacement of the conventional screed film by a diffusion-open film is not critical and can replace drying measures. The two most common types of screed, cement screed and calcium sulfate screed, are included in the investigations. Polystyrene, soft wood fiber and mineral fiber insulation are used as screed insulation and carpet, parquet, cork and laminate as floor covering. The situation with and without underfloor heating (FBH) is also included.

From these calculations, it can be concluded that the use of a diffusion-open screed film in combination with a floating screed made of calcium sulfate brings a significant improvement. The results are somewhat less favorable with diffusion-tight cement-based screed and a diffusion-open screed film is not always advantageous. Absolutely perfect would be a film that is diffusion-tight in the initial state and thus can block the high entry through the build-in moisture and only becomes permeable after the build-in moisture has dried sufficiently.

**Keywords** flooring membrane; avoidance of damage; drying; hygrothermal calculation

dig, da ansonsten die Gefahr von Schimmelpilzbildung unterhalb des Estrichs besteht und durch die Verbindung mit der Raumluft über die wandseitigen Fugen eine Gesundheitsgefährdung resultieren kann.



**Bild 1** Bodenaufbau mit schwimmendem Estrich [1]  
Floor structure with floating screed [1]

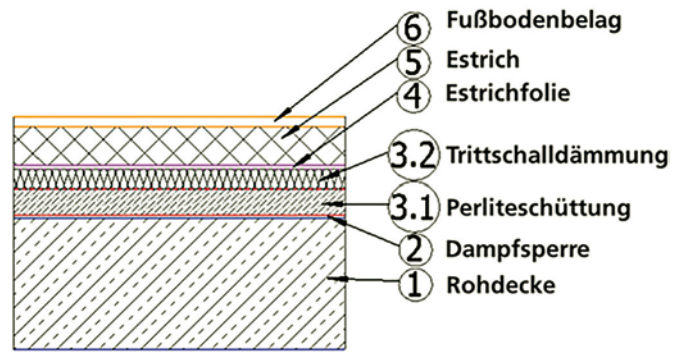
Gewöhnlich kann keine oder nur geringe Diffusion durch den Bodenaufbau an die Raumluft erfolgen, da dieser Vorgang durch die übliche diffusionshemmende Folie unter dem Estrich gebremst wird. Folglich muss diese Schicht partiell geöffnet oder über den Rand umgangen werden, um einen Luftaustausch und damit einen Trocknungsvorgang zu ermöglichen. Je nach Ausmaß sind damit hohe Kosten verbunden. Es soll deshalb im Rahmen dieses Aufsatzes untersucht werden, bei welchen Schadensfällen und bis zu welchen Ausmaßen eine diffusionsoffene Estrichfolie aufwendige Trocknungsmaßnahmen ersetzen können.

## 2 Untersuchungsweg und Umfang

Zur Klärung dieser Fragestellung werden aus der WUFI®-Familie das eindimensionale Berechnungsprogramm WUFI®-Pro [2–5] sowie das Schimmelpilzprognosemodell WUFI®-Bio [6, 7] eingesetzt, die die hygrothermische Simulation der zu untersuchenden Situationen und deren Beurteilung erlauben. Besonderes Augenmerk liegt hier auf dem Vergleich zwischen der konventionellen diffusionshemmenden Estrichfolie und der zu untersuchenden diffusionsoffenen Folie.

Es werden drei Schadensarten in die Untersuchungen einbezogen, die sich in ihrer Art und Dauer der Wassereinwirkung unterscheiden. Dabei werden aber nur Schadensfälle mit einem relativ geringfügigen Wassereintrag untersucht, die keine erheblichen Schäden im Deckenaufbau nach sich ziehen. Somit zählen starke Überschwemmungen und stehendes Wasser auf dem Bodenbelag nicht zu den zu untersuchenden Szenarien, da diese zwangsläufig aufwendige Trocknungsmaßnahmen zur Folge haben. Vielmehr stehen das feuchtetechnische Verhalten der Konstruktion nach Ausbringen des Estrichs nach einer kurzen Überschwemmung, wie bei einer überlaufenden Badewanne, und die Auswirkungen eines andauernden geringfügigen Feuchteintrags, wie bei einem undichten Wasserleitungsrohr, im Fokus. Sollte die Diffusionsoffenheit der Estrichfolie nach dem Gießen des Estrichs aufgrund der damit verbundenen Baufeuchte bei den Berechnungen zu starkem Schimmelpilzwachstum führen, wird der Einsatz der diffusionsoffenen Folie als kritisch erachtet und deshalb auf die Berechnung der Schadensfälle verzichtet.

Beim schwimmenden Estrich handelt es sich um ein System, bei dem aufgrund der Randstreifen ein gewisser Luftaustausch mit der Raumluft stattfindet, der auch durch einen gewissen Pumpeffekt beim Begehen des Estrichs bewirkt wird. Ohne diesen Luftaustausch wäre eine Schimmelpilzbildung unterhalb des Estrichs aus hygienischer Sicht ja auch weitgehend unbedenklich. Für die durchgeführten Berechnungen wurde von einer Luftwechselrate mit der Raumluft von lediglich 1 pro Stunde ausgegangen. Bei einem 20 m<sup>2</sup> großen Raum und einer angenommenen durchströmbaren Luftschichtdicke von 2 mm unterhalb des Estrichs entspräche dies einem Ge-



**Bild 2** Fußbodenaufbau mit schwimmendem Estrich [8]  
Floor construction with floating screed [8]

samtvolumenstrom von 1 l/min. Systematisch durchgeführte praktische Untersuchungen zu diesem Effekt sind derzeit leider nicht bekannt.

Es gibt fünf gebräuchliche Estricharten, die sich teils stark in ihren Eigenschaften in Bezug auf Härte, Austrocknungsverhalten und Verarbeitung unterscheiden (Calciumsulfat-Estrich, Gussasphalt-Estrich, Kunstharz-Estrich, Magnesia-Estrich und Zement-Estrich). Dabei sind der Calciumsulfat-Fließestrich und der Zement-Fließestrich die im Wohnhausbau am häufigsten eingesetzten Estricharten, weshalb hier nur diese beiden berücksichtigt werden.

Zur Einschränkung der Variantenvielfalt handelt es sich bei allen Varianten um Zwischendecken in Stahlbetonweise mit dem in Bild 2 skizzierten Aufbau. Da durch die auf den Beton aufgetragene Diffusionssperre eine Abtrocknung nach unten verhindert wird, handelt es sich

**Tab. 1** Materialvarianten mit ihren spezifischen Dicken und der dazugehörigen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  
Material variants with their specific thickness and the associated diffusion-equivalent air layer thickness

Nr.	Bezeichnung	Dicke [cm]	s <sub>d</sub> -Wert [m]
1	Beton W/Z 0,05	20	36
2	Dampfsperre	0,1	1 500
3.1	Perlite-Schüttung	4	0,16
3.2	Holzweichfaserplatte		0,09
	Expandiertes Polystyrol	3	1,5
	Mineralwolle		0,03
4	Diffusionsoffene Estrichfolie		0,02
	Diffusionshemmende Estrichfolie	0,1	50
5	Zement-Fließestrich	6	4
	Calciumsulfat-Fließestrich	5	0,9
6	Teppich	0,5	0,03
	Fliesen	1	2
	Eichenparkett	1,5	2,1
	Laminat	0,7	17,5



hiermit diesbezüglich um den aus hygrischer Sicht ungünstigsten Aufbau, sodass die Berechnungsergebnisse risikolos auf andere Untergründe übertragen werden können. Es werden sowohl Aufbauten mit Perliteschüttung als Höhenausgleich für verlegte Rohre als auch solche ohne (hier entfällt dann die mit 3.1 bezeichnete Schicht in Bild 2) einbezogen. Als Dämmstoffe werden Holzweichfaser (Hwf), Expandiertes Polystyrol (EPS) und Mineralwolle (MW) ausgewählt und als Fußbodenbelag Teppich als sehr diffusionsoffene Beschichtung, Fliesen und Eichenparkett als Bodenbelag mit mittlerem Diffusionswiderstand und Laminat als sehr dichtem Belag. In Tabelle 1 sind die Materialvarianten mit ihren spezifischen Dicken und der dazugehörigen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke ( $s_d$ -Wert) aufgelistet. Alle Varianten werden mit und ohne Fußbodenheizung berechnet.

### 3 Schadensszenarien und Beurteilungskriterien

Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit der diffusionsoffenen Estrichfolie werden drei realitätsnahe Schadensszenarien untersucht. Ausgehend vom Zustand des baufeuchten Estrichs beim Gießen werden die Vor- und Nachteile einer diffusionsoffenen Folie unter Berücksichtigung von möglichen Schäden ermittelt. Im Folgenden werden die einzelnen Szenarien genauer erläutert.

#### 3.1 Baufeuchte aus dem Estrich

Für diese Berechnungen werden die typischen Baufeuchten der Zement- und Calciumsulfat-Fließestriche (ca.  $80 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $175 \text{ kg/m}^3$ ) zugrunde gelegt. Es wird vorausgesetzt, dass die Rohdecke und die restlichen Schichten eine Anfangsfeuchte entsprechend 60% r. F. haben und sich somit im Bereich der Ausgleichsfeuchte eines Bestandsgebäudes befinden. Grundsätzlich wird das Austrocknungsverhalten beider Estricharten auf drei Jahre mit und ohne Perlite-Schüttung berechnet. Nach dem Gießen des Estrichs wird gewöhnlich die Belegreife (1,8 M.-% bei Zement-Fließestrich und 0,5 M.-% bei Calciumsulfat-Fließestrich) bei Heizestrichen durch Belegreifeheizen erreicht. Der Vergleich mit der konventionellen Estrichfolie soll zeigen, inwieweit sich diese Maßnahmen hilfreich auf die Trocknung bei der diffusionsoffenen Folie auswirken, ohne dass es zu Problemen kommt.

Bei den Varianten mit Fußbodenheizung ist die Wärmeabgabe des Fußbodenheizungssystems als Wärmequelle in den Aufbau integriert worden. Dabei wird die abgestrahlte Wärme über die Vorlauftemperatur und den Verlegeabstand abgeschätzt. Für den Zement-Fließestrich wird dabei 21 Tage nach dem Gießen von einem Funktionsheizen mit einer Erhöhung der Vorlauftemperatur vom ersten Tag bis zum fünften Tag von  $25^\circ\text{C}$  auf  $45^\circ\text{C}$  und einem Halten dieser Temperatur anschließend bis zum siebten Tag ausgegangen. In den beiden darauffolgenden Tagen wird die Vorlauftemperatur schrittweise auf die Ausgangstemperatur abgesenkt. Durch ein kon-

**Tab. 2** Mould-Index nach Viitanen [9], der analog in WUFI® Bio implementiert wurde  
Mold index according to Viitanen [9], which was implemented analogously in WUFI® Bio

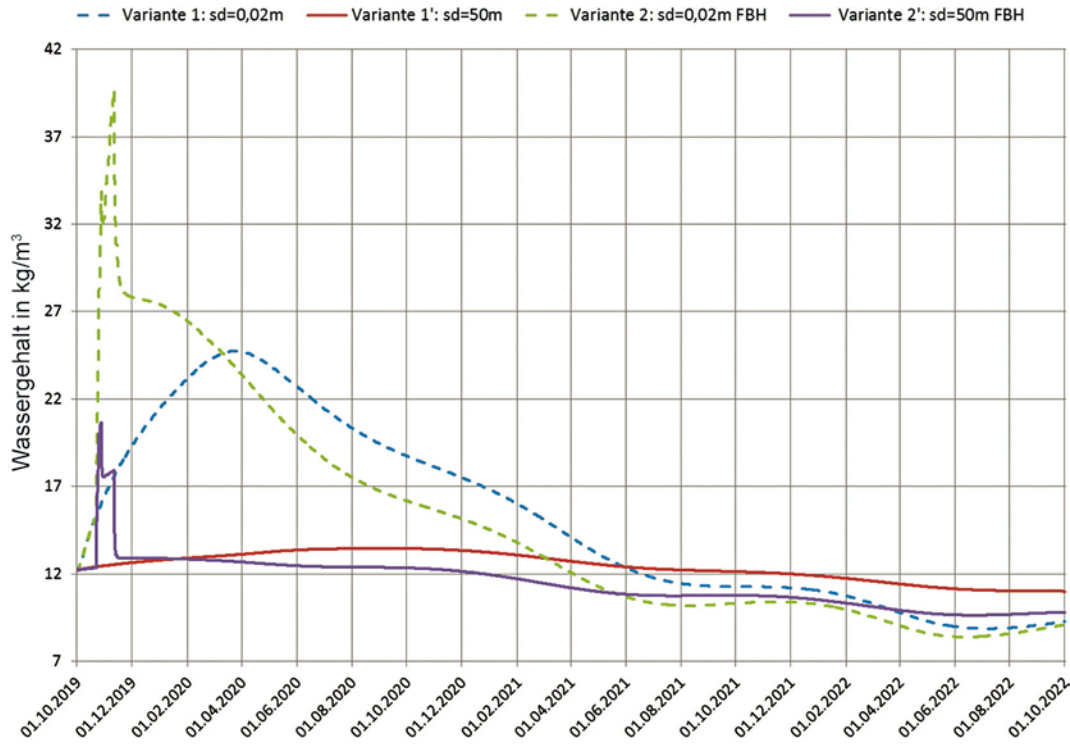
Mould-Index	Beschreibung
1	kein Wachstum
2	ein wenig Wachstum (mikroskopisch)
3	mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10%
4	sichtbares Wachstum (Wachstum von Hyphen mikroskopisch erkennbar)
5	Bedeckung > 50%
6	dichte Bedeckung 100%

stantes Weiterheizen bei ca.  $35^\circ\text{C}$  wird dann die Belegreife erreicht. Beim Calciumsulfat-Fließestrich wird bereits nach drei Tagen die Vorlauftemperatur auf  $25^\circ\text{C}$  gestellt, die anschließend weitere drei Tage gehalten wird. Weitere vier Tage bei  $45^\circ\text{C}$  schließen das Funktionsheizen ab. Abschließend sorgt eine Woche bei  $35^\circ\text{C}$  Vorlauftemperatur für das Erreichen der Belegreife.

Nur die Deckenaufbauten, bei denen sich rechnerisch kein massives Schimmelwachstum ergibt, werden dann im weiteren Verlauf hinsichtlich der folgend beschriebenen zwei Wasserschadensfälle untersucht, die sich hauptsächlich in der Dauer der Wassereinwirkung unterscheiden. Das wesentliche Kriterium für die Beurteilung der Praxistauglichkeit des Bodenaufbaus stellt das Schimmelpilzrisiko dar. Die Einstufung des Schimmelpilzrisikos erfolgt dabei mit dem von Viitanen eingeführten [9] und in WUFI® Bio von Krus et al. übernommenen [10] Mould-Index (Tabelle 2). Aufgrund des geringen Austauschs mit der Raumluft werden bei der Bewertung mit WUFI® Bio auf drei bis vier Monate befristete Überschreitungen des Mould-Indexes von 3 gerade noch toleriert. Dieses Kriterium wird analog auch auf die folgend beschriebenen Schadensfälle angewendet.

#### 3.2 Kurzfristiger Wassereintrag in der Dämmebene (Havarie)

Zur Beurteilung dieses Schadens wird ein erhöhter Anfangswassergehalt zu Simulationsbeginn in der Dämmebene, oder bei Dämmung mit Polystyrol in der Luftschicht darunter, angesetzt. Je nach Aufbau, mit oder ohne Perlite-Schüttung, werden Mengen zwischen  $0,3 \text{ kg/m}^2$  und  $3,5 \text{ kg/m}^2$  als absolute Minimal- und Maximalwerte in die Konstruktion eingebracht. Die gesamte Konstruktion befindet sich anfangs in einer Ausgleichsfeuchte von 60%. Es wird zunächst der Anfangswassergehalt der Perlite-Schicht mit zusätzlichen  $1 \text{ kg/m}^2$  (bei den Varianten mit Perlite-Schicht) bzw. der Luftschicht (bei den Varianten ohne Perlite-Schicht) mit zusätzlichen  $0,3 \text{ kg/m}^2$  Wasser



**Bild 3** Verlauf des Wassergehaltes der Perlite-Schicht der Varianten 1 (ohne FBH) und 2 (mit FBH), mit EPS als Dämmstoff bei Verwendung einer diffusions-offenen bzw. konventionellen Estrichfolie  
Course of the water content of the Perlite layer of variants 1 (without FBH) and 2 (with FBH), with EPS as insulation when using a diffusion-open or a conventional screed film

als Startwert angesetzt. Systematisch werden die Wassergehalte der Perlite-Schicht um  $0,5 \text{ kg/m}^2$  bzw. die der Luftschicht um  $0,1 \text{ kg/m}^2$  erhöht, bis sich ein nicht mehr tolerierbares Schimmelwachstum ergibt.

### 3.3 Permanenter Wassereintrag in die Dämmebene (Leckage)

Über den Berechnungszeitraum von sechs Jahren wird mittels einer Feuchtequelle in der Dämmebene oder dem Luftspalt Wasser in die Konstruktion eingebracht. Zunächst werden  $0,3 \text{ Liter pro Quadratmeter und Jahr}$  angesetzt und diese schrittweise um  $0,1 \text{ l/m}^2\text{a}$  bis  $2 \text{ l/m}^2\text{a}$  erhöht. Sollten auch diese Wassermengen problemlos trocknen, erfolgt eine schrittweise Erhöhung um  $0,5 \text{ l/m}^2\text{a}$  Wasser, bis die Grenzen erreicht sind.

## 4 Auswirkung der Baufeuchte aus dem Estrich

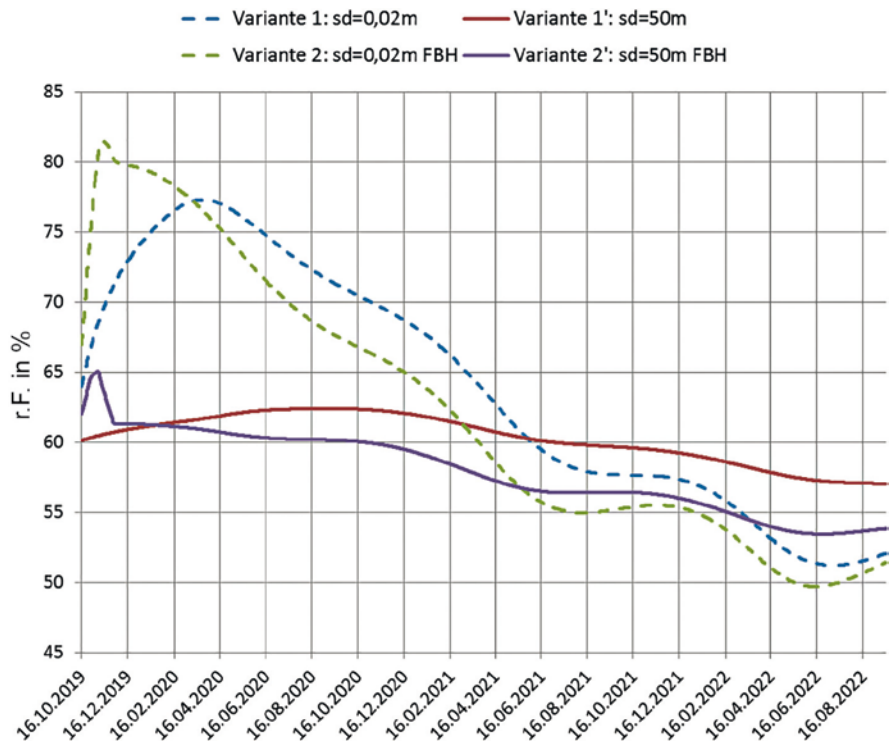
In Bild 3 sind beispielhaft für die Zement-Fließestrich-Varianten mit Perlite-Schüttung und EPS-Dämmung die Verläufe des Wassergehaltes bei Einsatz einer diffusionshemmenden Estrichfolie mit einem  $s_d$ -Wert von  $50 \text{ m}$  ohne Fußbodenheizung (Variante 1) und mit Fußbodenheizung (Variante 2) im Vergleich zur Situation mit diffusionsoffener Estrichfolie ( $s_d$ -Wert  $0,02 \text{ m}$ , Variante 1' bzw. 2') dargestellt. Der Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie führt anfänglich zu deutlich höherem Wassergehalt in der Perlite-Schüttung, der mit der Zeit aber abnimmt und langfristig zu geringeren Feuchten der Perlite-

Schichtung führt. Der Betrieb der Fußbodenheizung (FBH) führt dabei zu einer sehr schnellen, stärkeren Erhöhung, aber auch zu einer schnelleren Minderung der Feuchte im Vergleich zu den Varianten ohne Fußbodenheizung.

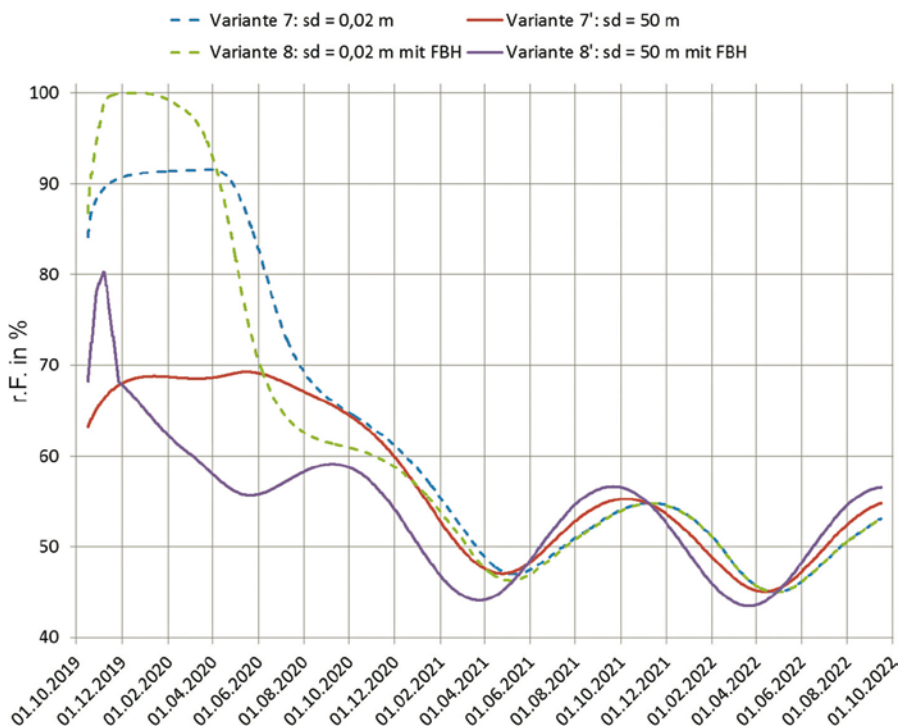
Bild 4 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchte der Perlite-Schicht. Mit Fußbodenheizung und Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie ergibt sich eine Überschreitung von  $80\% \text{ r.F.}$ , die allerdings so kurz andauert, dass ein relevantes Schimmelpilzwachstum nicht zu erwarten ist.

Ein ganz anderes Ergebnis erhält man für den gleichen Bodenaufbau ohne Ausgleichsschüttung mit Perliten (Bild 5). Während sich mit diffusionshemmender Estrichfolie völlig unkritische Verläufe der rel. Luftfeuchte unterhalb der Dämmung ergeben, liegen diese mit einer diffusionsoffenen Folie über mehrere Monate oberhalb von  $90\% \text{ r.F.}$  Mit Einsatz einer Fußbodenheizung werden sogar  $100\%$  erreicht. Dementsprechend ergibt sich mit WUFI® Bio ohne FBH ein maximaler Mould-Index von 5 und mit FBH sogar von 6. Dementsprechend kann diese Konfiguration nicht als praxistauglich eingestuft werden.

Bild 6 zeigt für den Zementestrich anhand des Variantenplans das Ergebnis des Einflusses der Baufeuchte auf die Funktionstauglichkeit des Bodenaufbaus. Dabei bedeutet „FBH an“ Betrieb mit Fußbodenheizung und „FBH aus“ Fußbodenaufbau ohne Fußbodenheizung. Die Funktionstauglichkeit ist dabei durch die Farbgebung (grün: risikofrei/rot: risikobehaftet) gekennzeichnet, wobei jeweils das rechte Feld das Ergebnis für einen Aufbau mit diffu-



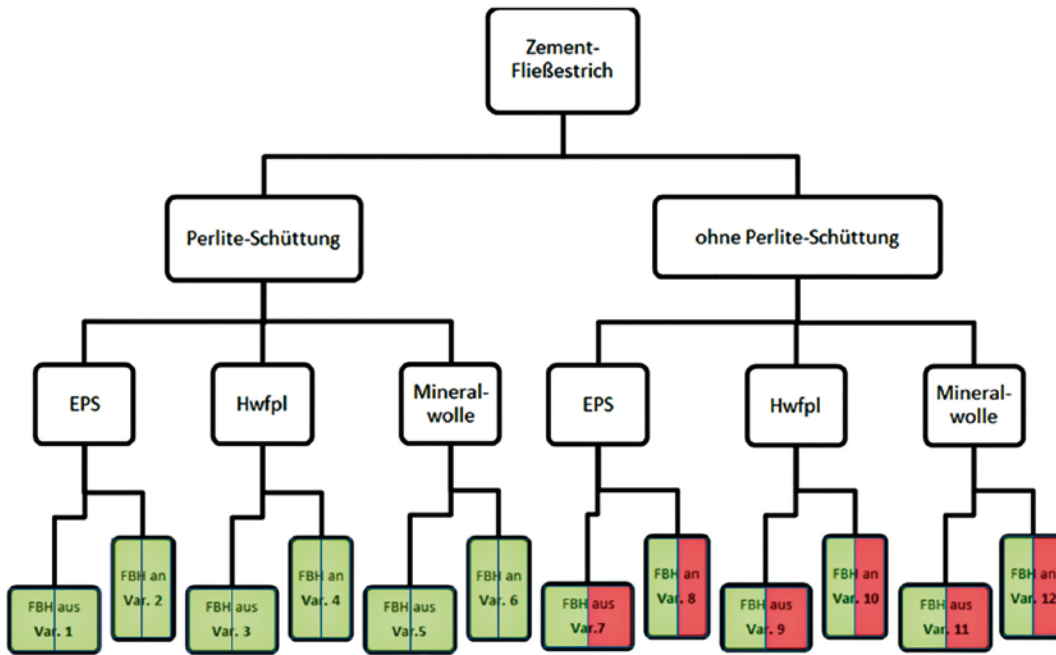
**Bild 4** Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Perlite-Schicht der Varianten 1 (ohne FBH) und 2 (mit FBH), mit EPS als Dämmstoff bei Verwendung einer diffusionsoffenen bzw. konventionellen Estrichfolie  
 Course of the relative humidity in the Perlite layer of variants 1 (without FBH) and 2 (with FBH), with EPS as insulation when using a diffusion-open or a conventional screed film



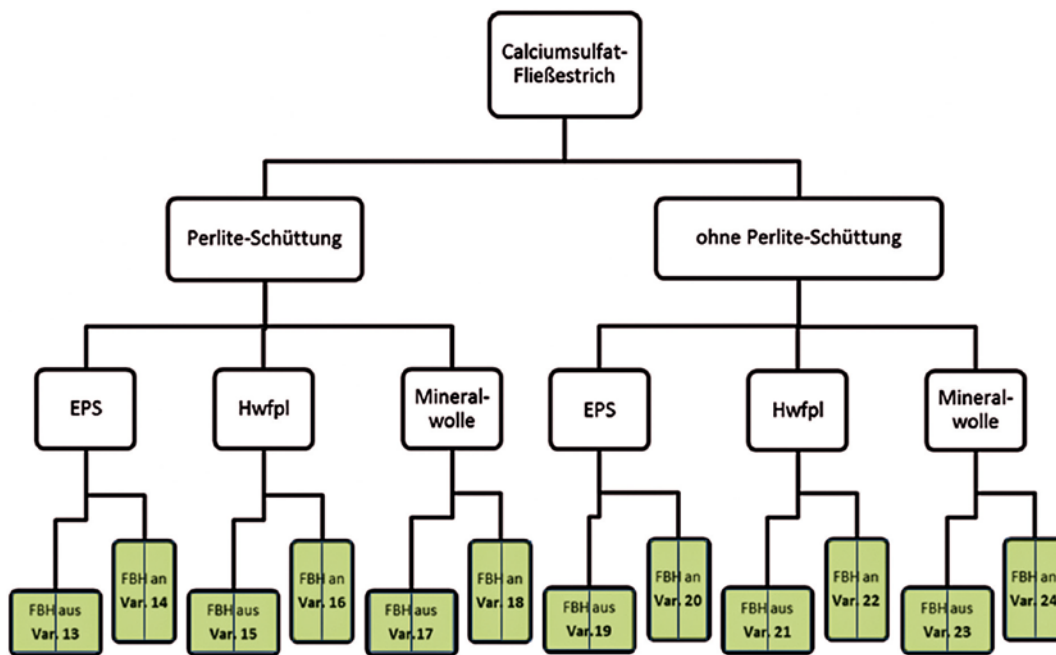
**Bild 5** Verlauf der relativen Luftfeuchte der Varianten 7 (ohne FBH) und 8 (mit FBH), mit EPS als Dämmstoff bei Verwendung einer diffusionsoffenen bzw. konventionellen Estrichfolie; Bodenaufbau hierbei ohne Perlite-Schicht  
 Course of the relative humidity of variants 7 (without FBH) and 8 (with FBH), with EPS as insulation material when using a diffusion-open or a conventional screed film; floor structure without perlite layer

sionshemmender Folie und das linke Feld für einen mit diffusionsoffener Folie beschreibt. Man erkennt, dass, wie es auch die Praxiserfahrung zeigt, alle Varianten mit diffusionshemmender Folie risikofrei eingesetzt werden können.

Mit Perlite-Schüttung gilt dies auch bei Einsatz einer diffusionsoffenen Folie. Ohne Perlite-Schüttung unterhalb der Dämmschicht ist ein Aufbau mit diffusionsoffener Estrichfolie dagegen nicht zu empfehlen.



**Bild 6** Variantenbaum für den Einfluss der Baufeuchte bei Zement-Fließestrich. Die Funktionstauglichkeit ist dabei durch die Farbgebung (grün: risikofrei / rot: risikobehaftet) gekennzeichnet, jeweils das linke Feld für den Aufbau mit diffusionshemmender Folie und das rechte Feld mit diffusionsoffener Folie. Variant tree for the influence of the built-in moisture in the cement screed. The suitability for use is characterized by the color (green: risk-free/red: risky), the left field for the construction with conventional screed film and the right field with diffusion-open screed film



**Bild 7** Variantenbaum für den Einfluss der Baufeuchte bei Calciumsulfat-Fließestrich. Die Funktionstauglichkeit ist dabei durch die Farbgebung (grün: risikofrei/ rot: risikobehaftet) gekennzeichnet, jeweils das linke Feld für den Aufbau mit diffusionshemmender Folie und das rechte Feld mit diffusionsoffener Folie. Variant tree for the influence of the built-in moisture in the calcium sulfate screed. The suitability for use is characterized by the color (green: risk-free/red: risky), the left field for the construction with conventional screed film and the right field with diffusion-open screed film.

Für den Calciumsulfat-Fließestrich (Bild 7) erhält man eine andere Darstellung. Auch hier ergibt sich entsprechend den Erfahrungen ein positives Ergebnis mit einer diffusionshemmenden Folie. Im Gegensatz zum Zement-Fließestrich ist bei dieser Estrichart der Einsatz einer diffusionsoffenen Folie aber nicht nur bei Vorhandensein einer Perlite-Ausgleichsschicht risikolos, sondern auch ohne diese Schicht.

Die rechnerische Untersuchung der beiden Schadensfälle, kurzfristiger und langfristiger Wassereintrag, beschränkt sich deshalb beim Zementestrich nur auf die Varianten mit Perlite-Schicht. Beim Calciumsulfat-Fließestrich werden dagegen die Varianten mit und ohne Perlite-Schicht einbezogen.

**Tab. 3** Berechnungsergebnisse für den Zement-Fließestrich mit Perlite. Rote Markierung bedeutet, dass die angesetzte Mindesteintragsmenge von 1 l/m<sup>2</sup> bei Havarie bzw. 0,3 l/m<sup>2</sup>a bei kleiner Leckage nicht schadensfrei bleibt, bei gelber Farbgebung dagegen gerade noch. Bei höheren zulässigen Feuchtemengen ist das Ergebnis grün hinterlegt.

Calculation results for the cement floor screed with Perlite. Red marking means that the minimum input amount of 1 l / m<sup>2</sup> in the event of an accident or 0.3 l / m<sup>2</sup>a in the event of a small leak does not remain free of damage, but only slightly in the case of a yellow color. The result is highlighted in green at higher permissible moisture levels.

<b>Zement-Fließestrich mit Perlite-Schüttung</b>					
Variante / Bodenbelag	Dämmung	Max. kurzfristiger Eintrag (Havarie)		Max. permanenter Eintrag (Leckage)	
		Konventionelle Folie (s <sub>d</sub> = 50 m)	Diffusionsoffene Folie (s <sub>d</sub> = 0,02 m)	Konventionelle Folie (s <sub>d</sub> = 50 m)	Diffusionsoffene Folie (ss <sub>d</sub> = 0,02 m)
1 Teppich 4 Laminat	Expandiertes Polystyrol	< 1l/m <sup>2</sup>	1,5 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	0,8 l/m <sup>2</sup> a
5 Teppich 8 Laminat	Holzweichfaser	1l/m <sup>2</sup>	1,8 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	1,0 l/m <sup>2</sup> a
9 Teppich 12 Laminat	Mineralfaser	< 1l/m <sup>2</sup>	1,5 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	1,0 l/m <sup>2</sup> a

**Tab. 4** Berechnungsergebnisse für den Calciumsulfat-Fließestrich mit Perlite. Rote Markierung bedeutet, dass die angesetzte Mindesteintragsmenge von 1 l/m<sup>2</sup> bei Havarie bzw. 0,3 l/m<sup>2</sup>a bei kleiner Leckage nicht schadensfrei bleibt, bei gelber Farbgebung dagegen gerade noch. Bei höheren zulässigen Feuchtemengen ist das Ergebnis grün hinterlegt.

Calculation results for the calcium sulfate floor screed with Perlite. Red marking means that the minimum input amount of 1 l / m<sup>2</sup> in the event of an accident or 0.3 l / m<sup>2</sup>a in the event of a small leak does not remain free of damage, but only slightly in the case of a yellow color. The result is highlighted in green at higher permissible moisture levels.

<b>Calciumsulfat-Fließestrich mit Perlite-Schüttung</b>					
Variante	Dämmung	Max. kurzfristiger Eintrag (Havarie)		Max. permanenter Eintrag (Leckage)	
		Konventionelle Folie (s <sub>d</sub> = 50 m)	Diffusionsoffene Folie (s <sub>d</sub> = 0,02 m)	Konventionelle Folie (s <sub>d</sub> = 50 m)	Diffusionsoffene Folie (v <sub>d</sub> = 0,02 m)
1 Teppich 4 Laminat	Expandiertes Poystyrol	1l/m <sup>2</sup>	1,5 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	2,0 l/m <sup>2</sup> a
5 Teppich 8 Laminat	Holzweichfaser	1l/m <sup>2</sup>	2,5 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	3,5 l/m <sup>2</sup> a
9 Teppich 12 Laminat	Mineralfaser	1l/m <sup>2</sup>	2,0 l/m <sup>2</sup>	< 0,3 l/m <sup>2</sup> a	4,5 l/m <sup>2</sup> a

## 5 Auswirkung zusätzlicher Wassereinträge durch Havarie oder Leckage

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für den Zement-Fließestrich mit Perlite-Schüttung für die drei unterschiedlichen Dämmstoffarten. Dabei sind die Ergebnisse rot markiert, wenn die angesetzte Mindesteintragsmenge von 1 l/m<sup>2</sup> bei einem kurzfristigen Eintrag (Havarie) bzw. 0,3 l/m<sup>2</sup>a bei einem permanenten Eintrag (kleine Leckage) nicht schadensfrei bleibt. Eine gelbe Farbgebung bedeutet, dass gerade in etwa diese Anfangsmenge ausreichend gut abtrocknen kann. Bei höheren zulässigen Feuchtemengen ist das Ergebnis grün hinterlegt. Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass mit einer konventionellen Estrichfolie mit einem s<sub>d</sub>-Wert von 50 m der kurzfristige Mindesteintrag von 1 l/m<sup>2</sup> sowohl von dem Bodenaufbau mit Polystyrolämmung als auch mit Mineralfaserdämmung nicht verkraftet wird. Mit einer Holz-

weichfaserdämmung verträgt der Bodenaufbau diese Menge gerade noch, was wahrscheinlich in der höheren Feuchtespeicherfähigkeit dieses Dämmstoffs begründet ist. Mit der diffusionsoffenen Estrichfolie sind dagegen bei allen drei gewählten Dämmstoffarten größere Eintragsmengen schadensfrei zulässig. Bei einem permanenten Feuchteeintrag durch kleinere Leckagen ergeben sich mit der konventionellen Estrichfolie auch bei einem relativ geringen Eintrag von 0,3 l/m<sup>2</sup>a problematische Situationen. Mit diffusionsoffener Folie sind dagegen je nach Dämmstoffart und Bodenbelag Eintragsmengen von 0,4 bis 1,0 l/m<sup>2</sup>a unkritisch. Erwartungsgemäß ergeben sich mit dem diffusionsoffensten Bodenbelag, dem Teppich, höhere zulässige Mengen als beim deutlich diffusionsdichteren Laminat. Für die Bodenbeläge aus Parkett bzw. Fliesen, die mit einem s<sub>d</sub>-Wert von 2 bzw. 2,1 m beide einen sehr ähnlichen Diffusionswiderstand aufweisen, wurden aus Zeitgründen keine Berechnungen durchge-



**Tab. 5** Berechnungsergebnisse für den Calciumsulfat-Fließestrich ohne Perlite. Rote Markierung bedeutet, dass die angesetzte Mindesteintragsmenge von  $1 \text{ l/m}^2$  bei Havarie bzw.  $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$  bei kleiner Leckage nicht schadensfrei bleibt, bei gelber Farbgebung dagegen gerade noch. Bei höheren zulässigen Feuchtemengen ist das Ergebnis grün hinterlegt.

Calculation results for the calcium sulfate floor screed without Perlite. Red marking means that the minimum input amount of  $1 \text{ l/m}^2$  in the event of an accident or  $0.3 \text{ l/m}^2\text{a}$  in the event of a small leak does not remain free of damage, but only slightly in the case of a yellow color. The result is highlighted in green at higher permissible moisture levels.

#### Calciumsulfat-Fließestrich ohne Perlite-Schüttung

Variante	Dämmung	Max. kurzfristiger Eintrag (Havarie)		Max. permanenter Eintrag (Leckage)	
		Konventionelle Folie ( $s_d = 50 \text{ m}$ )	Diffusionsoffene Folie ( $s_d = 0,02 \text{ m}$ )	Konventionelle Folie ( $s_d = 50 \text{ m}$ )	Diffusionsoffene Folie ( $s_d = 0,02 \text{ m}$ )
13 Teppich	Expandiertes Polystyrol	< $0,3 \text{ l/m}^2$	$0,5 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$1,8 \text{ l/m}^2\text{a}$
16 Laminat		< $0,3 \text{ l/m}^2$	$0,3 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$0,4 \text{ l/m}^2\text{a}$
17 Teppich	Holzweichfaser	< $0,3 \text{ l/m}^2$	$1,5 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$4,0 \text{ l/m}^2\text{a}$
20 Laminat		< $0,3 \text{ l/m}^2$	$0,5 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$0,4 \text{ l/m}^2\text{a}$
21 Teppich	Mineralfaser	< $0,3 \text{ l/m}^2$	$3,5 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$5,0 \text{ l/m}^2\text{a}$
24 Laminat		< $0,3 \text{ l/m}^2$	$0,5 \text{ l/m}^2$	< $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$	$0,5 \text{ l/m}^2\text{a}$

führt, deren Ergebnisse dürften aber zwischen denen des Teppichbelags und des Laminatbodens liegen.

Die in Tabelle 4 aufgelisteten Ergebnisse zeigen, dass die Situation beim Calciumsulfat-Fließestrich mit Perlite-Schüttung etwas günstiger ist. Auch bei Verwendung der konventionellen Estrichfolie bleibt der angesetzte Mindesteintrag von  $1 \text{ l/m}^2$  durch eine Havarie noch unproblematisch. Mit diffusionsoffener Folie sind aber zum Teil deutlich höhere Mengen unkritisch, die im Falle der Holzweichfaserdämmung mit Teppichbelag auf dem Estrich bis  $2,5 \text{ l/m}^2$  gehen können. Bei einer permanenten Leckage werden mit der dichten konventionellen Folie dagegen auch bei der angesetzten Mindestmenge von  $0,3 \text{ l/m}^2\text{a}$  bei allen Dämmstoffen und Belägen negative Ergebnisse erzielt. Bei Verwendung der diffusionsoffenen Folie sind dagegen mit dem Laminat etwas größere Leckagen von  $0,4$  bis  $0,5 \text{ l/m}^2\text{a}$  unkritisch. Mit dem sehr diffusionsoffenen Teppichbelag können sogar jährliche Eintragungsmengen von  $2$  bis  $4,5 \text{ l/m}^2$  unkritisch bleiben.

Ohne Perlite-Schüttung wird in Erwartung einer ungünstigeren Situation schon von einer deutlich niedrigeren Eintragungsmenge von lediglich  $0,3 \text{ l/m}^2$  ausgegangen. Mit konventioneller Estrichfolie ist aber auch diese Eintragungsmenge bereits kritisch (Tabelle 5). Mit diffusionsoffener Folie kann diese Menge bei Polystyrolämmung und Laminatbodenbelag noch toleriert und mit den anderen Dämmstoffen auf bis zu  $0,5 \text{ l/m}^2$  überschritten werden. Bei einem diffusionsoffenen Teppichbelag ist bei einer Dämmung mit Holzweichfaser oder Mineralfaser sogar für eine Menge von  $1,5 \text{ l/m}^2$  bzw.  $3,5 \text{ l/m}^2$  eine ausreichende Austrocknungssituation gegeben. Ein permanenter Wassereintrag ist bei diesem Bodenaufbau mit der konventionellen Estrichfolie immer kritisch, wogegen mit der anderen Folie bei einem Laminatbelag Mengen von  $0,4$  bis  $0,5 \text{ l/m}^2\text{a}$  und mit Teppichbelag von sogar  $1,8$  bis  $5 \text{ l/m}^2\text{a}$  unkritisch sein können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Problematik, dass Wasser aufgrund von Unachtsamkeit oder Rohrbrüchen bzw. kleinerer permanenter Leckagen unter den Estrich fließt und deshalb aus hygienischen Gründen aufwendige und teure Trocknungsmaßnahmen notwendig werden, ist aufgrund der hohen Fallzahlen sicher bekannt. Auch bei kleineren Schadensfällen ist aufgrund der Verwendung einer relativ diffusionsdichten Estrichfolie ( $s_d$ -Wert von typischerweise  $50 \text{ m}$ ) eine ausreichend schnelle natürliche Abtrocknung meist nicht möglich. Es wurde deshalb untersucht, bei welchen Schadensfällen und bis zu welchem Ausmaß der Ersatz der konventionellen durch eine diffusionsoffene Folie (hier mit einem  $s_d$ -Wert von  $0,02 \text{ m}$ ) unkritisch ist und aufwendige Trocknungsmaßnahmen ersetzen kann. Dabei werden aber nur Schadensfälle mit einem relativ geringfügigen Wassereintrag untersucht, die keine erheblichen Schäden im Deckenaufbau nach sich ziehen, also z. B. keine starken Überschwemmungen.

In die Untersuchungen werden die beiden verbreitetsten Estricharten, Zement-Fließestrich und Calciumsulfat-Fließestrich, einbezogen, wobei letzterer deutlich diffusionsoffener ist. Unterschieden wird dabei zwischen Bodenaufbauten mit einer Perlite-Schüttung als Ausgleichsschicht für eventuell verlegte Rohre und Leitungen und ohne diese Schicht. Als Estrichdämmung kommen Expandiertes Polystyrol, Holzweichfaserdämmung und Mineralfaserdämmung zum Einsatz und als typische Vertreter des Bodenbelags Teppich, Eichenparkett, Kork und Laminat. Außerdem wird die Situation mit und ohne Fußbodenheizung einbezogen.

Zunächst stellt sich dabei die Frage, ob die Diffusionsoffenheit der Estrichfolie nach dem Gießen des Estrichs aufgrund der damit verbundenen Baufeuchte anfänglich zu Problemen durch massives Schimmelpilzwachstum

führt. Dabei zeigt sich beim Bodenaufbau mit Zementestrich, aber ohne ausgleichende Wirkung der Perlite-Schüttung, dass der Einsatz der diffusionsoffenen Folie zu Problemen führen wird. Dieser Bodenaufbau wird deshalb nicht weiter untersucht. Beim Aufbau mit Zementestrich und Perlite-Schüttung sowie mit Calciumsulfat-Fließestrich, hier mit und ohne Schüttung, bringt der Einsatz der diffusionsoffenen Folie diesbezüglich keine Probleme mit sich.

Die Berechnungen ergeben für den Bodenaufbau mit Zement-Fließestrich und Perlite-Schüttung, dass mit der konventionellen Estrichfolie selbst bei geringen kurzfristigen oder permanenten Wassereinträgen kein ausreichendes Trocknungspotenzial gegeben ist. Durch den Einsatz einer diffusionsoffenen Folie ist dagegen bis zu einer gewissen Menge, die vor allem vom Bodenbelag und in geringerem Ausmaß vom verwendeten Dämmstoff abhängt, auch ohne zusätzliche Trocknungsmaßnahme ein ausreichendes Abtrocknen möglich.

Beim Bodenaufbau mit Calciumsulfat-Fließestrich mit Perlite-Schüttung ist nach den Berechnungen zwar ein kurzfristiger Eintrag von bis zu  $1 \text{ l/m}^2$  noch tolerierbar, mit diffusionsoffener Folie bleiben aber auch größere Mengen von teilweise bis zu  $2,5 \text{ l/m}^2$  unkritisch. Allerdings verträgt dieser Bodenaufbau mit konventioneller Folie auch keine sehr geringen kontinuierlichen Einträge, mit diffusionsoffener Folie und bei diffusionsoffenem Belag jedoch bis zu  $4,5 \text{ l/m}^2\text{a}$ .

Ohne diese Perlite-Schüttung sind auch beim Calciumsulfat-Fließestrich bei Verwendung der relativ diffusionsdichten Estrichfolie sowohl einmalige als auch permanente Wassereinträge bereits in kleinen Mengen als kritisch anzusehen. Durch Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie wird die Situation ganz maßgeblich verbessert.

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Berechnungsergebnissen schließen, dass der Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie bei einem schwimmenden Fließestrich aus diffusionsoffenerem Calciumsulfat eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Schadenstoleranz mit sich bringt und nach Meinung der Autoren zu empfehlen ist. Beim diffusionsdichteren Zement-Fließestrich ist dagegen etwas Vorsicht geboten, da ohne die Feuchte speichernde Perlite-Ausgleichsschicht die diffusionsoffene Estrichfolie aufgrund der beim Gießen auftretenden Baufeuchte kritisch sein kann.

Ideal wäre eine Folie, welche im Ausgangszustand relativ diffusionsdicht ist und somit den hohen Eintrag durch die Baufeuchte blockieren kann und erst nach ausreichender Abtrocknung der Baufeuchte diffusionsoffen wird. Um die Toleranz von Zement-Fließestrich gegenüber den untersuchten Feuchtigkeitsschäden zu erhöhen, wäre dem-

entsprechend eine Folie nötig, welche in Reaktion eines äußeren Reizes ihr Diffusionsverhalten verändert. Nach Ablauf der Bauphase schaltet das Material um und erlaubt die Diffusion und somit den Abtransport von Feuchtigkeit nach Leckage oder Havarie. Zur Umsetzung dieser oder ähnlicher Konzepte steht die Klasse der programmierbaren Materialien zur Verfügung [13]. So sind zum Beispiel Materialien bekannt, die in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit oder Temperatur ihre räumliche Ausdehnung verändern und somit autark Regelungsfunktionen ausüben können (siehe Buller et al. [14]).

Um die Vorteile einer programmierbaren Estrichfolie zu nutzen, könnte beispielsweise bei einem Aufbau mit Fußbodenheizung das für das Ausbringen des Estrichs nötige Temperaturprogramm ausgenutzt werden. Da in beiden hier betrachteten Fällen die Estriche für mehrere Tage auf bis zu  $45^\circ\text{C}$  geheizt werden, bietet sich ein Material an, welches darauf programmiert ist, im Ausgangszustand und während der üblichen Aufheizphase diffusionsdicht zu sein und erst nach einmaligem Heizen auf deutlich über  $45^\circ\text{C}$  irreversibel in ein diffusionsoffenes Material überführt wird (siehe Fritsch et al. [15]). Neben dem Einstellen der Diffusionseigenschaften könnte ein programmierbares Material auch genutzt werden, um in Reaktion auf austretende Feuchtigkeit Fungizide freizusetzen, was neben der verbesserten Entfeuchtung weiter zum Schutz der Bausubstanz und Gesundheit beitragen würde (siehe Trojer et al. [16]).

In passenden Feldversuchen sollten die hier dargestellten Ergebnisse in der Praxis durch Messungen an realen Fußbodenaufbauten unter Variation der Feuchteinträge zur Bestätigung untersucht werden. Hinzu kommt aber auch noch eine weitere Fragestellung, die nicht Thema der vorgestellten Untersuchungen war, aber eine große Praxisrelevanz besitzt. Wird eine mechanische Trocknung, z. B. durch Ansaugen vorgewärmter trockener Luft, durchgeführt, stellt sich die Frage der Beurteilung des Trocknungserfolgs bzw. eines geeigneten Kriteriums für die Beendigung der Maßnahme. In den meisten Fällen dient die relative Luftfeuchte der abgesaugten Trocknungsluft als Indikator. Nach Abschalten der Trocknungseinrichtung steigt zum einen durch die Abkühlung der Bauteile, aber auch durch noch in tieferen Schichten vorhandenes Wasser, das langsam aber kontinuierlich Feuchte in den Luftraum oder den Dämmstoff nachliefert, die relative Feuchte unterhalb des Estrichs [11]. Um eine riskante Erhöhung der Feuchte durch dieses verbleibende Restwasser zu verhindern, muss deshalb die Luftfeuchte der Abluft am Ende der Trocknung unter 30% rel. Feuchte liegen. Diese Problematik, mit der sich auch das WTA-Merkblatt 6-16-19/D [12] eingehend befasst, könnte durch den Einsatz einer diffusionsoffenen Estrichfolie ebenfalls deutlich entschärft und damit auch der für die Trocknungsmaßnahme erforderliche Aufwand reduziert werden.

**Literatur**

- [1] Hestermann, U.; Rongen, L.; Frick, O. et al. (2013) *Baukonstruktionslehre 2*. Wiesbaden: Springer.
- [2] Künzel, H. M. (1994) *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte- transports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation Universität Stuttgart.
- [3] Krus, M., Künzel, H. M. (1996) *Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungs- verhaltens von Ziegelwänden*. Int. Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.–10. August 1996, S. 493–498.
- [4] Künzel, H. M. (1999) *Praktische Beurteilung des Feuchte- verhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren*. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- [5] WTA-Merkblatt 6-3-01/D (2002) *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*.
- [6] Sedlbauer, K. (2001) *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Dissertation Universität Stuttgart.
- [7] Viitanen, H.; Krus, M.; Ojanen, T.; Eitner, V.; Zirkelbach, D. (2015): *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models* in: 6th International Conference on Building Physics for a Sustainable Built Environment. Juni 2015, Turin. Vol. 78, November 2015, pp. 1425–1430.
- [8] Reinhold, L. (2019) *Diffusionsoffene Estrichfolie*. Bachelor- Arbeit Technische Hochschule Rosenheim.
- [9] Viitanen H.; Ritschkoff, A. (1991) *Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature*. Uppsala: Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forrest Products.
- [10] Krus, M.; Seidler, C. M.; Sedlbauer, K. (2011) *Übertragung des Mould-Indexes auf das Biohygrothermische Modell zur Schimmelpilzvorschau* in: Gesundheits-Ingenieur – Haus- technik – Bauphysik – Umwelttechnik 132. H. 1, S. 32–36.
- [11] Prüfbericht P17-027.1/2017: *Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden sowie von Deckenaufbauten mit natürlicher und mechanischer Trocknung nach einem Wasserschaden* [online]. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik. www. ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumen- te/oeffentlicheBerichte/ht/Bautrocknung-Wand-Boden- Decke/SparkassenVersicherung-Zusammenfassung.pdf
- [12] WTA-Merkblatt 6-16:2019-01 (2019) *Technische Trocknung an durchfeuchteten Bauteilen, Teil 2: Planung, Ausführung und Kontrolle*. Beuth, Berlin.
- [13] Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM [online]. <https://cpm.fraunhofer.de/>
- [14] Buller, J.; Laschewsky, A.; Wischerhoff, E. (2013) *Photoreactive oligoethylene glycol polymers – versatile compounds for surface modification by thin hydrogel films*. Soft Matter 9 (2013), pp. 929–937.
- [15] Fritsch, N.; Pretsch, T. (2014) *Programming of Temperature- Memory Onsets in a Semicrystalline Polyurethane Elastomer*. Macromolecules 47, pp. 5952–5959.
- [16] Trojer, M. A.; Nordstierna, L.; Bergék, J.; Blanck, H.; Holm- berg, K.; Nyden, M. (2015) *Use of microcapsules as controlled release devices for coatings* in: Advances in Colloid and Interface Science 222, pp. 18–43.

**Autoren**

Prof. Dr. Martin Krus (Korrespondenzautor)  
martin.krus@ibp.fraunhofer.de  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Gruppenleitung Feuchtemanagement und Materialkennwerte  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley

Lorentz Reinhold  
lorenz.rein@gmail.com  
Technische Hochschule Rosenheim  
Fakultät für Holztechnik und Bau  
Hochschulstraße 1  
83024 Rosenheim

Steffen Tröger-Müller  
steffen.troeger-mueller@iap.fraunhofer.de  
Fraunhofer IAP  
Geiselbergstraße 69  
14476 Potsdam-Golm

**Zitieren Sie diesen Beitrag**

Krus, M.; Reinhold, L.; Tröger-Müller, S. (2020) *Einsatz einer diffu- sionsoffenen Folie für schwimmenden Estrich zur Vermeidung von Feuchteschäden*. Bauphysik 42, H. 5, S. 226–235.  
<https://doi.org/10.1002/bapi.202000020>



## **Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP**

### **Stuttgart**

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

### **Holzkirchen**

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

**[www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de)**