

Peter Schießl, Karl-Heinz Wiegrink
Technische Universität München/Germany

Austrocknungsverhalten von Calciumsulfat-Fließestrichen

Zusammenfassung: Durch Versuche und rechnerische Simulation wurde gezeigt, dass der Feuchtetransport in Calciumsulfat-Fließestrichen durch zwei Transportvorgänge, kapillare Weiterleitung und Dampfdiffusion, zutreffend beschrieben werden kann. Der Übergangsschicht kommt in den ersten Tagen, während der kapillaren Trocknung, eine entscheidende Bedeutung zu. Daher hat zu Beginn die Ventilation maßgeblichen Einfluss auf die Austrocknungsgeschwindigkeit. Im weiteren Verlauf ist bei isothermen Verhältnissen die relative Feuchte der Umgebungsluft entscheidend.

Drying characteristics of calcium sulfate flow screeds

Summary: Tests and numerical simulation have shown that the moisture transport in calcium sulfate flow screeds can be described correctly by two transport processes, namely capillary transmission and vapour diffusion. In the first few days during the capillary drying the transition layer is of crucial importance. At the beginning the ventilation is therefore extremely important for the rate of drying. Later on the relative humidity of the ambient air is the deciding factor under isothermal conditions.

Comportement de dessiccation de chapes de sulfate de calcium liquides

Résumé: A l'aide d'essais et de simulation par calcul, il a été montré que le cheminement de l'humidité dans les chapes de sulfate de calcium liquides peut être décrit de façon pertinente par deux processus de cheminement, la transmission capillaire et la diffusion par vapeur. La couche transitoire assume pendant les premiers jours, durant le séchage capillaire, un rôle décisif. C'est la raison pour laquelle au début la ventilation exerce une influence décisive sur la vitesse de dessiccation. Ensuite, en présence de conditions isothermes, c'est l'humidité de l'air ambiant qui est décisive.

El secado del lecho fluido para pavimentación de sulfato de calcio

Resumen: Ensayos y simulaciones numéricas han demostrado que el transporte de la humedad en lechos fluidos para pavimentación de sulfato de calcio puede describirse con precisión mediante dos procesos, la transmisión capilar y la difusión de vapor. La zona de transición cobra un significado especial en los primeros días, durante que el secado capilar. Esta es la razón por la que la ventilación en el comienzo resulta decisiva para la velocidad de secado. En el desarrollo del proceso y en condiciones isotermas cobra gran importancia la humedad relativa en el ambiente.

1 Einleitung

In Calciumsulfat-Fließestrichen werden Halbhydrate oder Anhydrite als Bindemittel genutzt. Beim Anmachen mit Wasser nehmen die Bindemittel während der Erhärtung einen Teil des Wassers auf und reagieren damit zu den Festigkeitsbildenden Phasen.

Um die Verarbeitbarkeit auf der Baustelle als Fließestrich zu ermöglichen, ist jedoch mehr als das zur Erhärtung notwendige Wasser erforderlich. Die vorhandene Überschusswassermenge, ca. 7 bis 8 M.-%, ist im Estrich als Feuchte messbar und soll in der Trocknungsphase des Estrichs an die Umgebungsluft abgegeben werden. Insbesondere bei der Verlegung von dampfdichten Belägen spielt die vorhandene Restfeuchte des Estrichs eine große Rolle, da eine zu hohe Restfeuchte zu Schäden in Estrich und Belag führen kann.

Neben der Festigkeitsentwicklung ist das Austrocknungsverhalten von Estrichen damit für den Baufortschritt häufig von entscheidender Bedeutung.

1 Introduction

Hemihydrates or anhydrites are used as the binders in calcium sulfate flow screeds. When they are mixed with water the binders take up part of the water during the hardening and react with it to produce the strength-forming phases.

However, more water than is necessary for the hardening is needed to make the material workable on the construction site as a flow screed. The excess quantity of water, approximately 7 to 8 wt.%, can be measured in the screed as moisture and should be given off to the ambient air during the drying phase of the screed. The residual moisture remaining in the screed plays an important part, especially when placing coverings that are impermeable to moisture, as excessively high residual moisture can harm the screed and the covering.

Not only the strength development but also the drying characteristics of screeds are therefore often of crucial importance for the progress of construction.

In einem Forschungsvorhaben wurden durch die Industrie-gruppe Estrichstoffe auf Calciumsulfatbasis im Bundesverband der Gipsindustrie e.V. und dem Industrieverband Werkmörtel e.V. zahlreiche Fließestriche untersucht [1, 2]. An einem repräsentativen Fließestrich wurde das Austrocknungsverhalten detaillierter untersucht und rechnerisch simuliert.

2 Feuchtetechnische Grundlagen

2.1 Feuchtespeichervermögen

Poröse Baustoffe werden als vollständig trocken bezeichnet, wenn sie kein verdampfbares bzw. nur chemisch gebundenes Wasser enthalten. Dieser Zustand wird gemäß DIN 52620 [3] durch Trocknen bis zur Massekonstanz erreicht.

Im Kontakt mit Wasser oder mit feuchter Luft bleiben poröse mineralische Baustoffe wie Calciumsulfat-Fließestriche nicht trocken, sondern nehmen in ihrem Porensystem Wasser auf. Die Menge des aufgenommenen Wassers hängt dabei von den Umgebungsbedingungen ab. Je feuchter die Umgebungsluft und je höher die Temperatur ist, um so mehr Wasser nimmt der Baustoff auf. Der Zusammenhang zwischen der Menge des aufgenommenen Wassers und der relativen Luftfeuchte bei bestimmten Temperaturen wird in Sorptionsisothermen dargestellt (**Bild 1**).

Die Sorptionsisothermen von Calciumsulfat-Fließestrichen weisen einen typischen S-förmigen Verlauf auf. Im Bereich des üblichen Wohnraumklimas beträgt ihr Feuchtegehalt nur ca. 0,2 M.-%. Bei höherer relativer Luftfeuchte weist die Sorptionsisotherme einen steilen Verlauf auf. Bis zu ca. 95 % r.F. kann die Sorptionsisotherme versuchstechnisch bestimmt werden. Danach beginnt der Bereich der freien, kapillaraktiven Wasseraufnahme, der durch die Fähigkeit poröser Materialien, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufzusaugen, bestimmt wird [4].

Calciumsulfat-Fließestriche werden i. d. R. nicht wieder befeuchtet und trocknen daher vom Zustand der vollständigen Wassersättigung nach der Herstellung in Richtung der Ausgleichsfeuchte aus.

2.2 Feuchtetransport

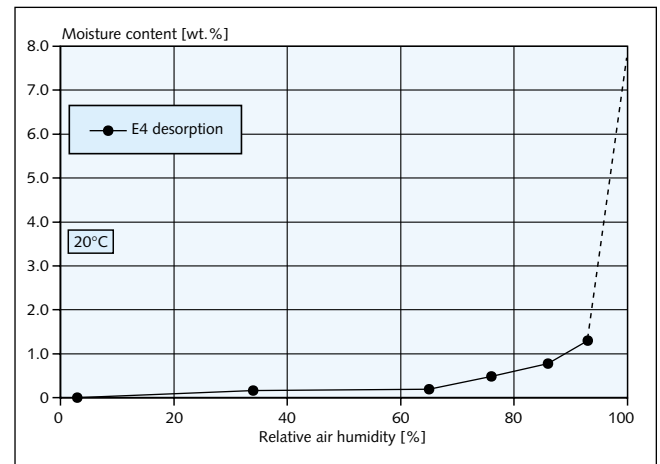
2.2.1 Allgemeines

Ändern sich die hygrischen Umgebungsbedingungen, so ist das Feuchtgleichgewicht des Baustoffs gestört, und Feuchtigkeit wird vom Baustoff aufgenommen bzw. an die Umgebung abgegeben. Dabei werden in der Literatur [5] zahlreiche Transportmechanismen genannt, um diese Vorgänge zu beschreiben.

2.2.2 Feuchtetransport gasförmig

Bei unterschiedlichen Partialdrücken angrenzender und verbundener Gasräume (z. B. Raumluft und Porenraum eines mineralischen Baustoffs) haben die Wasserdampfmoleküle das Bestreben, sich gleichmäßig zu verteilen. Dies führt zu einem als Dampfdiffusion bezeichneten Feuchtetransport von Bereichen höherer r. F. zu Bereichen geringerer r. F.

Nach DIN 52615 [6] kann dieser Transportmechanismus experimentell ermittelt werden und durch den Verhältniswert μ der Diffusionskoeffizienten einer Materialschicht und einer gleich dicken Luftschicht beschrieben werden.



1 Sorptionsisotherme von Calciumsulfat-Fließestrich [4]

1 Sorption isotherm of a calcium sulfate flow screed [4]

Numerous flow screeds were investigated in a research project by the industrial group for calcium-sulfate-based screed materials within the Federal German Association of the Gypsum Industry and the Industrial Association of Factory Mixed Mortars. [1, 2]. The drying characteristics were investigated in detail on representative flow screeds and simulated numerically.

2 Basic moisture technology principles

2.1 Moisture storage capacity

Porous building materials are designated as completely dry if they contain no evaporable water or only contain chemically combined water. This condition is achieved by drying to constant weight in accordance with DIN 52620 [3].

Porous mineral building materials, such as calcium sulfate flow screeds, do not remain dry when in contact with water or moist air but take up water into the system of pores. The quantity of water taken up depends on the ambient conditions. The moister the ambient air and the higher the temperature the more water is taken up by the building material. The relationship between the quantity of water taken up and the relative air humidity at given temperatures is shown in sorption isotherms (**Fig. 1**).

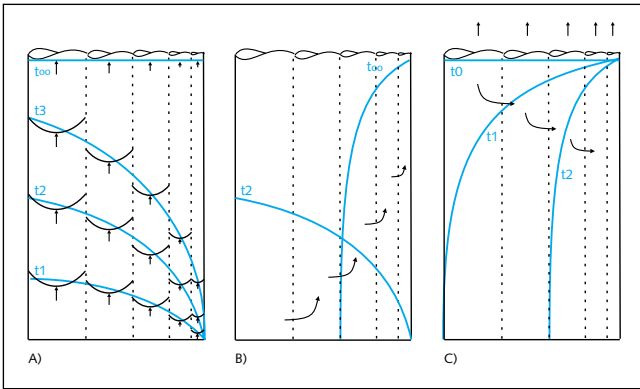
The sorption isotherms of calcium sulfate flow screeds have a typical S-shaped curve. In the range covered by the usual living room climate its moisture content is only about 0.2 wt.%, but at higher relative humidities the sorption isotherm exhibits a steep gradient. Up to about 95 % r. h. the sorption isotherm can be determined by testing. After that the region of free, capillary-active, water absorption begins, which is determined by the ability of porous materials to absorb water until free water saturation is reached [4].

In general, calcium sulfate flow screeds are not moistened again and after production therefore dry towards equilibrium moisture from a condition of complete water saturation.

2.2 Moisture transport

2.2.1 General

If the hygroscopic ambient conditions change then the moisture equilibrium in the building material is disturbed and moisture is taken up in the building material or given off to the



2 Schematische Darstellung des kapillaren Wassertransports bei miteinander verbundenen Kapillaren a) normales Saugen, b) Weiterverteilung nach Unterbrechung, c) Weiterverteilung bei Austrocknung nach vollständiger Wassersättigung, nach [8]

2 Diagrammatic representation of the capillary water transport in interconnected capillaries; a) normal suction, b) redistribution after interruption, c) redistribution during drying after complete water saturation (taken from [8])

2.2.3 Feuchtetransport flüssig

Die Kapillarleitung stellt bei hohen Feuchten den maßgeblichen Feuchtetransport in porösen Stoffen dar. Der Transport kann als kapillares Saugen in einer Einzelkapillare mit dem mittleren Durchmesser des Porenraums dargestellt werden. Treibende Kraft sind die Oberflächenspannung des Wassers und die Grenzflächenspannungen zwischen Wasser und Porenoberfläche. Es gilt dabei, je geringer der Durchmesser der Kapillare ist, desto stärker ist die Saugkraft, aber desto langsamer ist die Sauggeschwindigkeit, da der Transport durch den Strömungswiderstand gebremst wird. Durch die Berechnung des Strömungswiderstandes lässt sich die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit darstellen. Mit dieser Modellvorstellung wird auch der Wasseraufnahmekoeffizient nach DIN 52617 bestimmt [7]. Ein großer Nachteil dieser einfachen Modellvorstellung ist, dass ein Feuchtegradient im Baustoff nicht erklärbar ist. In einer bestimmten Bauteiltiefe sind nur die Zustände „nicht gefüllt“ oder „vollständig gefüllt“ möglich.

Das reale Porensystem besteht jedoch aus einer Vielzahl von unterschiedlich großen Poren, die räumlich angeordnet und untereinander vernetzt sind. In **Bild 2** ist das Porensystem vereinfacht als parallel angeordnete Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers dargestellt, die untereinander verbunden sind. Durch den geringeren Strömungswiderstand saugen die größeren Kapillaren schneller als die kleineren. Hierdurch kommt es rechnerisch zu einer Feuchteverteilung über die Estrichdicke. Nach ausreichend langer Saugzeit stellt sich ein Endzustand ein, bei dem alle Kapillaren gefüllt sind.

Wird der Saugvorgang unterbrochen, so findet eine Weiterverteilung der Feuchte statt. Diese beruht auf der größeren Saugkraft der noch nicht gefüllten kleineren Kapillaren, die die größeren Kapillaren über die Querverbindungen leer saugen. Da die Weiterverteilung von den kleineren Kapillaren bestimmt wird, und deren Sauggeschwindigkeit deutlich kleiner ist, ist die Umverteilung um 1 bis 2 Größenordnungen langsamer als das kapillare Saugen [4].

Calciumsulfat-Fließestriche werden i. d. R. nicht wiederbefeuchtet, sondern trocknen vom Zustand der vollständigen

surroundings. Numerous transport mechanisms for describing these processes are mentioned in the literature [5].

2.2.2 Gaseous moisture transport

If there are differing partial pressures in adjacent and connected gas spaces (e. g. room air and pore spaces in a mineral building material) the water vapour molecules attempt to distribute themselves uniformly. This leads to moisture transport from areas of higher relative humidity to areas of a lower relative humidity, known as vapour diffusion.

This transport mechanism can be determined experimentally as described in DIN 52615 [6] and is described by the value of the ratio μ of the diffusion coefficient of a material layer to that of an air layer of equal thickness.

2.2.3 Liquid moisture transport

Capillary transmission represents the dominant type of moisture transport in porous materials where there are high levels of moisture. The transport can be represented as capillary suction in a single capillary that has the average diameter of the pore space. The driving forces are the surface tension of the water and the interfacial tension between water and pore surface. The smaller the diameter of the capillary the stronger is the suction force but the slower is the suction rate as the transport is impeded by the flow resistance. The water absorption can be shown as a function of time by calculating the flow resistance. The water absorption coefficient as defined in DIN 52617 [7] can also be determined by this model concept. A major disadvantage of this simple model is that it cannot deal with a moisture gradient in the building material. Only the conditions “not filled” or “completely filled” are possible at a given depth in the component.

However, the real pore system consists of a large number of pores of different sizes that are three-dimensionally arranged and interconnected. The pore system in simplified form in **Figure 2** as cylindrical capillaries with different diameters arranged in parallel and interconnected with one another. Due to the lower flow resistance the larger capillaries suck up moisture more rapidly than the smaller ones. Theoretically this results in a moisture distribution over the thickness of the screed. After a sufficiently long suction time a final condition is established in which all capillaries are filled.

If the suction process is interrupted then redistribution of the moisture takes place. This is based on the greater suction force of the smaller capillaries that are not yet filled and which suck the larger capillaries empty through the cross connections. The redistribution is determined by the smaller capillaries, and their rate of suction is significantly smaller, so the redistribution is slower than capillary suction by 1 to 2 orders of magnitude [4].

In general, calcium sulfate flow screeds are not moistened again and after production they dry towards equilibrium moisture from a condition of complete water saturation (Fig. 2 c). However, this process is analogous to the redistribution processes in Figure 2 b. The water evaporates at the surface of the screed from all capillaries, but because of their greater suction force the smaller capillaries suck water from the larger capillaries. This means that in spite of the evaporation the smaller capillaries are completely filled for as long as the rate of redistribution is greater than the evaporation loss.

Wassersättigung nach der Herstellung in Richtung der Ausgleichsfeuchte aus (Bild 2 c). Dieser Vorgang ist jedoch analog zu den Umverteilungsvorgängen in Bild 2 b. Das Wasser verdunstet an der Oberfläche des Estrichs aus allen Kapillaren. Die kleineren Kapillaren saugen jedoch aufgrund ihrer größeren Saugkraft Wasser aus den größeren Kapillaren. Hierdurch sind die kleineren Kapillaren trotz der Verdunstung vollständig gefüllt, solange die Weiterverteilung größer ist als der Verdunstungsverlust.

2.2.4 Übergangsschicht

In der Grenzschicht zwischen Baustoff und dem umgebenden Luftraum bildet sich eine Übergangsschicht aus, in der die Luft kaum zirkuliert. Daher kann der Feuchtetransport in der Übergangsschicht nur über Dampfdiffusion erfolgen. In Abhängigkeit von ihrer Dicke kann die Übergangsschicht daher den Dampfttransport aus dem Baustoff in die Umgebungsluft behindern. Dabei ist die Dicke der Übergangsschicht abhängig von der Luftbewegung an der Oberfläche des Baustoffs. Je geringer die Luftbewegung ist, desto dicker ist die Übergangsschicht.

3 Versuche

3.1 Allgemeines

Zur Bestimmung des Trocknungsverhaltens wurden Probekörper konzipiert, mit denen der Gesamtfeuchteverlust über die Trocknungszeit und der Feuchtegradient über die Estrichdicke bestimmt werden konnten. Alle Probekörper wurden im Laborklima bei 20 °C, 65 % r. F. gelagert. Der Laborraum wies eine in klimatisierten Arbeitsräumen üblicherweise vorhandene Luftbewegung auf.

3.2 Masseverlust über die Trocknungszeit

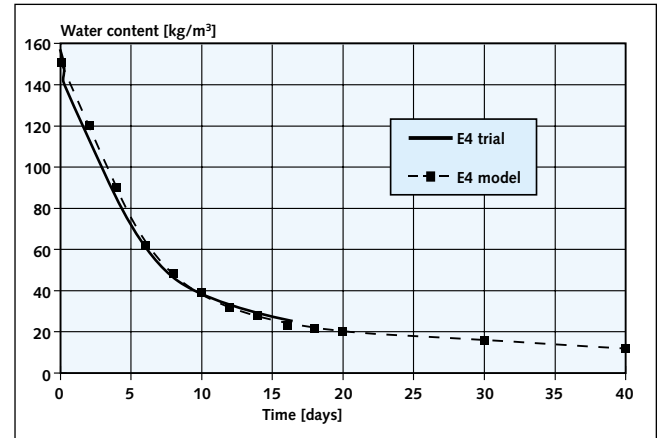
Zur Bestimmung des Feuchteverlustes der Estriche wurden Estrichkleinflächen mit den Abmessungen 300 x 300 x 40 mm³ konzipiert, die, zur Simulation des Austrocknungsverhaltens von Estrichen in der Praxis, an der Unterseite sowie an den vier Seitenflächen durch eine PVC-Schalung abgedichtet waren und nur zur Oberfläche austrocknen konnten [2, 9, 10].

Der Masseverlust durch Austrocknen wurde durch kontinuierliche automatische Wägung der Probekörper bestimmt und ist in **Bild 3** dargestellt. Das Austrocknen zeigt zwei unterschiedliche Bereiche. Innerhalb der ersten 7 Tage nimmt die Feuchte schnell und annähernd linear mit der Zeit von 150 auf ca. 50 kg/m³ ab. Nach rund 7 Tagen ändert sich das Austrocknungsverhalten plötzlich. Die Austrocknung verlangsamt sich und verringert sich im weiteren Verlauf deutlich.

3.3 Feuchtegradienten

Zur Bestimmung der Feuchtegradienten wurden weitere Probekörper mit den Abmessungen 100 x 100 x 40 mm³ hergestellt, die an der Unterseite und an den vier Seitenflächen mit einer wasserdampfdichten Beschichtung versehen wurden und somit nur über die 100 x 100 mm² große Oberfläche austrocknen konnten, um das Austrocknungsverhalten von Estrichen in der Praxis zu simulieren.

Die Probekörper wiesen nach Herstellung eine Dicke von rund 42 mm auf. Sie wurden nach 3 bzw. 7 Tagen gespalten und der mittlere Feuchtegehalt der einzelnen Schichten durch Trocknung über Silicagel bei 40 °C gravimetrisch bestimmt. Die Ergebnisse sind als volle Symbole in **Bild 4** dargestellt. Die



3 Masseverlust von Estrichkleinflächen durch Austrocknung im Laborklima und Ergebnisse der FEM-Berechnung

3 Loss in weight of small areas of screed by drying under laboratory climatic conditions, and results of the FEM calculation

2.2.4 Transition layer

A transition layer in which there is hardly any air circulation is formed in the boundary layer between the building material and the surrounding ambient air. The moisture transport in the transition layer can therefore only take place by vapour diffusion. Depending on its thickness the transition layer can therefore impede the vapour transport from the building material to the ambient air. The thickness of the transition layer is dependent on the air movement at the surface of the building material – the lower the air movement, the thicker the transition layer.

3 Tests

3.1 General

The drying characteristics were determined by designing test pieces with which it was possible to determine the total moisture loss over the drying period and the moisture gradient through the thickness of the screed. All the test pieces were stored under laboratory conditions at 20 °C and 65 % r. h. The laboratory area had the air movement normally present in air-conditioned working areas.

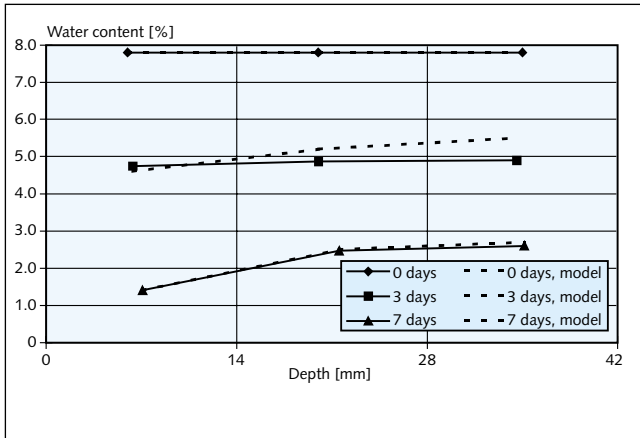
3.2 Loss in weight during the drying period

Small areas of screed with dimensions of 300 x 300 x 40 mm³ were designed for determining the moisture loss from the screeds. These were sealed on the underside and on the four side faces by a PVC mould so that they could only dry out through the surface to simulate the drying characteristics of screeds under practical conditions [2, 9, 10].

The loss in weight during drying was determined by continuous automatic weighing of the test piece and is shown in **Figure 3**. The drying process exhibited two different regions. During the first 7 days the moisture content decreased rapidly and approximately linearly with time from 150 to about 50 kg/m³. The drying characteristics changed suddenly after about 7 days. The drying then slowed down and fell significantly during the rest of the experiment.

3.3 Moisture gradients

Further test pieces with dimensions of 100 x 100 x 40 mm³ were produced for determining the moisture gradients. These were given a water-vapour-impermeable coating on the under-



4 Gravimetrisch bestimmte sowie berechnete Feuchtegradienten für 42 mm dicke Probekörper
 4 Gravimetrically determined and calculated moisture gradients for the 42 mm thick test piece

Feuchte nimmt in den ersten 3 Tagen auf ca. 90 kg/m³ ab. Dabei bildet sich im Estrich nur ein geringer Feuchtegradient aus. Bis zum 7. Tag nimmt der Feuchtegehalt auf ca. 50 kg/m³ ab, wobei sich noch immer nur ein geringer Feuchtegradient über die Tiefe ausgebildet hat.

3.4 Zeit- und tiefenabhängige Bestimmung der Feuchteverteilung mit der Multi-Ring-Elektrode

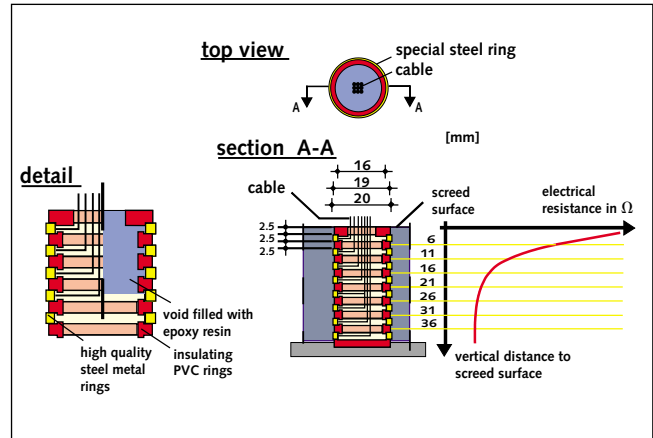
Zur Ermittlung der zeit- und tiefenabhängigen Feuchteverteilung im Estrich wurden Multi-Ring-Elektroden (MRE) in die zuvor beschriebenen Estrichkleinflächen eingesetzt. Der MRE-Sensor besteht aus mehreren Edelstahlringen, die durch Zwischenringe aus Kunststoff in genau definiertem Abstand gehalten werden (Bild 5). Die Dicke der Edelstahl- und der Kunststoffringe beträgt 2,5 mm bei einem Durchmesser von ca. 20 mm. An die Ringe angelötete Kabel erlauben die kontinuierliche Messung der Widerstände des Estrichs zwischen jeweils zwei benachbarten Stahlringen. Damit können im Abstand von 5 mm Messwerte zwischen der Ober- und der Unterseite des Estrichs bestimmt werden. Die Messung der Widerstände erfolgt über Wechselstrommessung mit einem Messbereich bis zu 2 Mega-Ohm. Die gemessenen Widerstände verhalten sich dabei umgekehrt proportional zu den vorhandenen Feuchten im Estrich.

In Bild 6 ist die zeitliche Entwicklung der Widerstände vom Herstellungszeitpunkt an in unterschiedlichen Tiefen von der Oberfläche dargestellt. Bis zum 6. Tag nehmen alle Widerstände unabhängig von der Tiefe gleichmäßig zu. Es bildet sich nur ein geringer Gradient über die Tiefe aus. Erst ab dem 7. Tag nehmen die Widerstände der ersten 10 mm plötzlich deutlich zu. In größeren Tiefen nehmen die Widerstände später stetig zu.

Das bedeutet, dass Calciumsulfat-Fließestriche in den ersten 7 Tagen sowohl in oberflächennahen Schichten als auch auf der Unterseite praktisch gleichmäßig austrocknen, obwohl die Austrocknung nur zur Oberseite erfolgt.

4 Berechnung

Das Austrocknungsverhalten von Calciumsulfat-Fließestrichen wurde mit den FEM-Programmen WUFI und FEM-Masse rechnerisch simuliert [11]. Die erforderlichen Parameter wur-



5 Aufbau der Multi-Ring-Elektrode und Messprinzip
 5 Structure of the multi-ring electrode and test principle

side and on the four side surfaces so that they could only dry out through the 100 x 100 mm² surface in order to simulate the drying characteristics of screeds under practical conditions.

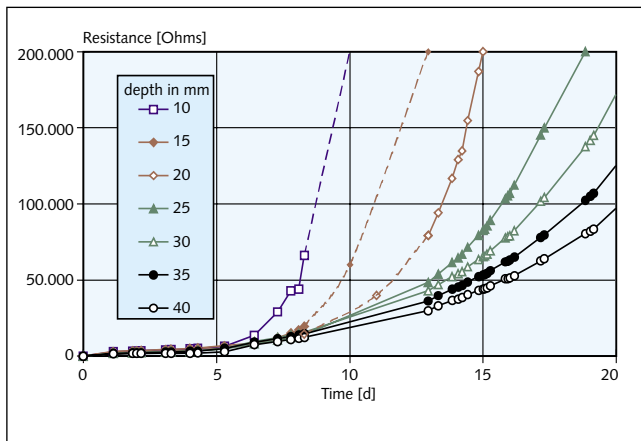
After production the test pieces had a thickness of about 42 mm. They were split after 3 or 7 days and the average moisture contents of the individual layers were determined gravimetrically by drying over silica gel at 40 °C. The results are represented as solid symbols in Figure 4. In the first 3 days the moisture content dropped to about 90 kg/m³ during which only a slight moisture gradient was formed in the screed. By the 7th day the moisture content had decreased to about 50 kg/m³ during which there was still only a slight moisture gradient over the depth of the screed.

3.4 Determination of the moisture distribution with the multi-ring electrode as a function of time and depth

Multi-ring electrodes (MRE) were inserted in the small areas of screed described above to determine the moisture distribution in the screed as a function of time and depth. The MRE sensor consists of several special steel rings that are held at precisely defined spacings by intermediate plastic rings (Fig. 5). The high quality steel and plastic rings have a thickness of 2.5 mm with a diameter of about 20 mm. Cables that are soldered to the rings and passed outwards through the centres of the electrodes permit continuous measurement of the resistance of the screed between each two adjacent steel rings. This makes it possible to determine measured values between the top and bottom of the screed at spacings of 5 mm. The resistances are measured by alternating current measurement with a measuring range of up to 2 megohms. The measured resistances are inversely proportional to the moisture present in the screed.

The changes with time of the resistances from the moment of production are shown in Figure 6 at different depths from the surface. Up to the 6th day all resistances increased uniformly regardless of the depth. Only a slight gradient was formed over the depth of the screed. Only from the 7th day did the resistances of the first 10 mm suddenly increase significantly. Later on the resistances increased steadily at greater depths.

This meant that in the first 7 days the calcium sulfate flow screeds dried out practically uniformly both in the layers close



6 Ergebnisse der MRE-Messung bei Austrocknung von Estrichkleinflächen im Laborklima
6 Results of the MRE measurement during the drying of small areas of screed under laboratory climatic conditions

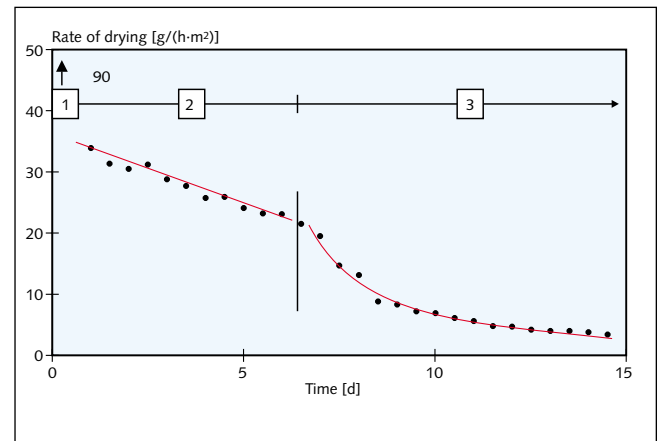
den aus den Untersuchungen von Porenradienverteilungen und -anteilen, Dampfdiffusions- und Wasseraufnahmekoeffizienten von [1, 2, 12] bestimmt.

Der rechnerisch ermittelte Feuchteverlust über die Zeit ist in Bild 3 dargestellt. Laborversuch und Berechnung stimmen gut überein. Sowohl der zeitliche Verlauf als auch die auffällige Teilung in zwei unterschiedliche Austrocknungsbereiche können rechnerisch dargestellt werden.

In Bild 4 sind die rechnerisch ermittelten Gradienten als gestrichelte Linien dargestellt. Auch hier stimmen Laborversuch und Berechnung sehr gut überein und belegen, dass Calciumsulfat-Fließestriche in den ersten 7 Tagen ohne deutliche Gradienten über die Estrichdicke austrocknen, obwohl die Austrocknung nur zur Oberseite erfolgt.

Dies lässt sich durch die sehr gute kapillare Weiterleitung im Porensystem der Calciumsulfat-Fließestriche erklären. In **Bild 7** ist der zuvor in Bild 3 dargestellte Masseverlust [kg] über die Zeit als Austrocknungsgeschwindigkeit ($\text{g}/[\text{h}\cdot\text{m}^2]$) über die Zeit dargestellt. Unmittelbar nach der Herstellung ist die Austrocknungsgeschwindigkeit sehr hoch (ca. $90 \text{ g}/[\text{h}\cdot\text{m}^2]$), da der Estrich noch flüssig ist und die Verdunstung von der freien Wasseroberfläche auf der gesamten Probekörperoberfläche stattfindet (Phase 1, Bild 7).

Nachdem die Flüssigkeit an der Oberfläche verdunstet ist, trocknet die Oberfläche ab, und für den Wassertransport und als Verdunstungsfläche steht nur noch der deutlich kleinere Querschnitt des Porenraums zur Verfügung. Ab diesem Zeitpunkt wird das Wasser durch kapillare Zugkräfte aus dem Innern an die Oberfläche transportiert. Die Übergangsschicht behindert den Feuchtetransport von der Oberfläche in die Umgebungsluft. So lange die Transportleistung der Übergangsschicht geringer ist als der kapillare Transport aus dem Innern an die Oberfläche, nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit nur langsam ab und bleibt auf relativ hohem Niveau, da mit zunehmender Austrocknung immer kleinere Poren mit langsamerer Weiterverteilung den Wassertransport von innen nach außen bestimmen. Die Leistungsfähigkeit der Weiterverteilung entscheidet darüber, wie stark der Feuchtegradient im Innern des Estrichs ausgebildet wird (Phase 2, Bild 7).



7 Austrocknungsgeschwindigkeit von Estrichkleinflächen bei Trocknung im Laborklima
7 Rate of drying of small areas of screed during drying under laboratory climatic conditions

to the surface and at the bottom, although the drying only takes place through the top surface.

4 Calculation

The drying characteristics of calcium sulfate flow screeds were simulated numerically with the WUFI FEM program and FEM-Masse [11]. The requisite parameters were determined from the investigations of pore radius distributions and proportions, vapour diffusion coefficients and water absorption coefficients taken from [1, 2, 12].

The moisture loss determined numerically as a function of time is shown in Figure 3. There is good agreement between laboratory tests and the calculation. The numerical calculation shows not only the behaviour with time but also the conspicuous division into two different drying regions.

The numerically determined gradients are shown as dotted lines in Figure 4. Here again there is very good agreement between laboratory tests and the calculations, which confirms that in the first 7 days the calcium sulfate flow screeds dry out without significant gradients through the thickness of the screed although the drying only takes place through the top surface.

This can be explained by the very good capillary transmission in the pore system of calcium sulfate flow screeds. The loss in weight (kg) with time shown previously in Figure 3 is shown in **Figure 7** as a drying rate ($\text{g}/[\text{h}\cdot\text{m}^2]$) plotted against time. Immediately after production the drying rate is very high (approx. $90 \text{ g}/[\text{h}\cdot\text{m}^2]$) as the screed is still liquid and the evaporation takes place from the free water surface over the entire area of the test piece (Phase 1, Fig. 7).

After the liquid on the surface has evaporated the surface dries and only the significantly smaller cross-section of the pore space is available for water transport and as an evaporation surface. From this time the water is transported to the surface from the inside by capillary attraction. The transition layer impedes the moisture transport from the surface to the surrounding air. Provided the transport capacity of the transition layer is lower than that of the capillary transport from the inside to the surface the rate of drying only decreases slowly and remains at a

Nach ca. 7 Tagen ist im Innern des Estrichs die Trocknung so weit fortgeschritten, dass der kapillare Wassertransport nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Die Verdunstungsfront wandert von der Oberfläche in das Innere des Estrichs hinein (Phase 3, Bild 7). In der oberflächennahen Schicht des Estrichs muss der Transport jetzt durch Dampfdiffusion im Porenraum erfolgen. Durch den Wechsel der Transportmechanismen kommt es zu einer deutlichen Abnahme des Feuchteverlustes. Da der Diffusionswiderstand im Porenraum deutlich größer ist als der der Übergangsschicht, beeinflusst die Dicke der Übergangsschicht die Austrocknung nur noch unwesentlich. Der Feuchteverlust nimmt im weiteren Verlauf ständig ab. Zum einen nimmt bei fortschreitender Austrocknung der oberflächennahen Schichten die Transportstrecke, die über Dampfdiffusion überwinden werden muss, stetig zu. Zum anderen nehmen die treibenden Kräfte, der Partialdruckunterschied zwischen Prüfkörperinnern und -oberfläche ab. Der Prüfkörper trocknet so lange, bis im Innern des Estrichs die gleiche relative Feuchte wie in der Umgebungsluft erreicht ist.

Das Austrocknungsverhalten der Calciumsulfat-Fließestriche wird damit in den ersten Tagen, in denen der kapillare Transport aktiv ist, maßgeblich von der Übergangsschicht beeinflusst.

5 Praxisversuche

In praxisnahen Versuchen [13] wurde der Einfluss der Übergangsschicht bestätigt. Hierzu wurden zwei Calciumsulfat-Fließestrichflächen in einer Größe von 3,00 x 4,00 m² mit einer Estrichdicke von rund 35 mm hergestellt. Die Estrichflächen wurden jeweils ca. 2,50 m hoch in Folie eingehaust, um übliche Räume zu simulieren. Ein Luftaustausch mit der Umgebung wurde hierdurch verhindert. In beiden Räumen wurde nach einem Tag ein Kondensrockner aufgestellt. Raum A wurde ohne jegliche Ventilation getrocknet. In Raum B wurden zusätzlich zum Kondensrockner Ventilatoren zur Luftumwälzung aufgestellt.

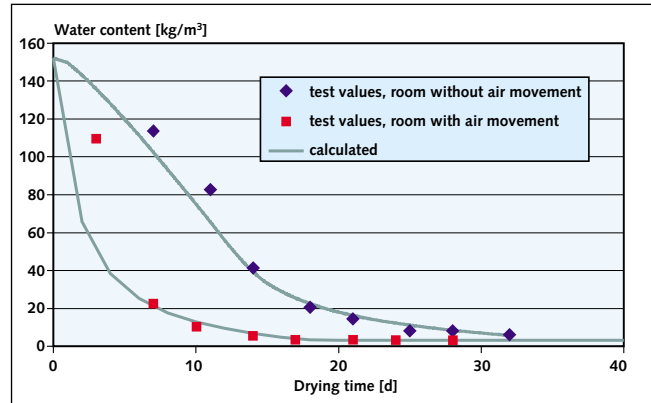
Die Versuchsergebnisse dieser Praxismessungen sind in **Bild 8** als Messpunkte dargestellt. Die mittleren Feuchtegehalte der Estriche wurde im Versuch über die CM-Methode bestimmt.

In **Bild 8** sind als durchgezogene Linien die Ergebnisse der numerischen Berechnung dargestellt. Bei der Berechnung wurden die stehende Luft im Raum A durch eine Übergangsschicht mit einer Dicke von 50 mm und die Ventilation im Raum B durch eine Übergangsschicht mit einer Dicke von 5 mm berücksichtigt.

Die Versuchsergebnisse stimmen mit den numerisch bestimmten Ergebnissen gut überein und bestätigen den Einfluss der Ventilation auf die Übergangsschicht und auf das Austrocknungsverhalten von Calciumsulfat-Fließestrichen.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Institut für Bauforschung Aachen, ibac: Bestimmung mechanischer und feuchtetechnischer Kennwerte von Estrichen auf Calciumsulfatbasis, Prüfung der Estriche E2, E3-2, E4, E5 und E6; Prüfbericht A 3058/1.
- [2] Institut für Bauforschung Aachen, ibac: Feuchtetechnische Kennwerte, Verformungs- und Austrocknungsverhalten von Fließestrichen auf Calciumsulfatbasis; Prüfbericht A 3228/1, noch nicht veröffentlicht.
- [3] DIN 52620, Ausgabe: 1991-04; Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Baustoffen; Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23 °C und 80 % relative Luftfeuchte.



8 Masseverlust durch Austrocknung von Estrichflächen und Einfluss der Ventilation, Praxisversuch und FEM-Berechnung
8 Loss in weight during the drying of areas of screed showing the effect of ventilation; practical trial and FEM calculation

relatively high level as, with increasing drying, the water transport from inside outwards is determined by smaller pores with slower redistribution. The efficiency of the redistribution determines the strength of the moisture gradient inside the flow screed (Phase 2, Fig. 7).

After about 7 days the drying inside the screed has progressed so far that capillary water transport can no longer be maintained. The evaporation front moves from the surface into the inside of the screed (Phase 3, Fig. 7). In the layer of screed close to the surface the transport now has to take place by vapour diffusion in the pore space. The change in transport mechanism causes a significant decrease in the moisture loss. The diffusion resistance in the pore space is significantly greater than that of the transition layer, so the thickness of the transition layer now has only a negligible effect on the drying. There is then a continuous decrease in moisture loss. Firstly, the transport distance that must be overcome by vapour diffusion increases continuously with advancing drying of the layers close to the surface. Secondly, the motive forces, i.e. the difference in partial pressure between the inside of the test piece and the surface, decrease. The test piece continues to dry until the same relative moisture is achieved inside the screed as in the surrounding air.

The drying characteristics of calcium sulfate flow screeds in the first few days when capillary transport is active are therefore substantially influenced by the transition layer.

5 Practical tests

The influence of the transition layer was confirmed in realistic tests [13]. Two 3.00 x 4.00 m² areas of calcium sulfate flow screed were produced with a screed thickness of about 35 mm. In each case the screed areas were enclosed in plastic forms about 2.50 m high to simulate normal rooms. This prevented air exchange with the surroundings. A condensation drier was installed in each of the rooms after one day. Room A was dried without any air movement. Fans were installed in Room B in addition to the condensation drier to circulate the air.

The test results of these practical measurements are shown as measured points in **Figure 8**. The average moisture contents of the screeds were determined in the tests by the CM method.

- [4] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Stuttgart, 1994.
- [5] Oberbeck, N.: Instationärer Wärme-Feuchte-Schadstoff-Transport in Beton Theorie und Berechnung, Dissertation, Braunschweig, 1995.
- [6] DIN 52615, Ausgabe: 1987-11; Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.
- [7] DIN 52617, Ausgabe: 1987-5; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.
- [8] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlage und neue Meßtechniken. Dissertation Universität Stuttgart 1995, Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik.
- [9] IndustrieGruppe Estrichstoffe im Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V., Birkenweg 13, 64295 Darmstadt.
- [10] Industrieverband Werk trockenmörtel e.V., Düsseldorf Str. 50, 47051 Duisburg.
- [11] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchttransport in mehrschichtigen Bauteilen – Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation, Essen, 1983
- [12] Schießl, P.; Wiegrink, K.-H.: Austrocknungs- und Verformungsverhalten von Calciumsulfat-Fließestrichen – Bestimmung der Materialeigenschaften und rechnerische Simulation, gutachterliche Stellungnahme B 2210.
- [13] Gebr. Knauf, Westdeutsche Gipswerke, Laborbericht, noch unveröffentlicht.

The results of the numerical calculation are shown in Figure 8 as continuous lines. The static air in Room A was represented in the calculation by a transition layer with a thickness of 50 mm and the ventilation in Room B by a transition layer with a thickness of 5 mm.

The test results agree well with the numerically determined results and confirm the influence of the air movement on the transition layer and on the drying characteristics of calcium sulfate flow screeds.

Inserentenverzeichnis/Advertiser register

Advertiser: E-mail:	Contact Name: Tel. number:	Advertiser: E-mail:	Contact Name: Tel. number:
BRAUER Maschinentechnik AG info@brauer-getriebe.de	Mr. N. Brauer +49/2871/7033	Herding GmbH Filtertechnik info@herding.com	Ms. Irmgard Nießl +49/9621/630131
CEMAG Anlagenbau GmbH cemag@cemag.de	Mr. Ulrich Meloh +49/5151/989991	Klüber Lubrication München KG petra.scheede@klüber.com	Ms. Petra Scheede +49/89/7876-504
Cemtec GmbH info@cemtec.at	Mr. Franz. Plochberger +43/7223/83620	KREISEL GmbH & Co. KG Wolfram.Kreisel@kreisel.biz	Mr. W. Kreisel +49/35771/98-0
Claudius Peters Technologies reiner.fruehling@claudiuspeters.com	Mr. Reiner Frühling +49/4161/706-319	Mondi Packaging AG robert.pachler@mondipackaging.com	Mr. Robert Pachler +43/1795234032
Doubrava Ges. mbH & Co. KG rudolf.muigg@doubrava.at	Mr. Rudi Muigg +43/7674/601-467	OneStone Consulting Group GmbH harder@onestone.de	Mr. Dr. J. Harder +49/4161/556817
Terruzzi Fercalx SPA info@terruzzi.fercalx.com	Mr. Dr. Daniele Terruzzi +39/0363/41233	Polysius AG veitn@tkt-pol.thyssenkrupp.com	Mr. Norbert Veit +49/2525/992505
Ferro Duo GmbH info@ferroduo.de	Ms. Ute Kehrmann +49/203/60003-0	RUSSIG Fördertechnik GmbH & Co. KG info@russig.de	Mr. Carsten Russig +49/2521/14091
Filter Bau GmbH info@filterbau.de	Mr. Jörg Minkley +49/5723/9899-17	Ventilatorenfabrik Oelde GmbH Inge.teich@venti-oelde.de	Ms. Inge Teich +49/2522/75-124
Hedfeld GmbH, Paul hedfeld@hedfeld.com	Mr. Burkhard Hedfeld +49/2332/6371		