

TKB-Bericht 1

Erscheinungsdatum: März 2012



Industrieverband
Klebstoffe e.V.

Belegereife und Feuchte Versuche zur Trocknung von Estrichen

Erstellt von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im
Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf

Projektleiter und Autor des Berichts:

- Dr. Thomas Brokamp

in Zusammenarbeit mit:

- Universität Siegen
Institut für Bau- und Werkstoffchemie
FB Chemie-Biologie
Prof. Dr. R. Trettin
Dipl.-Chem. T. Müller
Paul-Bonatz-Str. 9 – 11
57076 Siegen

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	2
2.	Materialien und Methoden.....	3
2.1	Herstellung der Probekörper.....	3
2.1.1	Ausgangsstoffe.....	3
2.1.1.1	Bindemittel.....	3
2.1.1.2	Zusatzmittel.....	3
2.1.1.3	Zuschlag.....	3
2.1.1.4	Wasser.....	3
2.1.2	Rezepturen.....	3
2.1.3	Mischen des Estrichmörtels.....	4
2.1.4	Schalungen.....	4
2.1.5	Verarbeitung des Estrichmörtels.....	4
2.2	Lagerung der Proben.....	4
2.2.1	Prismen.....	4
2.3	Messmethoden.....	4
2.3.1	Dichte.....	4
2.3.2	Druckfestigkeit.....	4
2.3.3	Biegezugfestigkeit.....	5
2.3.4	Luftfeuchte.....	5
2.3.5	Darrfeuchte.....	5
2.3.6	CM-Feuchte.....	5
2.4	Messungen.....	5
2.4.1	Eigenschaftsprüfung.....	5
2.4.2	Messungen an Estrichprismen.....	5
3.	Ergebnisse.....	6
3.1	Dichten.....	6
3.2	Festigkeitswerte.....	6
3.3	Trocknungskurven und Diffusionskonstanten.....	6
3.4	Feuchtekenwerte nach Trocknung.....	8
4.	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	9
4.1	Qualität der Messdaten.....	9
4.1.1	Dichte.....	9
4.1.2	Festigkeitswerte.....	10
4.2	Trocknungskurven und Diffusionskonstanten.....	10
4.3	Feuchtekenwerte – Darr-, CM-Werte und korrespondierende Luftfeuchte.....	10
4.3.1	Einfluss der Zementart.....	10
4.3.2	Einfluss des Bindemittel/Sand-Verhältnisses.....	11
4.3.3	Einfluss des W/Z-Wertes.....	11
4.3.4	Einfluss von Fließmitteln und Luftporenbildnern	11
4.3.5	Einfluss der „Vorlagerdauer“ und des Alters.....	11
4.4	Zusammenfassung.....	12
5.	Literatur.....	13
5.1	Normen.....	13
5.2	Andere Quellen.....	13

1. Einleitung

Die Feuchte von Unterböden ist ein wichtiges Kriterium für die sogenannte Belegereife, der Zustand, in dem der Unterboden mit Bodenbelägen und Parkett belegt werden kann. Durch die Untersuchungen von Schnellⁱⁱⁱ in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts galt dieses Thema für die in Deutschland üblichen Bauarten als gut verstanden und die sogenannte „CM-Methode“ⁱⁱⁱⁱ zur Untersuchung der Belegereife als sicheres Verfahren. In den letzten Jahren gab es jedoch zunehmend Kritik (siehe z. B. Heuer^{iv}, Kille^v, TKB^{vi}) an den damals ermittelten Methoden und Feststellungen. Diese Kritik wurzelt im Wesentlichen darin, dass der Stand der Technik auch bei der Estrichherstellung weiter fortgeschritten ist und die heutigen Estrichzusammensetzungen nicht mehr denen entsprechen, die damals von Schnell untersucht worden sind. Insbesondere 3 Punkte wurden dabei von den Kritikern immer wieder thematisiert:

- die geänderten Rohstoffe, insbesondere der Ersatz des CEM I Portlandzementes durch CEM II Kompositzemente,
- die Änderung der Estrichrezepturen in Hinblick auf das Zement/Zuschlag-Verhältnis und
- die zunehmende Verwendung von Additiven, die mit teilweise drastisch verringerten W/Z-Werten einhergegangen ist.

Auch wurde vermutet, dass unter diesen veränderten Bedingungen die Beurteilungswerte von CM-Messungen in Hinblick auf die Belegereife anders als die allgemein bekannten sein würden. Exakt diese Motive hatten bereits Schnell zu seinen Untersuchungen in 1985 geführt^{vii}.

Die TKB hat sich mit diesem Thema in den letzten Jahren intensiv auseinandergesetzt und dann ein breit angelegtes Untersuchungsprojekt mit dem Institut für Bau- und Werkstoffchemie an der Universität Siegen, Leitung Prof. Reinhard Trettin, durchgeführt.

Ziel des Projektes war es, ein besseres Verständnis des Trocknungsprozesses von zeitgemäßen Estrichen zu erlangen und damit auch konkrete Aussagen zur erwarteten Belegereife und deren sichere Bestimmung machen zu können.

Konkret wurden Estrichplatten und Prismen mit unterschiedlichen Zementarten, W/Z-Werten und Additiven hergestellt und diese mit verschiedenen Methoden untersucht. Die Trocknung bei verschiedenen Klimata wurde durch Wiegen, Darr-, CM- und korrespondierende relative Luftfeuchte (KRL)-Messungen verfolgt.

Für die Bezeichnungen werden die o. g. Zementtypen abgekürzt dargestellt, z. B. ist mit CEM2B der oben genannte CEM II/B-S 32,5 gemeint. Das Fließmittel enthielt Wasser, dieser Wasseranteil wird oben gesondert ausgewiesen und dann bei Fließmittel nur die Wirkstoffmenge aufgeführt.

Es wurde durchgehend ein Gestein/Zement-Wert von 6 : 1 genommen.

Der Wasser/Zement-Wert lag bei 0,55 (= 7,3 Gew.-%) bzw. 0,40 (= 5,3 Gew.-%).

Es sei hier schon darauf hingewiesen, dass die Wassermengen zur Einstellung der gewünschten Konsistenz ausreichen (siehe 2.1.3).

2.1.3 Mischen des Estrichmörtels

Das Mischen erfolgte mit einer speziellen Estrichpumpe^{ix}. Die Maschine wurde außerhalb des Labors mit den Bestandteilen der jeweiligen Rezeptur gefüllt, das Mischgut wurde dann im Labor weiter verarbeitet.

Die Konsistenz der Mischungen wurde mit einem Ausbreitmaß überprüft und in fast allen Fällen als „praxisüblich, steif“ beurteilt (Ausbreitmaß: 11 cm). Ausnahmen waren hier die Mischung CEM2B/WZ (= CEM II/B-S/WZ), die als „sehr steif, aber auch noch praxisüblich“, und die Mischung CEM2B/LP (= CEM II/B-S/LP), die durch den Luftporenbildner als „plastisch“ beurteilt worden sind. Nach dem Ausschalen und während der Versuche konnte festgestellt werden, dass das Material hohlraumfrei verdichtet wurde und ein homogenes Erscheinungsbild aufwies.

2.1.4 Schalungen

Es wurden Normprismen gemäß DIN EN 13892-1:2003-02, abweichend aber in Prismenformen aus Styropor, hergestellt. Die Oberflächenhärte der Styroporformen entspricht dabei nicht der Norm, dies stand jedoch einer ordnungsgemäßen Verdichtung (siehe Dichten) nicht im Wege. Auch ist die Oberfläche des Styropors und damit der Probenkörper etwas rauer.

2.1.5 Verarbeitung des Estrichmörtels

Die Formen wurden zunächst halb befüllt und anschließend mit einem geeigneten Werkzeug verdichtet. Dann wurde der Rest eingefüllt und ebenso verdichtet. Gemäß DIN EN 13892-1:2003-02 wurde überstehendes Material abgezogen und die Oberfläche geglättet.

2.2 Lagerung der Proben

2.2.1 Prismen

Nach dem Füllen der Prismenformen wurden diese durch Verpacken dicht verschlossen und bis zur Prüfung bei 20 °C gelagert. Zum Beginn der Prüfungen

nach 2, 14, 28 oder 56 Tagen wurden die Prismen ausgeformt, die 4 „geschlossenen“ Seiten mit Bitumenband/Alufolie versiegelt, die 2 späteren Diffusionsseiten angeschliffen, in Folie dicht versiegelt (damit kein Feuchteausaustausch mit der Umgebung stattfindet) und zu den verschiedenen Klimakammern verbracht. Folgende Klimata wurden gewählt:

- 23 °C/35 % r. LF.
- 23 °C/45 % r. LF.
- 23 °C/65 % r. LF.
- 23 °C/80 % r. LF.
- 23 °C/90 % r. LF.
- 23 °C/98 % r. LF.

Die Probenbezeichnungen enthalten jeweils einen Hinweis auf die Vorlagerung und die „Diffusions-“Lagerung. Die Bezeichnung

- „45/CEM2A/28d“

verweist z. B. auf ein Material mit dem CEM II/A-LL Zement als Bindemittel, das 28 Tage (d) abgeschlossen verpackt vorgelagert und dann bei 45 % relativer Luftfeuchte weiter gelagert wurde.

2.3 Messmethoden

2.3.1 Dichte

Die Dichte wurde als Quotient des Ausschalgewichtes und des Volumens der Normprismen (= 4,0 * 4,0 * 16,0 cm³ = 256 cm³) bestimmt.

2.3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 1015-11 bestimmt. Ein Normprisma wurde in einer Prüfpresse unter konstanter Laststeigerung (500 N/s) bis zum Bruch belastet. Das Alter der Proben zum Prüfzeitpunkt variiert, siehe Tabelle 2.

Die Berechnung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 13892-2:

$$R_c = F_c / A$$

Dabei ist:

- A ist die Fläche des auf Druckfestigkeit zu prüfenden Prüfkörpers, der mit den Auflagerplatten in Berührung kommt (Nennwert: 1.600 mm²);
- F_c ist die Bruchlast, bei der Druckfestigkeitsprüfung, in Newton (N);
- R_c ist die aus den Prüfkennwerten bestimmte Druckfestigkeit, in N/mm².

2.3.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 1015-11 bestimmt. Ein Normprisma wurde in einer Prüfpresse unter konstanter Laststeigerung (50 N/s) bis zum Bruch belastet. Das Alter der Proben zum Prüfzeitpunkt variiert, siehe Tabelle 2.

Die Berechnung der Biegezugfestigkeit erfolgt nach DIN EN 13892-2:

Biegezugfestigkeit:

$$R_f = (1,5 * F_f * l) / (b * d^2)$$

Dabei ist:

- F_f ist die Bruchlast bei der Biegezugfestigkeitsprüfung, in Newton (N);
- l ist der Abstand zwischen den Achsen der Auflagerrollen bei der Biegezugfestigkeitsprüfung, in Millimeter (mm);
- b ist die Breite des Prüfkörpers unter der mittleren Rolle bei der Biegezugfestigkeitsprüfung, in Millimeter (mm);
- d ist die Höhe des Prüfkörpers unter der mittleren Rolle bei der Biegezugfestigkeitsprüfung, in Millimeter (mm);
- R_f ist die aus den Prüfkennwerten bestimmte Biegezugfestigkeit, in N/mm².

2.3.4 Luftfeuchte

Für die Messung der korrespondierenden Luftfeuchte wurden zerkleinerte Proben mit einem Durchmesser von ca. 1,5 cm und einem Gesamtgewicht von ca. 50 g in einem handelsüblichen Gefrierbeutel mit einem Volumen von 1 l gegeben. Für die Messung der rel. Luftfeuchte wurde eine Gann Hydromette RTU 600 verwendet. Der Beutelschaft wurde dreimal umgeschlagen, Luft wurde aus dem Beutel verdrängt und eine mit Parafilm präparierte, abgeschnittene Messkappe mittig eingesetzt und der Beutel mithilfe eines Haushaltsgummiringes abgedichtet.

Nach 15 Minuten wurde der Beutel vorsichtig durchgeknetet und der Messfühler der Hydromette durch den Parafilm in den Beutel gestoßen. In dem Moment des Durchbruchs durch den Parafilm verschloss die Knete, welche am Messfühler angebracht war, die Messkappe bereits wieder. Es fand kein Luftaustausch mit der Umgebung statt.

Nach 29 min wurde der Beutel erneut kurz durchgeknetet und nach 30 min der Wert am Gerät abgelesen.

2.3.5 Darrfeuchte

Zur Feuchtebestimmung der Prismen nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte wurden die Proben im Trockenschrank gedarrt. Calciumsulfatfließestrichpro-

ben bei 40 °C, Zementestrichproben bei 105 °C. Die Proben wurden vor der Trocknung und im Anschluss wiederholt bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz (Massenänderung < 0,005 % der Masse des feuchten Probekörpers) gewogen.

2.3.6 CM-Feuchte

Das Probenmaterial wurde mit einem Fäustel auf eine Korngröße von kleiner 5 mm zerkleinert. Es wurden 50 g Probenmaterial verwendet bei Zementestrichproben, 100 g bei Calciumsulfatfließestrich. Die Wägung erfolgte mit einer Laborwaage mit einer Messgenauigkeit von 0,05 g. Das Prüfgut wurde zusammen mit den zum Prüfgerät gehörenden Mahlkugeln und einer CM-Ampulle in die Druckflasche gegeben.

Die eigentliche Prüfung wurde wie folgt durchgeführt:

- 2 Min. kräftiges Schütteln
- 3 Min. warten
- 1 Min. kräftiges Schütteln
- 4 Min. warten
- 10 Sek. kräftiges Schütteln

Anschließend direktes Ablesen des CM-Messwertes auf der entsprechenden Skala.

2.4 Messungen

2.4.1 Eigenschaftsprüfung

An den Materialien wurden die gemäß DIN EN 13813:2003-01 festgelegten normativen Eigenschaftsprüfungen durchgeführt. Diese umfassen die Ermittlung der Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie bei Calciumsulfatestrichen den pH-Wert. Die Herstellung erfolgte im Normklima 23/50. Das Schwindverhalten wurde ab dem 2. Tag an Prismen geprüft.

2.4.2 Messungen an Estrichprismen

Im Anschluss an die Vorlagerung (2 d, 14 d, 28 d und 56 d) wurden die Prismen gewogen, anschließend 4 Seitenflächen (2 mal 40 * 40 mm², 2 mal 40 * 160 mm²) mit Bitumendichtband versiegelt, erneut gewogen, in das Prüfklima (23/98, 23/90, 23/80, 23/65, 23/45, 23/35, jeweils Temperatur in °C und rel. Luftfeuchte in %) gegeben und dann das Gewicht während der weiteren Lagerung geprüft. Ein Wasserdampfaustritt konnte auf 2 gegenüberliegenden Flächen von 40 * 160 mm² erfolgen.

Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wurden die Prüfkörper in Alufolie und Folie dicht verschlossen und zur Universität Siegen für die Darr-, CM- und korr. rel. Luftfeuchte-Messungen verbracht. Das Alter der Proben bei Prüfung ist in den Tabellen 2 und 4 verzeichnet.

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen in Form von Tabellen und Graphiken dargestellt.

3.1 Dichten

Die in Tabelle 2 (s. Anhang 1) niedergelegten Werte für die Dichte liegen um $2,15 \text{ g/cm}^3$ für die Zementmörtel, um $1,94 \text{ g/cm}^3$ für den Calciumsulfatmörtel. Diese Werte sind gut vergleichbar mit den Dichten praxisüblicher Estriche. In Tabelle 2.1 sind die Mittelwerte der Dichte aufgeführt.

3.2 Festigkeitswerte

Bei den Festigkeitswerten ist das Bild uneinheitlich. Um die Werte besser vergleichen zu können, findet man in Tabelle 2.1 den Mittelwert der Festigkeitswerte für die verschiedenen Bindemitteltypen und Parameter. Hier fällt auf, dass sowohl die Additive (Luftporenbildner, Verflüssiger) als auch der verringerte W/Z-Wert sich negativ auswirken. Beim CEM2B/WZ wird sogar – im Mittel – die Mindestanforderung für die Druckfestigkeit leicht unterschritten.

Tabelle 2.1: Mittelwerte der Dichten und Festigkeitswerte der Prismen

Bindemitteltyp	Variierter Parameter	Dichte in g/m^3	Druckfestigkeit in N/mm^2	Biegezugfestigkeit in N/mm^2	Standardabweichung der Dichte	Standardabweichung der Druckfestigkeit	Standardabweichung der Biegezugfestigkeit
CEM1		2,14	28,83	6,27	0,05	3,07	0,82
CEM2A		2,23	30,30	6,84	0,05	6,54	0,99
CEM2B		2,15	30,19	6,33	0,05	5,64	0,69
CEM2B/FM	FM	2,15	21,58	5,98	0,04	5,15	1,07
CEM2B/LP	LP	2,09	22,60	5,39	0,05	4,07	0,62
CEM2B/WZ	WZ	2,16	19,27	5,58	0,04	5,07	0,77
CSF		1,94	18,04	5,51	0,03	2,67	1,38

Letzteres ist auch beim CSF zu sehen, hier ist jedoch die Ursache, dass die feuchtgelagerten Proben nicht die notwendige Festigkeit erreichen und damit den Mittelwert verringern. Bei niedrigen Feuchten, also im trockenen Zustand, erreichen die Proben die Mindestanforderungen.

3.3 Trocknungskurven und Diffusionskonstanten

In Tabelle 3 findet man die Messdaten für die Trocknungskurven, jeweils als Datenpaar bestehend aus Messzeitpunkt und der auf den reinen Probenkörper

(also nach Abzug der Masse von Abdeckmaterial) bezogenen Masse.

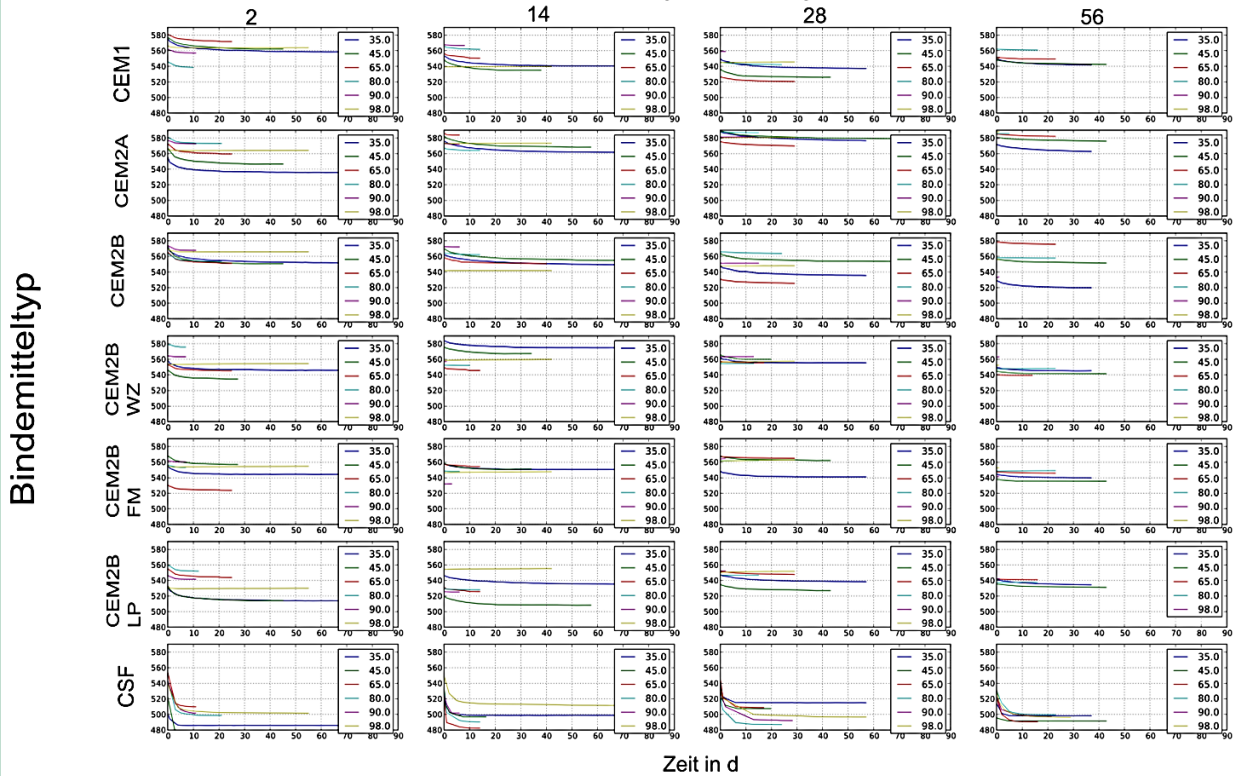
(Anmerkung: Die Tabelle 3 ist wegen ihres Umfangs nicht in der vorliegenden gedruckten Form des TKB-Berichts 1 enthalten, sondern nur in der online-Version, die unter www.klebstoffe.com abgerufen werden kann.)

Eine graphische Darstellung der Tabelle 3 findet man in Graphik 1, für Graphik 2 wurden die Massen jeweils auf die Ausgangsmasse normiert umgerechnet und dargestellt.

Die Diffusionskonstanten werden nach der Halbwertszeitmethode^x bestimmt.

Graphik 1: Abnahme des Gewichts (in g) der Probekörper

Vorlagerdauer in Tagen

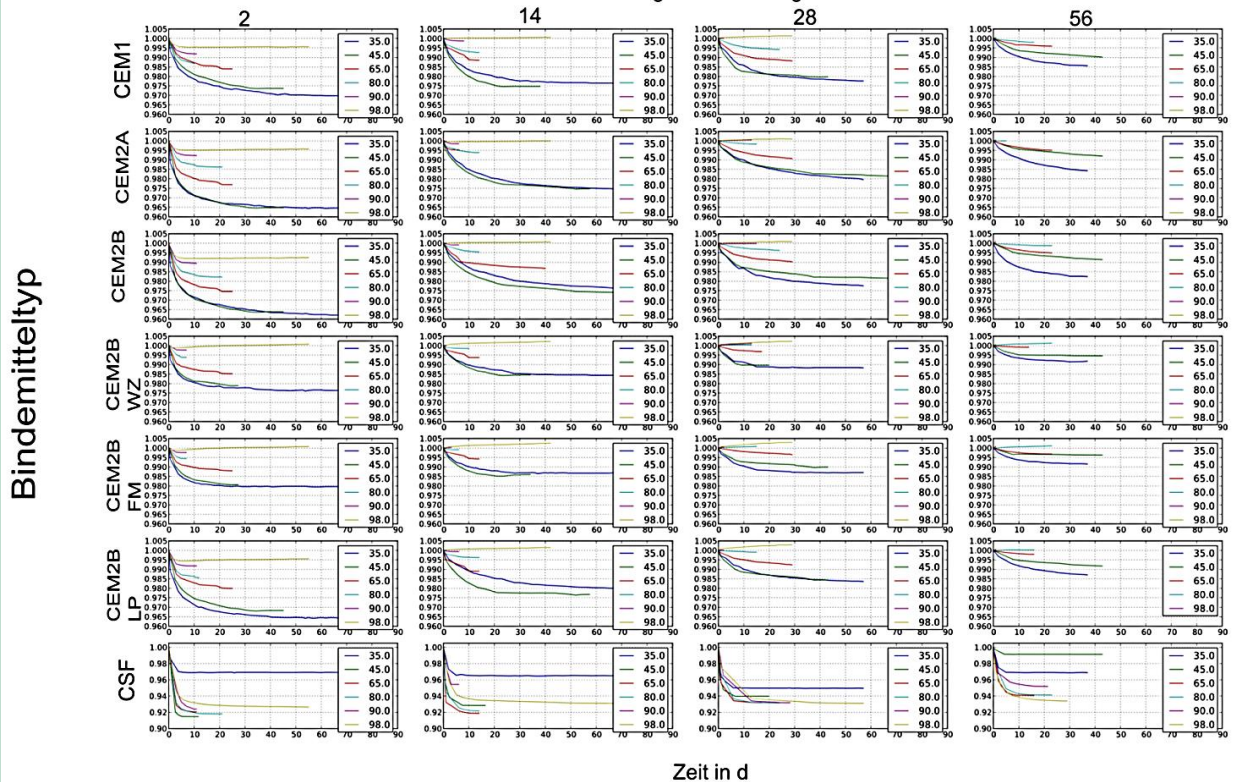


Zeit in d

In der Legende ist jeweils die rel. Luftfeuchte der Lagerung angegeben.

Graphik 2: Auf das Startgewicht normierte Abnahme des Gewichts der Probekörper

Vorlagerdauer in Tagen



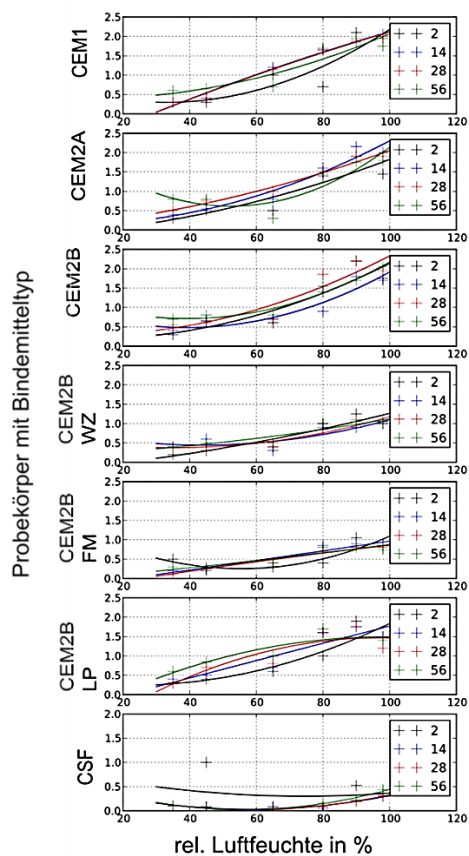
Zeit in d

In der Legende ist jeweils die rel. Luftfeuchte der Lagerung angegeben.

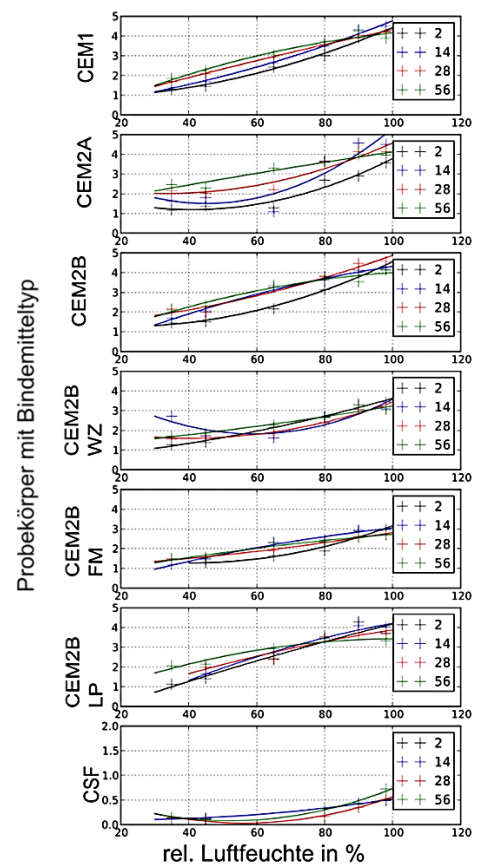
3.4 Feuchtekenwerte nach Trocknung

Die nach der Trocknung im jeweiligen Klima ermittelten Darr- und CM-Werte, die aus den Halbwertszeiten ermittelten Diffusionskonstanten sowie die direkt an den Proben gemessenen korrespondierenden relativen Luftfeuchten und die bei der Trocknung gemessenen Gewichtsverluste findet man in Tabelle 4 (siehe Anhang 3). Graphische Darstellungen findet man in den Graphiken 3, 4, 5 und 6.

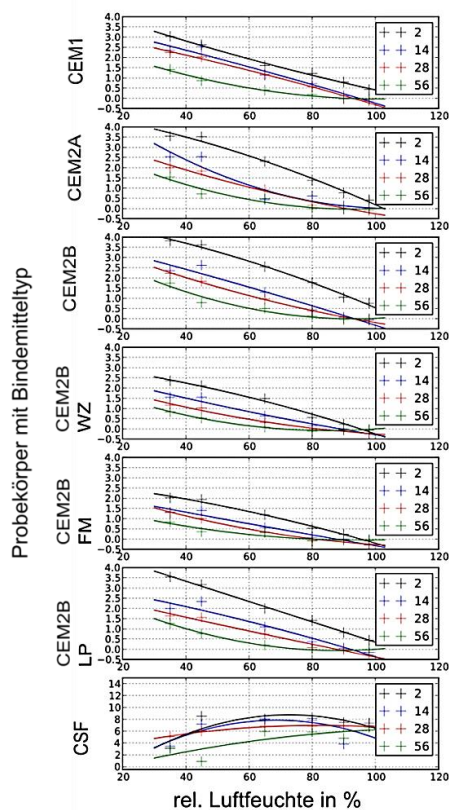
Graphik 3: CM-Werte in %
der Probekörper nach Vorlagerung (d) und Klima



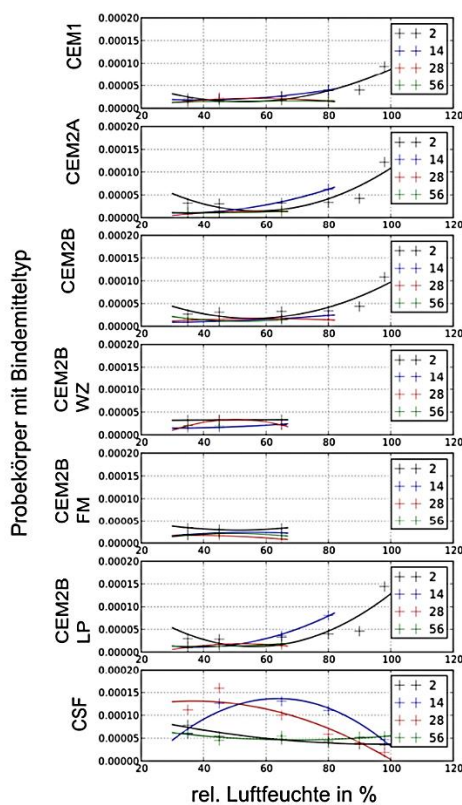
Graphik 4: Darr-Werte in %
der Probekörper nach Vorlagerung (d) und Klima



Graphik 5: Gewichtsveränderung (Trocknung) in % der Probekörper nach Vorlagerung (d) und Klima



Graphik 6: Diffusionskonstanten in m^2/d der Probekörper nach Vorlagerung (d) und Klima



4. Diskussion und Schlussfolgerungen

4.1 Qualität der Messdaten

Einige der hier vorgestellten Messdaten sind anfällig für zufällige und systematische Fehler; ein früherer TKB-Ringversuch^{xi} ergab bei der CM-Messung an Zementestrichen mit 20 g Einwaage im Bereich zwischen 4 und 2 CM-% Standardabweichungen der Einzelwerte um 0,5 CM-%, die relative Standardabweichung war gerade im kritischen, trockenen Bereich um 2 CM-% mit +/- 25 % relativ groß. Ähnliches gilt für Darrwerte und korr. rel. Luftfeuchten, für die Darrwerte wurden im genannten Ringversuch im Bereich 5 bis 3 Darr-% Standardabweichungen von 0,3 bis 0,4 Darr-%, für die rel. Luftfeuchte im Bereich 98 bis 70 % rel. Luftfeuchte Standardabweichungen um 5 % rel. Luftfeuchte gefunden.

Bei den hier vorliegenden Messdaten, die fast alle als Einzelwerte vorliegen, ist grundsätzlich mit ähnlichen Fehlern zu rechnen. Allerdings wurde bei den Zementestrichen der CM-Wert mit 50 g Einwaage ermittelt, der Fehler des Einzelwertes mag deswegen etwas kleiner, im Bereich 10 bis 20 %, sein. In den Graphiken kann man erkennen, dass diese Fehlerbetrachtung realistisch ist.

Bei den Trocknungskurven wurden die Ableszeiten mit einer Genauigkeit im Bereich einer Stunde aufgezeichnet, daher sind ungenaue Zeitangaben eine wesentliche Quelle für Ungenauigkeiten. Auch waren die individuellen Ablesehäufigkeiten bei den beteiligten Laboren unterschiedlich. Wie aufgrund der W/Z-Werte teilweise zu erwarten, teilweise aber auch überraschend, waren alle Proben vergleichsweise trocken, in einigen Fällen wurde bei hohen Luftfeuchten keine Gewichtsabnahme sondern eine -zunahme festgestellt. Für diese Proben wurden dann keine weiteren Messungen durchgeführt, eine Auswertung für die Diffusionskonstante unterlassen. Während des Betriebes der „23 °C/45 % r.LF.“ Klimakammer kam es zu Unregelmäßigkeiten aufgrund einer Undichtigkeit. Teilweise müssen dort die tatsächlichen Luftfeuchten deutlich unterhalb von 45 % gelegen haben (siehe Graphik 2, Trocknungskurven bei 14 d Vorlagerung liegen unterhalb der Kurven für die 35 % Lagerung).

Um sicher zu stellen, dass die Prüflinge repräsentativ für die auf Baustellen üblichen Estrichmischungen sind, wurden Dichte und Festigkeitswerte ermittelt.

4.1.1 Dichte

Die für die verschiedenen Mischungen ermittelten Dichten liegen mit 2,0 .. 2,3 g/cm^3 für die Zementbasierten Rezepturen und mit 1,8 .. 2,0 g/cm^3 für die Calciumsulfat-basierten Rezepturen im Rahmen des Erwarteten. Interessanterweise hat der Luftporenbildner keinen makroskopischen Effekt auf die Dichte. Die

Werte belegen auch, dass die Proben „normal“ verdichtet werden konnten.

4.1.2 Festigkeitswerte

Für die Estriche wird die Expositionsklasse XC1 nach DIN 1045-2:2008-08 angenommen. Die notwendigen Festigkeitswerte nach DIN EN 13813:2003-01 (F4, C20, d. h. Biegezugfestigkeit ≥ 4 N/mm², Druckfestigkeit ≥ 20 N/mm²) werden in den meisten Fällen deutlich überschritten^{xii}. Man kann aber in Tabelle 2.1. auch Problembereiche erkennen. Während die nicht additivierten Zementmischungen mit einem „normalen“ W/Z-Wert von 0,55 sehr gute Druckfestigkeiten um 30 N/mm² (statt der geforderten 20 N/mm²) zeigen, sind die additivierten Proben mit Fließmittel und Luftporenbildner mit jeweils ca. 22 N/mm² nur knapp über dem angestrebten Wert, der nicht additivierte CEM2B mit reduziertem W/Z-Wert von 0,4 liegt sogar im Mittel mit 19,3 N/mm² knapp darunter. Beim CSF liegt das Mittel aller Ergebnisse ebenfalls unter 20 N/mm², dies ist aber darauf zurück zu führen, dass hier auch die feuchten Proben (korr. rel. Luftfeuchte > 80 %) mit eingehen. Die „trockenen“ CSF-Proben erreichen die notwendigen Festigkeitswerte.

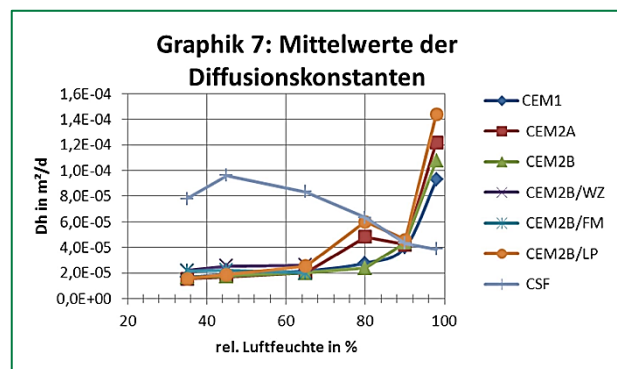
4.2 Trocknungskurven und Diffusionskonstanten

Diffusionskonstanten für Estrich werden in der Literatur nur indirekt genannt. Eine Diskussion der Werte mit Literaturquellen und die Umrechnung der verschiedenen Werte ineinander findet man im bereits o. g. Tagungsband der TKB-Fachtagung von 2010^{xiii}. Für Zementestriche findet man z. B. Werte in der DIN 4108, Teil 4, in der Form von Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen mit $\mu = 15/35$, mit leicht abschätzbaren Werten für die Speicherkapazität von Zementestrichen ergeben sich damit Diffusionskonstanten zwischen $1,3 \cdot 10^{-5}$ m²/d ($\mu = 15$) und $0,6 \cdot 10^{-5}$ m²/d ($\mu = 35$)^{xiv}. Für calciumsulfatbasierte Estriche findet man ebenfalls bei Schnell^{xv} einen Wert von $\mu = 15$, mit der ebenfalls dort angegebenen Sorptionsisotherme und der daraus berechneten Speicherkapazität von ca. $5 \cdot 10^{-2}$ bei ca. 80 % rel. Luftfeuchte kann man die Diffusionskonstante zu $2,4 \cdot 10^{-5}$ m²/d abschätzen. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass diese Werte für Zusammensetzungen gelten, die um 1990 aktuell waren, insbesondere bei den Zementestrichen lagen also Rezepturen mit erhöhtem Zementanteil (BM/S wie 1 : 5) vor.

Für die nun untersuchten Zusammensetzungen findet man für die Zementestriche Diffusionskonstanten im Bereich von $2 \cdot 10^{-5}$ m²/d im Trockenbereich und $14 \cdot 10^{-5}$ m²/d im Feuchtbereich (siehe Tabelle 4.1 und siehe Grafik 7).

Tabelle 4.1: Mittelwerte der Diffusionskonstanten in m²/d

	rel. Luftfeuchte in %						
	35	45	65	80	90	98	
Bindemitteltyp	CEM1	1,7E-05	1,9E-05	2,2E-05	2,8E-05	4,0E-05	9,3E-05
	CEM2A	1,5E-05	1,7E-05	2,0E-05	4,8E-05	4,2E-05	1,2E-04
	CEM2B	1,6E-05	1,7E-05	2,0E-05	2,4E-05	4,4E-05	1,1E-04
	CEM2B/WZ	2,2E-05	2,5E-05	2,6E-05			
	CEM2B/FM	2,2E-05	2,2E-05	2,0E-05			
	CEM2B/LP	1,5E-05	1,9E-05	2,5E-05	6,0E-05	4,6E-05	1,4E-04
	CSF	7,8E-05	9,6E-05	8,3E-05	6,3E-05	4,3E-05	3,9E-05



Zwei Werte bei 80 % sind wahrscheinlich Ausreißer. Im Vergleich zu den o. g. Literaturwerten liegen diese Werte höher und spiegeln wahrscheinlich den geringeren Zementgehalt der Proben und eine andere Porenstruktur wider. Im Feuchtbereich oberhalb von 80 % r. LF. findet der Transport aber offenkundig sehr schnell statt.

Die Werte für den CSF unterscheiden sich grundsätzlich von den anderen. Sie scheinen im Bereich von ca. 50 % rel. Luftfeuchte ein Maximum bei ca. $10 \cdot 10^{-5}$ m²/d zu besitzen um nach niedrigen und hohen Feuchten abzufallen.

4.3 Feuchtekenwerte – Darr-, CM-Werte und korrespondierende Luftfeuchte

4.3.1 Einfluss der Zementart

Sowohl bei den Darr- als auch den CM-Werten ist ein Einfluss der Zementart nicht signifikant. Lediglich bei der Trocknung, also dem Masseverlust bei Angleich an ein bestimmtes Klima, und auch dort nur bei den Proben, die kurz (= 2 d) nach der Herstellung getrocknet wurden, ist ein Einfluss wahrscheinlich. Während die mit CEM1-Zement hergestellten Proben zwischen 3,5 und 0,5 Masse-% verlieren, ist dies bei den mit CEM2A und CEM2B hergestellten Prüfkörpern bei niedriger Feuchte und nach einer 2tägigen Vorlagerung mit ca. 4 Masse-% etwas höher. Hintergrund wird eine langsamere Hydratation aufgrund der Zementzuschläge sein.

Dieser Effekt verschwindet aber nach ca. 14 Tagen Vorlagerung.

4.3.2 Einfluss des Bindemittel/Sand-Verhältnisses

Heutige Zementestriche haben Bindemittel-/Sand-Verhältnisse von ca. 1 : 6. Vor 20 Jahren, als Schnell seine Untersuchungen durchführte, war ein Verhältnis von 1 : 5 „normal“. Ein wichtiges Thema dieser Untersuchung ist daher, ob sich die Feuchtekenneiwerte für diese neuen Bindemittel/Sand-Verhältnisse anders darstellen.

Sieht man sich Graphik 3, CM-Werte in %, an, fällt dem kundigen Leser sofort auf, dass fast alle Werte unter 2,0 CM-% liegen, dies gilt insbesondere auch für Estriche mit kurzer Vorlagerung bei einer sehr hohen Feuchte (98 % rel. Luftfeuchte). Schnell hatte damals einen Grenzwert für die Belegereife von 2,5 CM-% angegeben, der später auf 2,0 CM-% gesenkt wurde. Nach dieser Art der Bewertung waren alle unsere Zementestriche schon nach 2 Tagen Vorlagerung und einer Trocknungsphase (, die bei einem Außenklima von 98 % rel. Luftfeuchte nur chemisch sein kann) von ca. 20 Tagen „belegereif“ (siehe Tabelle 4, Spalte Alter) was offenkundig unsinnig ist, da die korrespondierenden Luftfeuchten im Bereich 90 bis 98 % lagen. Der CM-Grenzwert von 2 % trennt hiermit nicht sicher belegereife von nicht belegereifen Estrichen.

Die Darrwerte sind bei „jungen“ Estrichen, also solchen mit kurzer Vorlagerung, systematisch niedriger als bei alten Estrichen. Offensichtlich wird beim Darren ein Teil des chemisch gebundenen Wassers gefunden, das dem CM-Gerät entgeht. Der Teil des chemisch gebundenen Wassers nimmt aber mit der Lagerdauer zu! Daher kommt auch der überraschende Effekt, dass der für die Belegereife als kritisch angesehen Grenzwert von 3,5 Gew.-% bei jungen Estrichen bei höheren Luftfeuchten erreicht wird als bei älteren Estrichen. Je jünger ein Estrich ist, umso trockener erscheint er also. Bei der Interpretation von Darrfeuchten muss also das Alter des Estrichs berücksichtigt werden.

Diese Werte sind ein Hinweis, dass bei heutigen Zementestrichrezepturen die kritischen Werte für die Belegereife bei der CM- bzw. Darr-Methode unterhalb der allgemein anerkannten liegen

4.3.3 Einfluss des W/Z-Wertes

Bisher wurde in der Estrichbranche vermutet, dass der W/Z-Wert keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beurteilung der Trockenheit eines Estrichs hat.

Diese Untersuchung zeigt, dass eine Zementmischung mit einem verringerten W/Z-Wert sich völlig anders verhält als ein „konventionelles“ Produkt. Dies gilt sowohl für einen Estrich mit Fließmittel als auch ohne Fließmittel. Der Effekt ist geradezu trivial: Im Wesentlichen führt die verringerte Wassermenge einfach dazu,

dass weniger Wasser vorhanden ist und in allen Messungen entsprechend weniger nachzuweisen ist. Da bereits bei dem Standard-W/Z-Wert von 0,55 CM- und Darrgrenzwerte unmittelbar nach der Herstellung unterschritten wurden, wundert es nicht, dass hier die Werte auch am Anfang nochmal um ca. 1 CM-% bzw. auch 1 Darr-% niedriger liegen. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn der Estrich noch „frisch und nass“ ist.

4.3.4 Einfluss von Fließmitteln und Luftporenbildnern

Der Einsatz eines Fließmittels oder Luftporenbildners hat – im Verhältnis zum W/Z- und G/Z-Wert – keinen signifikanten Effekt auf die Darr- und CM-Werte. Mit Fließmittel lässt sich der Mörtel mit verringertem W/Z-Wert auf jeden Fall besser verarbeiten und auch bei den Festigkeitswerten ist ein schwacher positiver Effekt vorhanden.

4.3.5 Einfluss der „Vorlagerdauer“ und des Alters

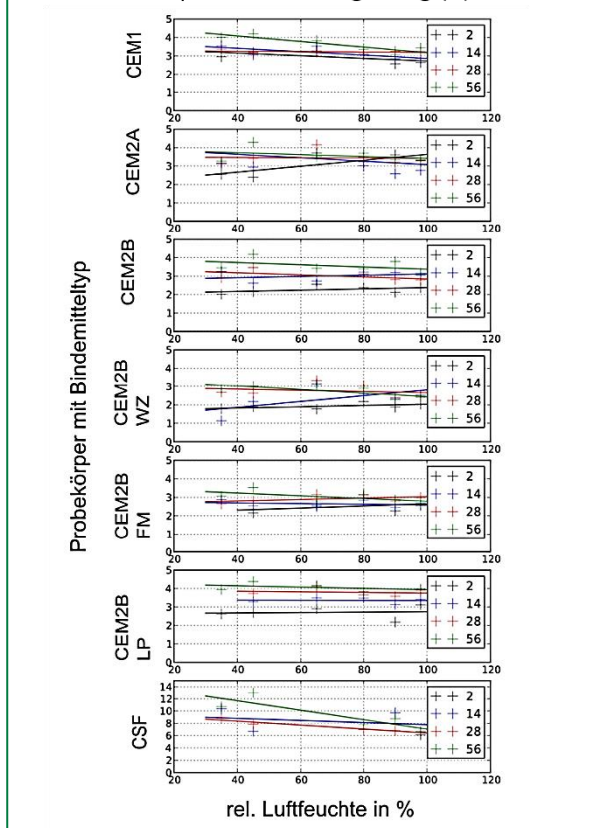
Ist der Estrich an ein bestimmtes Klima angepasst, spielt die Vorlagerung und damit die chemische Hydratation der Probe für die CM-Messung nur eine unterordnete Rolle. Dies bestätigt die schon häufiger geäußerte Vermutung, dass bei der CM-Messung nur „lose gebundenes“ Wasser erfasst wird.

Bei der Darr-Messung, die bei 105 °C durchgeführt wird, ist dies anders. Dort erkennt man bei allen zementär gebundenen Proben den Effekt, dass bei älteren Proben mehr Wasser gefunden wird. Hier wird zusätzlich chemisch gebundenes Wasser frei gesetzt, an den Werten kann man erkennen, dass die chemische Einbindung von Wasser auch nach 2 Monaten noch nicht ganz abgeschlossen zu sein scheint.

Sehr deutlich sieht man den Effekt der chemischen Einbindung auch bei den Trockenkurven. Je älter die Probe, umso weniger verdunstet bei einem gegebenen Klima.

Die chemische Bindung des Wassers hängt im Wesentlichen von der Lagerdauer ab; Graphik 8 gibt einen Überblick.

Graphik 8: Chemische Wassereinbindung in % der Probekörper nach Vorlagerung (d) und Klima



4.4 Zusammenfassung

Die Zusammensetzung von Zementestrichen hat sich in den letzten 40 Jahren ständig verändert. In dieser Untersuchung wurden Estrichprüfkörper mit aktuellen Zusammensetzungen untersucht. Dabei wurden verschiedene Zemente eingesetzt, u. a. ein CEM I („Portland Zement“) und 2 Kompositzemente (CEM II/A-LL und CEM II/B-S). Als weiterer Parameter wurde bei einem System auf Basis des CEM II/B-S auch der W/Z-Wert und die Anwesenheit eines Fließmittels und Luftporenbildners variiert. Die Einhaltung der angestrebten Expositions- und Festigkeitsklassen wurde überprüft und in den meisten Fällen bestanden. Die Proben wurden unterschiedlich als geschlossenes System vorgelegt, dann, nach Freilegung von 2 der 6 Seiten des quadratischen Prismas, schockartig einem Klima ausgesetzt und die Gewichtsabnahme protokolliert. Anschließend wurden diese Proben erneut verpackt und in ein geschlossenes System überführt und anschließend Darr-, CM- und korr. Luftfeuchtemessungen durchgeführt.

Folgende Resultate wurden erhalten:

Die Zementart beeinflusst die CM- und Darrwerte nur in einem geringen Umfang am Anfang der Messungen. Offensichtlich findet durch die Kompositbeimengungen innerhalb der ersten 2 Wochen eine etwas gerin-

gere chemische Wassereinbindung statt. Ab 2 Wochen sind die Unterschiede nicht mehr signifikant.

Das Bindemittel/Sand-Verhältnis liegt heute bei ca. 1 : 6 und ist damit deutlich kleiner als noch vor 30 Jahren. W. Schnell verwendete bei seinen Versuchen 1985 noch einen Wert von 1 : 5 und weist in der Einleitung seines Artikels darauf hin, dass dieses Verhältnis früher größer gewesen ist und die daher damals üblichen Darr- und CM-Werte der Belegereife 1985 zu hoch wären^{xvii}. Durch den geringeren Zementanteil wird dementsprechend auch weniger Wasser zugegeben und eingebunden. Alle untersuchten Proben hatten CM-Werte unterhalb von 2,2 %, in der Regel sogar unmittelbar am Anfang des Versuches unter 2 %. Mit dem bekannten Grenzwert von 2 CM-% für die Belegereife wären damit auch nasse Estriche als trocken bewertet worden.

Wird dann noch zusätzlich ein geringer W/Z-Wert eingestellt (0,4 anstelle von 0,55), liegt die CM-Anfangsfeuchte im Bereich um 1 %. Diese Proben zeichnen sich auch dadurch aus, dass das zugegebene Wasser nach ca. 28 d Lagerung im geschlossenen Zustand soweit gebunden worden ist, dass oberhalb von 80 % rel. Luftfeuchte eine Absorption stattfindet. Die Trocknung findet damit überwiegend chemisch und nicht physikalisch statt. Es fällt auf, dass die Prismen mit reduziertem W/Z-Wert die Festigkeitswerte nicht sicher einhalten.

Eine Beurteilung des Feuchtezustands dieser Proben ist zwar mit der CM-Methode möglich, man muss dann aber die Grenzwerte den einzelnen Rezepturen anpassen, so wie dies auch W. Schnell in einer ähnlichen Situation bereits 1985 vorgeschlagen hat. Unabhängig von der Rezeptur ist eine Überprüfung des Feuchtezustands über die korr. relative Luftfeuchte möglich und empfehlenswert.

Die Diffusionskonstante ist für Zementestriche nur bei niedrigen Feuchten ungefähr konstant ($2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{d}$), bei hohen Feuchten ($> 80 \text{ % r.LF}$) nimmt sie sehr stark bis auf $14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{d}$ zu (siehe Tabelle 4.1 und Graphik 7).

Estriche mit Calciumsulfat als Bindemittel sind in mehrfacher Hinsicht anders:

- Die Zugabemenge des Wassers ist deutlich größer.
- Die Trocknung geschieht aufgrund höherer Diffusionskonstanten im Trockenbereich sehr viel schneller, allerdings muss aber auch erheblich mehr Wasser verdunsten.
- Die Festigkeit hängt sehr stark vom Feuchtezustand ab. Ein feuchter Calciumsulfatestrich kann nicht fest sein.

5. Literatur

5.1 Normen

- DIN 18365:2010-04 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Bodenbelagarbeiten
- DIN 18560-1:2009-09 Estriche im Bauwesen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung
- DIN 18560-2:2009-09 Estriche im Bauwesen – Teil 2: Estriche und Heizestriche auf Dämmschichten (schwimmende Estriche)
- DIN 18560-3:2006-03 Estriche im Bauwesen – Teil 3: Verbundestriche
- DIN 18560-4:2004-04 Estriche im Bauwesen – Teil 4: Estriche auf Trennschicht
- DIN 18560-7:2004-04 Estriche im Bauwesen – Teil 7: Hochbeanspruchbare Estriche (Industriestriche)
- DIN EN 197-1:2011-11 Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011
- DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008
- DIN EN 13318:2000-12 Estrichmörtel und Estriche - Begriffe; Dreisprachige Fassung EN 13318:2000
- DIN EN 13139:2002-08 Gesteinskörnungen für Mörtel; Deutsche Fassung EN 13139:2002
- DIN EN 13454-1:2005-01 Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Compositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche - Teil 1: Begriffe und Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13454-1:2004
- DIN EN 13454-2:2007-11 Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Compositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche – Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13454-2:2003+A1:2007
- DIN EN 13892-1:2003-02 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 1: Probenahme, Herstellung und Lagerung der Prüfkörper; Deutsche Fassung EN 13892-1:2002
- DIN EN 13813:2003-01 Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche – Estrichmörtel und Estrichmassen – Eigenschaften und Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13813:2002
- DIN EN 13892-3:2004-07 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme; Deutsche Fassung EN 13892-3:2004
- DIN EN 13892-2:2003-02 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 2:

Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 13892-2:2002

- DIN EN 14293:2006-10 Klebstoffe – Klebstoffe für das Kleben von Parkett auf einen Untergrund – Prüfverfahren und Mindestanforderungen; Deutsche Fassung EN 14293:2006
- DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000
- DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- DIN 4226:2001-07 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen; in 2003-04 abgelöst durch DIN EN 12620:2003-04

5.2 Andere Quellen

Technische Informationen

- Merkblatt TKB-8: Beurteilen und Vorbereiten von Untergründen für Bodenbelag- und Parkettarbeiten

Bücher

- Handbuch für das Estrich- und Belaggewerbe, Hrsg. Bundesverband Estrich und Belag, Köln, R. Müller 1997, darin: Zur Ermittlung von Belegereife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen, W. Schnell, Nachdruck des Originals aus Boden/Wand/Decke 1/1985
- Werner Schnell, Das Trocknungsverhalten von Estrichen – Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis, in: Rainer Oswald (Hrsg.), „Aachener Bausachverständigentage 1994“, Neubauprobleme – Feuchtigkeit und Wärmeschutz, AlBau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1994
- Timm, Harry: Estriche und Bodenbeläge, Wiesbaden 2010
- J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, 2nd Ed., Oxford 1997
- Schütze, Wilhelm: Der schwimmende Estrich, Wiesbaden und Berlin 1974
- Glass, Kurt: Zementgebundene Estriche und Industrieböden, Paderborn 1996
- Locher, Friedrich W.: Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Bau + Technik, Düsseldorf 2000

Dissertationen

- Wiegrink, Karl-Heinz: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfatfließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen, Dissertation Technische Universität München 2002
- Künzel, H.-M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation Universität Stuttgart 1994

Links

- <http://www.ibf-troisdorf.de/>
- http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2005/415/pdf/SR3_QuS_4.pdf
- http://books.google.de/books?id=eHANhZwVouYC&dq=crank+mathematics+of+diffusion&printsec=frontcover&source=bn&hl=de&ei=V6lFTKljFYfEsAaszaBZ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=4&ved=0CC8Q6AEwAw#v=onepage&q&f=false

Anmerkungen

ⁱ Handbuch für das Estrich- und Belaggewerbe, Hrsg. Bundesverband Estrich und Belag, Köln, R. Müller 1997, darin: Zur Ermittlung von Belegereife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen, W. Schnell, Nachdruck des Originals aus Boden/Wand/Decke 1/1985

ⁱⁱ Werner Schnell, Das Trocknungsverhalten von Estrichen – Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis, in: Rainer Oswald (Hrsg.), „Aachener Bausachverständigentage 1994“, Neubauprobleme – Feuchtigkeit und Wärmeschutz, AlBau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1994

ⁱⁱⁱ BEB Merkblatt „Arbeitsanweisung CM-Messung“, wurde mehrfach aufgelegt, zuletzt:

Arbeits- und Hinweisblätter des Bundesverbandes Estrich und Belag (BEB)

8.4 Verbändeerklärung: CM-Messung, Durchführung und Messmethode, 2007

^{iv} S. Heuer, siehe:

<http://www.ish-institut.de/praxis/allgemein/feuchteschadentrotzcm/>

^v R. Kille, CM-Messung vor dem Aus?, siehe: http://www.kille-koeln.de/fachbeitraege_detail.php?id=100

^{vi} BWD 2010/03, Die TKB nimmt Stellung: Denkverbot nicht akzeptabel

^{vii} Siehe Anmerkung ⁱ, dort in der „Einleitung“ und Anmerkung P

^{viii} Der Sand wurde von der Fa. Fußboden-König, Olpe zur Verfügung gestellt.

^{ix} Die Estrichpumpe wurde von der Fa. Fußboden-König, Olpe zur Verfügung gestellt.

^x nach: J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, 2nd Ed., Oxford 1997, S. 238 ff.

$$2. \text{Ficks'sches Gesetz: } \frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

$$\begin{aligned} & \text{mit} \\ C = f(x, t) = \text{const.}, & \text{ bei } t = 0 \\ & \text{und} \\ \text{bei } t > 0 \quad C(1, t) = C_{\text{außen}} \end{aligned}$$

$$\frac{M_t}{M_{\infty}} = 1 - 8/\pi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-D(2n+1)^2 \pi^2 t/l^2)$$

für die Halbwertszeit $t_{1/2}$ gilt:

$$D = \frac{0,049}{\left(\frac{t_{1/2}}{l^2}\right)}$$

^{xi} Ergebnisse des 2. Ringversuchs der TKB Arbeitsgruppe „Untergrundfeuchte“, teilweise veröffentlicht im Tagungsband zur „26. TKB Fachtagung „Klebstoffe in der Fußbodentechnik“, Frankfurt, 2010, Vortrag: Verlegereife und Feuchte – Vorschläge der TKB zur Messung der korrespondierende Luftfeuchte, Th. Brokamp“.

^{xii} Zur Erinnerung: ein ZE20 nach DIN 18560-1:2009-09 entspricht einem CT-C25-F4 nach DIN EN 13813:2003-01.

^{xiii} Siehe Endnote ^x

^{xiv} Dort war die benutzte Einheit für die Diffusionskonstante m^2/h . Die Umrechnung in m^2/d erfolgt durch Multiplikation mit 24 h/d.

^{xv} Siehe Anmerkung ii, W. Schnell 1994

^{xvi} Die Speicherkapazität ist hier dimensionslos: $kg \text{ (Wasser)} / (kg \text{ (Estrich)} * rLF)$

^{xvii} Siehe Anmerkung ⁱⁱ, W. Schnell, 1985. Zitat „Ausgangs der 70er Jahr traten an Fußböden immer wieder Schäden auf, die eindeutig auf Feuchtigkeitseinwirkungen zurückgeführt werden mussten, (...). (...) Dies lag (...) und nicht zuletzt an der geänderten Zusammensetzung der Estriche, auf die immer noch die alten Erfahrungswerte angewandt wurden.“