

**Eine zusätzliche Auswertung der
Messdaten im Bericht des IBF
“Untersuchungen zur
Überprüfung der Eignung der
KRL-Methode zur Ermittlung des
Feuchtegehalts von Estrichen”**

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

Zusammenfassung

Der IBF-Bericht enthält eine Vielzahl von Daten von hoher Qualität. Mit diesen Daten gelingt es aufzuzeigen, dass bei Zementestrichen Darr- und CM-Werte nicht – wie bisher angenommen – generell korrelieren, sondern nur eine zusammensetzungsspezifische Korrelation zeigen. Die Daten der Estriche mit einem Mischungsverhältnis von 1 : 6 passen gut zu den Trocknungsisothermen aus TKB-Bericht 4. Die vermutete Materialabhängigkeit der KRL-Messung beruht auf Missverständnissen, tatsächlich ist gemeint, dass Estriche mit unterschiedlicher Zusammensetzung grundsätzlich verschiedene Sorptions- und Trocknungsisothermen haben, wie bereits bekannt. Die Messdaten bestätigen die bereits vor mehr als 10 Jahren geäußerte Vermutung der TKB, dass die Trocknungs- und Sorptionsisothermen bei Zementestrichen stark von der Zusammensetzung abhängen und damit auch die massebasierten Belegreifgrenzwerte von 3,5 Darr-% und 2,0 CM-% nur für bekannte Zusammensetzungen bei Mischungsverhältnissen von ca. 1 : 6 gelten.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Zusammenfassung..... | 2 |
| 1. Einführung | 3 |
| 1.1 Vorbemerkungen zur Auswertung durch die TKB..... | 3 |
| 1.2 Was ist die „KRL“?..... | 3 |
| 2. Trocknungsdaten bei Estrichen mit Normalzement..... | 4 |
| 2.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten..... | 6 |
| 2.2 Trockenkurven in KRL-Darstellung..... | 6 |
| 2.3 Materialabhängigkeit der KRL | 6 |
| 2.4 Ausgleichsfeuchte bzw. Trocknungs-dauer von Estrichen bis zur Belegreife | 10 |
| 3. Trocknungsdaten bei Zement-estrichen mit Spezialzementen | 11 |
| 3.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten..... | 11 |
| 3.2 Trockenkurven in KRL-Darstellung..... | 11 |
| 4. Trocknungsdaten bei Estrichen mit Bindemitteln auf Basis Calciumsulfat | 12 |
| 4.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten..... | 12 |
| 4.2 Materialabhängigkeit der Feuchtwerte | 12 |
| 5. Schlussfolgerungen..... | 17 |
| 6. Anhang | 19 |

1. Einführung

2019 wurden auf dem 20. Internationalen BEB-Sachverständigentreffen in Schweinfurt am 08./09.11.2019 Messdaten von Dipl.-Ing. Egbert Müller vom Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung (IBF)¹ vorgestellt, die dann am 16.04.2020 vom IBF als Prüfbericht M106/18 „Untersuchungen zur Überprüfung der Eignung der KRL-Methode zur Ermittlung des Feuchtegehalts von Estrichen“ publiziert² worden sind. Neben den Messdaten enthält der Bericht auch eine Interpretation der Daten, um die eigentliche Fragestellung der Auftraggeber „... ob die KRL-Methode zur Ermittlung des Feuchtegehalts von Estrichen geeignet ist“, zu beantworten.

Das IBF hat seit mehreren Jahrzehnten einen hervorragenden Ruf in der Bodenbranche. In den letzten Jahrzehnten hat es sich u. a. besonders darum verdient gemacht, Sachverständigen und Handwerkern aus der Bodenbranche zu vermitteln, wie Feuchtemessungen nach der Darr- und CM-Methode an Estrichen korrekt durchzuführen sind. Dieses Expertenwissen können auch Außenstehende bei Prüfung der Daten des IBF in publizierten Berichten erkennen.

Die TKB sieht in dem o. g. Bericht eine hervorragende Datenbasis, hält die Interpretation der Daten allerdings teilweise für falsch, daher soll hier eine weiterführende Auswertung der Daten vorgenommen werden. Insbesondere soll untersucht werden, ob die Daten tatsächlich die Interpretation des IBF stützen.

1.1 Vorbemerkungen zur Auswertung durch die TKB

Der Bericht des IBF ist z. Z. auf der Homepage des IBF allgemein verfügbar. Für die vorliegende Auswertung wurden die Daten aus den Tabellen verwendet³. Diese wurden händisch in eigene, maschinell lesbar Dateien übertragen und dann weiter ausgewertet.

Bezüglich der Herstellung der Estrichproben, verwendeter Materialien und Prozeduren, verweisen wir auf den Originalbericht. Im Grundsatz kann man die Daten

auch mit anderen Quellen vergleichen. Allerdings gibt es teilweise wesentlich Unterschiede im Detail. Von den älteren Arbeiten^{4,5} ist besonders die von W. Schnell 1985 von Belang. Ein Vergleich dieser Änderungen findet man in der TKB Tabelle 2 im Anhang.

Weiter wird im Bericht in Bezug auf den Belegreife-Grenzwert der KRL-Methode ein nicht mehr aktueller Wert von 75 % rH (rH = relative Humidity = relative Luftfeuchte) aufgeführt. Dieser ist während der Erarbeitung des Berichts durch das IBF von der TKB aufgrund weiterer Erfahrungen auf 80 % rH angehoben worden^{6,7}.

1.2 Was ist die „KRL“?

Durch den gesamten Text des IBF zieht sich ein grundsätzliches Missverständnis: Es wird nicht verstanden, was die „korrespondierende relative Luftfeuchte“, KRL, ist und welche Art von physikalischen Wert sie darstellt. Daher soll sie hier, im Kontext des IBF-Berichts, noch einmal erläutert werden.

Der Name selbst deutet schon auf drei wesentliche Punkte hin:

- a) Grundsätzlich wird eine Luftfeuchtigkeit gemessen, also der Gehalt an Wasser (gasförmig) in einer Luftprobe.
- b) Diese wird in relativen Zahlen, häufig in Prozent zur sogenannten Sättigungsluftfeuchte, genannt. Luft kann Wasser nur bis zur Sättigungsluftfeuchte aufnehmen, wird mehr in die Luft eingetragen, kondensiert das Wasser (aus Gas wird Flüssigkeit) und aus dem einphasigen Gas wird ein zweiphasiges System aus Gas und Flüssigkeit.
- c) Das Wort „korrespondierende“ besagt, dass die Messung im Kontaktgleichgewicht mit dem Messgut erfolgt. Es wird keine Messung unmittelbar mit dem Material, sondern an dem Material gemacht. Dies ist analog zu einer Temperaturmessung.

¹ Egbert Müller, Vorstellung IBF-Untersuchungsergebnisse/KRL-Feuchtemessung; 20. Internationales Sachverständigentreffen in Schweinfurt am 08./09.11.2019.

² IBF Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung, 1. Ausfertigung, Prüfbericht M-106/18, Auftrag: „Untersuchungen zur Überprüfung der Eignung der KRL-Methode zur Ermittlung des Feuchtegehalts von Estrichen“, 16.04.2020. Bezogen über die Homepage des IBF: <https://www.ibf-troisdorf.de/page.3247.437028.0.0.40.0.de.htm> am 2020-08-05

³ Diese werden im folgenden jeweils als „IBF Tabelle X“ zitiert, gemeint ist dann die Tabelle X des Berichts. Eigene Tabellen werden im folgenden „TKB Tabelle X“ genannt.

⁴ Werner Schnell, Zur Ermittlung von Belegreife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen, boden wand decke 31 (Heft 1/1985)

⁵ Werner Schnell, Das Trocknungsverhalten von Estrichen – Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis, in: Rainer Oswald (Hrsg.), „Aachener Bausachverständigentage 1994“, Neubauprobleme – Feuchtigkeit und Wärmeschutz, AIBau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1994

⁶ <https://www.klebstoff-presse.com/fileadmin/redaktion/IVK-TKB-informiert-KRL-Grenzwert.pdf>, 2020-04-07

⁷ TKB-Merkblatt 18, KRL-Methode, Messung und Beurteilung der Feuchte von mineralischen Estrichen, Stand April 2020, Technische Kommission Bauklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V., 2020

Die Eigenschaft, die hier ermittelt wird, ist physikalisch betrachtet unmittelbar von der sog. Aktivität⁸ des Wassers in/an einem Material, mit dieser Größe kann unmittelbar das sog. „chemische Potential“ berechnet werden. Die KRL ist damit, wie die Temperatur, eine sogenannte „intensive“ thermodynamische Größe⁹. Genau wie sich die Temperatur verschiedener Gegenstände in einer isolierten Umgebung nach einiger Zeit angleicht – und damit in und an allen Materialien gleich ist – gilt dies auch für die KRL. In diesem Sinne sind sowohl die Temperatur wie auch die KRL materialunabhängig. In einem geschlossenen Kasten mit Luft, einer Probe Holz, einer Probe Estrich, wird sich sowohl in der Luft, im Holz und im Estrich die gleiche KRL einstellen. Die Feuchte in Masse-% wird aber jeweils unterschiedlich sein. Ein weiteres Kennzeichen ist, dass intensive Größen unabhängig von der Materialmenge sind. Wenn ein Gegenstand – der sich im inneren Gleichgewicht befindet – eine Temperatur T oder KRL von X hat, dann kann man diesen Gegenstand beliebig oft zerteilen und man wird immer noch den gleichen Wert T bzw. X an den Einzelteilen messen. Bei einer „extensiven“ Größe, z. B. der Masse, ist dies anders. Wenn der o. g. Gegenstand zur Hälfte geteilt wird, wird auch die Masse der Einzelteile sich halbiert haben¹⁰.

Bei einer Estrichprobe aus einem trocknenden Estrich, der von oben nach unten trocknet, wird man in verschiedenen Tiefen verschiedene KRL messen können. Misst man aber eine Gesamtprobe als Querschnittsprobe, stellt sich ein Wert ein, der sich beim Belegen des Estrichs mit einer Dampfsperre einstellen würde. Daten hierzu findet man im TKB-Bericht 4¹¹. Der Grund ist, dass Wasser aus dem unteren, feuchten Bereich nach oben diffundiert. Der obere Bereich wird weiterhin feuchter, der untere Bereich wieder trockener. Wieviel Wasser dabei strömt, kann dem Sorptionsdiagramm mit der Desorptions- bzw. Trocknungs-, der Absorptions- und den Scanning-Isothermen entnommen werden.

Dem Parkettleger als Handwerker sind die Zusammenhänge aus seinem Handwerk bekannt. Man muss nicht Chemie, Physik oder Thermodynamik studieren, um hier ein praktisches Verständnis zu haben. Er weiß, dass die Holzfeuchte in Darr-% in Verbindung mit der relativen Luftfeuchte steht. Wird Holz/Parkett, in ein Klima mit einer Luftfeuchte von 90 % rH gelegt, wird es nach entsprechend langer Lagerung eine Holzfeuchte um 20

Gewichtsprozent annehmen und dementsprechend seine Dimensionen ändern. Wie die Luft an die Feuchte kommt, ist dabei egal. Die Quelle kann also z. B. der darunter liegende Estrich sein. Entscheidend ist nur, dass dieser genug Wasser enthält, so dass die Luftfeuchte darüber 90 % rH entspricht. Das ist das, was mit der KRL-Methode gemessen wird. Die Luftfeuchte, die nach dem Belegen über dem Estrich herrschen wird.

2. Trocknungsdaten bei Estrichen mit Normalzement

Aus der IBF-Tabelle 5 kann man die Daten für die folgenden Trocknungskurven entnehmen:
Zunächst der Trocknungsverlauf nach der Darr-Prüfung für Estriche mit CEM-I-Zement:

Siehe Bild 1

Die Legende zu den Kurven gibt die Spalten 1 und 2 der IBF-Tabelle wieder: zunächst das Mischungsverhältnis (MV) und dann die Lagerung (siehe TKB-Tabelle 2 im Anhang).

Während die Lagerungsbedingungen das Trocknen der Estriche mit dem MV von 1 : 4 nur wenig beeinflussen, kann man bei 1 : 6 einen Einfluss erkennen, der dann bei 1 : 8 sehr deutlich wird. Man erkennt auch, dass bei MV 1 : 6 die Trocknung bei der Lagerung C durch das Klima 10/80 deutlich reduziert wurde. Bemerkenswert ist weiter, dass, wenn man den von Schnell ermittelten Grenzwert für die Belegreife von 3,5 Darr-% heranzieht, die 1 : 4 Estriche am Ende der Lagerungsdauer von 247 Tagen gerade noch als nicht trocken gelten, die 1 : 6 Estriche diese Marke nach bei Lagerung A und B nach 28 Tagen, bei Lagerung C nach ca. 80 Tagen unterschritten haben. Der Effekt einer längeren feuchten Lagerung ist überraschend hoch, bis zur Belegreife vergeht mehr als die doppelte Zeit. Bei den 1 : 8 Estrichen wird die Grenze von 3,5 Darr-% bereits nach ca. 4 Tagen unterschritten. Die weitere Lagerung ist dann eigentlich irrelevant, trotzdem sieht man, dass diese Estriche sehr stark weiter trocknen und bis zum Ende der Lagerung fast noch ca. 2 % Wasser verlieren. Es ist erkennbar, dass die Kurven in der logarithmischen Zeitdarstellung annähernd das gleiche Gefälle haben, der absolute Wasserverlust bei allen über die Lagerdauer mehr oder minder gleich ist.

⁸ Erläuterungen zur Aktivität und dem Chemischen Potential findet man in jedem Lehrbuch der physikalischen Chemie oder Thermodynamik. Auch auf Wikipedia gibt es eine gute Zusammenfassung: [https://de.wikipedia.org/wiki/Aktivit%C3%A4t_\(Chemie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Aktivit%C3%A4t_(Chemie))

⁹ Eine ausführliche Diskussion der thermodynamischen Grundlagen zur Feuchtemessung enthält der TKB-Bericht 2, Belegreife und Feuchte, Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen Stand: Juli 2013 Erstellt von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf. Dort: Kapitel 4.

¹⁰ Zerteile man eine Pizza in 2 Teile, wiegt jedes Teil die Hälfte der Gesamtpizza. Beide Teile haben aber noch die gleiche Temperatur, die senkt sich durch das Teilen nicht ab.

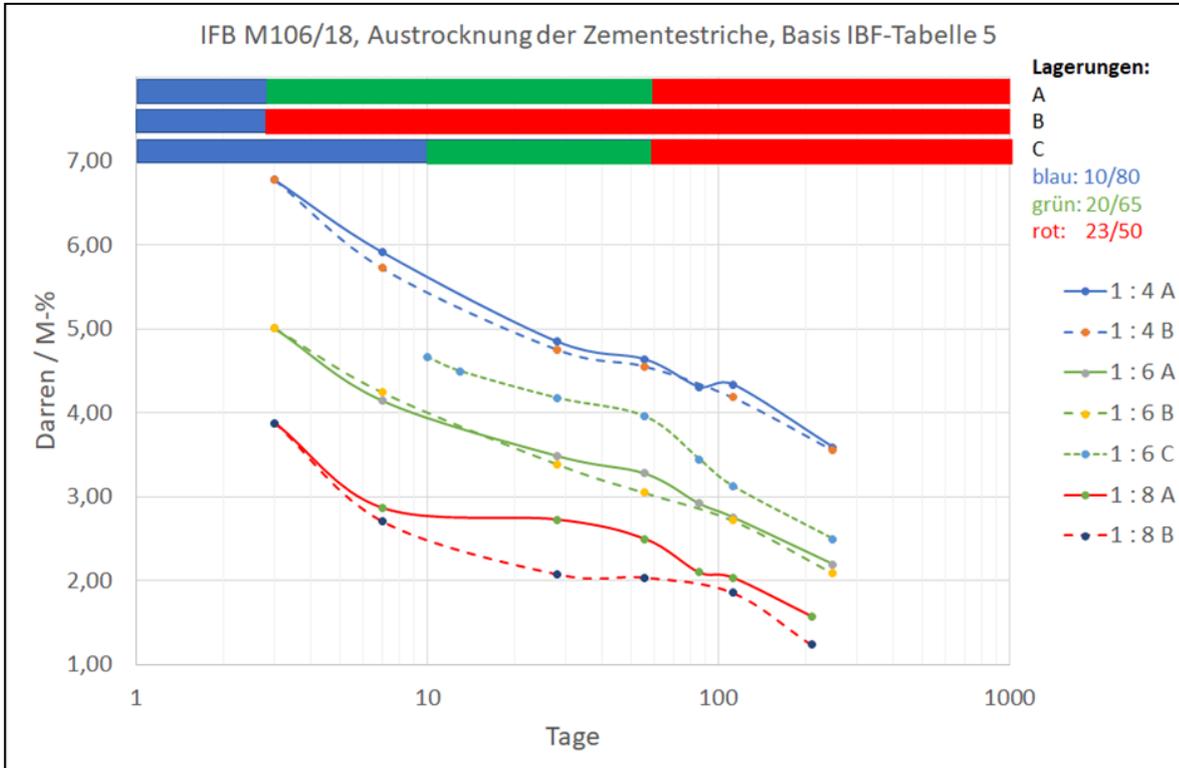
¹¹ TKB-Bericht 4, Belegreife und Feuchte, Sorptionsisothermen und die Interpretation von KRL-Messungen, Stand: August 2018, Erstellt von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf

Siehe Bild 2

Auf den ersten Blick sehen die Trocknungskurven mit den CM-Prüfungen sehr ähnlich zu denen der Darr-Prüfungen aus. Es gibt aber wesentliche Unterschiede bei

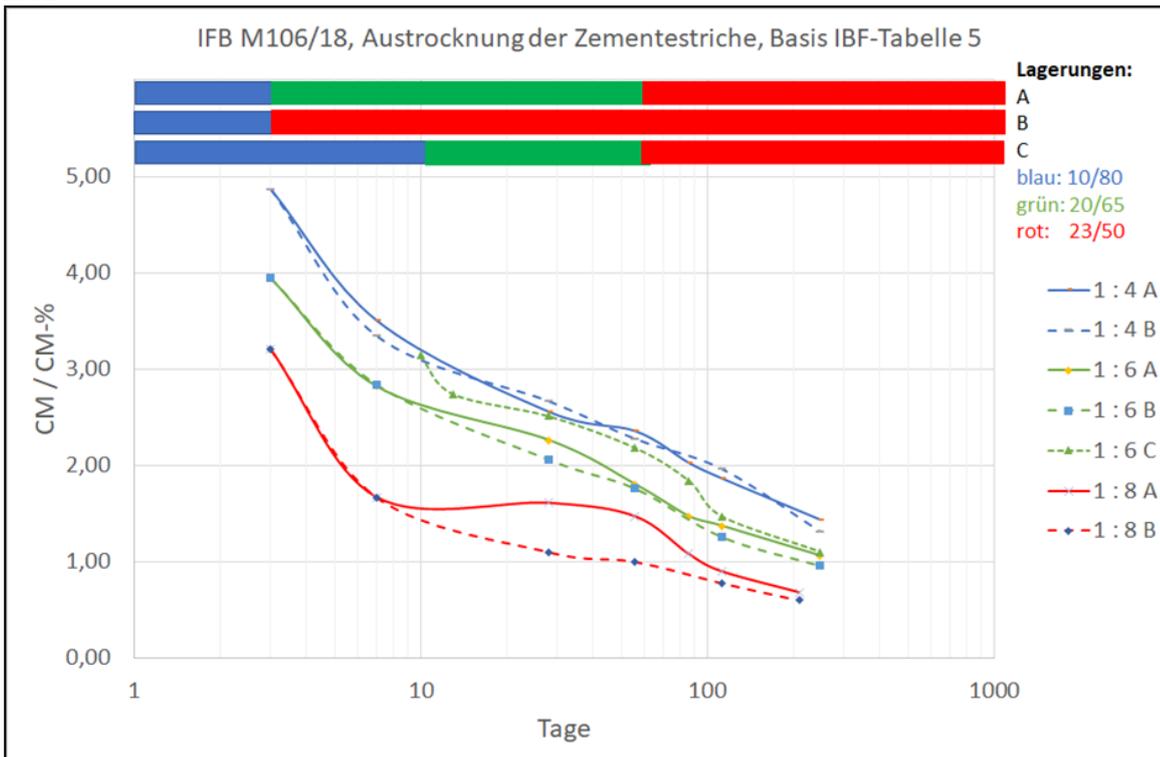
der Belegreife. Der Darr-Grenz-wert von 3,5 % soll äquivalent zu 2,0 CM-% sein. Für die 1 : 4 Estriche wird jetzt die Belegreife nach ca. 100 Tagen erreicht, für die 1 : 6 Estriche nach 12 bis 80 Tagen. Auch hier erweist sich Lagerung

Bild 1



Hinweis: die x-Achse ("Abszissenachse") ist logarithmisch skaliert. Die durch Linien markierten Werte sind dann 1, 2, 3, 4, ..., 9, 10, 20, 30, ..., 90, 100, 200, ...

Bild 2



C als stark verlängernd für die Trocknungsdauer. Bei den 1 : 8 Estrichen wird der Grenzwert von 2,0 % nach 5 Tagen unterschritten.

Insgesamt stellt sich hier die Frage, ob die Regel 3,5 Darr-% = 2,0 CM-% für diese Daten gilt.

2.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten

Eine einfache Auftragung aller Darr- und CM-Werte ergibt folgendes Bild:

Siehe Bild 3

Zum Vergleich wurde die Ausgleichsgerade aus Bild 8, „Vergleich CM-Gerät und Darrversuch (105 °C) bei Zementestrichen“, W. Schnell 1985, in das Bild hineinkopiert. Diese stimmt mit der Ausgleichsgeraden der neuen Daten hervorragend überein. Man sieht auch hier, dass 3,5 Darr-% einem Wert von 2,0 CM-% entsprechen. Die Daten vom IBF erlauben zusätzlich eine weitere Auswertung, bei der die Einzeldaten den Estrich-typen mit verschiedenen Mischungsverhältnissen zugewiesen werden:

Siehe Bild 4

In dieser farbkodierten Auftragung erkennt man nun, dass die vorherige Darstellung einen fundamentalen Unterschied nicht erkennen lässt: Die Beziehung zwischen Darr- und CM-Messergebnis hängt maßgeblich von der Zusammensetzung des Estrichs ab:

Tabelle 1

| Estrich mit Mischungsverhältnis MV | Darr-% bei 2,0 CM-% |
|------------------------------------|---------------------|
| 1 : 8 | ~ 3,0 |
| 1 : 6 | ~ 3,2 .. 3,5 |
| 1 : 4 | ~ 4,3 |

Die Korrelation zwischen Darr- und CM-Werten ist danach von der Zusammensetzung abhängig! Bei sehr kritischer Betrachtung muss noch ergänzt werden, dass die Messdaten zu 1 : 6 C sich signifikant von 1 : 6 B und 1 : 6 A unterscheiden. Dies legt nahe, dass auch das Lagerungsklima die Korrelation von CM- zu Darrwert beeinflusst.

2.2 Trockenkurven in KRL-Darstellung

In KRL-Werten sehen nun die Daten wie folgt aus:

Siehe Bild 5

Der Grenzwert von 80 % rH wird hier bei der Mischung 1 : 8 mit Lagerung B nach ca. 13 Tagen, bei 1 : 8 A und 1 : 6 B nach ca. 30 Tagen usw. erreicht. Die verlangsamte Trocknung bei 1 : 6 C (aufgrund des Klimas)

und 1 : 4 A und B (aufgrund der Mischung) führt zu einer Unterschreitung des Grenzwertes bei ca. 50 bis 80 Tagen. Grundsätzlich sieht man in diesem Diagramm die Effekte der Lagerungen, die im Wesentlichen durch die Luftfeuchte, nicht die Temperatur beeinflusst werden, deutlicher, da die KRL ebenfalls als Luftfeuchte bestimmt wird.

Auch im Bericht des IBF gibt es jeweils ein Bild das den CM-Wert bzw. den Darr-Wert als Funktion des KRL-Wertes zeigt. Allerdings werden dort die Proben nur nach dem Mischungsverhältnis, nicht aber nach der Lagerung differenziert. Im Folgenden findet man daher eine Darstellung der CM-Werte über den KRL-Werten, gefolgt von einer Darstellung der Darr-Werte über den KRL-Werten:

Siehe Bilder 6 & 7

Die Ausgleichskurven sind jeweils Polynome zweiten Grades. Es fällt unmittelbar auf, dass die Daten keine signifikante Differenzierung nach den Lagerungen erkennen lassen, die Darstellung des IBF in der Skizze 10 und 11 erscheint daher gerechtfertigt. Während bei der CM- über KRL-Wert-Darstellung die Kurven insbesondere bei MV 1 : 4 recht nahe bei denen mit MV 1 : 6 liegen, ist dies bei der Darr- über KRL-Wert-Darstellung nicht der Fall. Dort führt die Abmagerung zu annähernd äquidistanten Kurvenverläufen. Die Ursache des Unterschiedes ergibt sich aus dem Befund, dass CM- und Darr-Messungen nur bei gleicher Zusammensetzung des Estrichs korrelieren, bei Änderung des MV ist dies nicht mehr der Fall. Dies bestätigt die in Tabelle 1 dargestellten Beziehungen.

Trägt man in das letzte Diagramm die Trockenkurve für den CEM-I-Estrich im TKB-Bericht 4 ein,

Siehe Bild 8

erkennt man eine gute Übereinstimmung mit dem vom IBF gemessenen Estrich. Wie zu erwarten, liegen die IBF-Messwerte nahe bei der Austrocknungskurve.

2.3 Materialabhängigkeit der KRL

Im Kapitel 4 „Schlussfolgerungen aus den Prüfergebnissen“ des IBF-Berichts wird wie folgt ausgeführt: „Bei den durchgeführten Untersuchungen konnte eine Abhängigkeit des KRL-Wertes von der Art des verwendeten Bindemittels zur Herstellung des Estrichs und bei den mit Normalzement gemischten Zementestrichen außerdem eine Abhängigkeit des KRL-Wertes von der Mischungszusammensetzung des Zementestrichs festgestellt werden. Unterschiedliche Lagerungsbedingungen hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die KRL-Werte.“

Bild 3

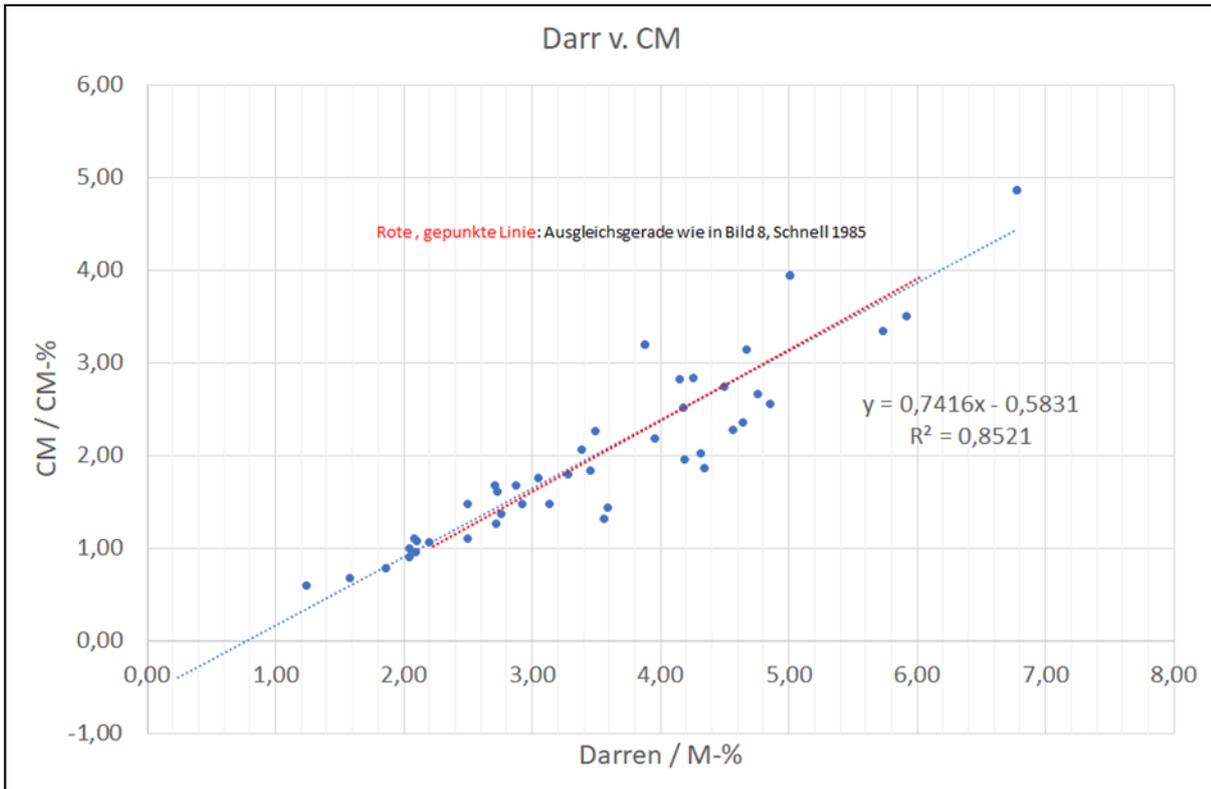


Bild 4

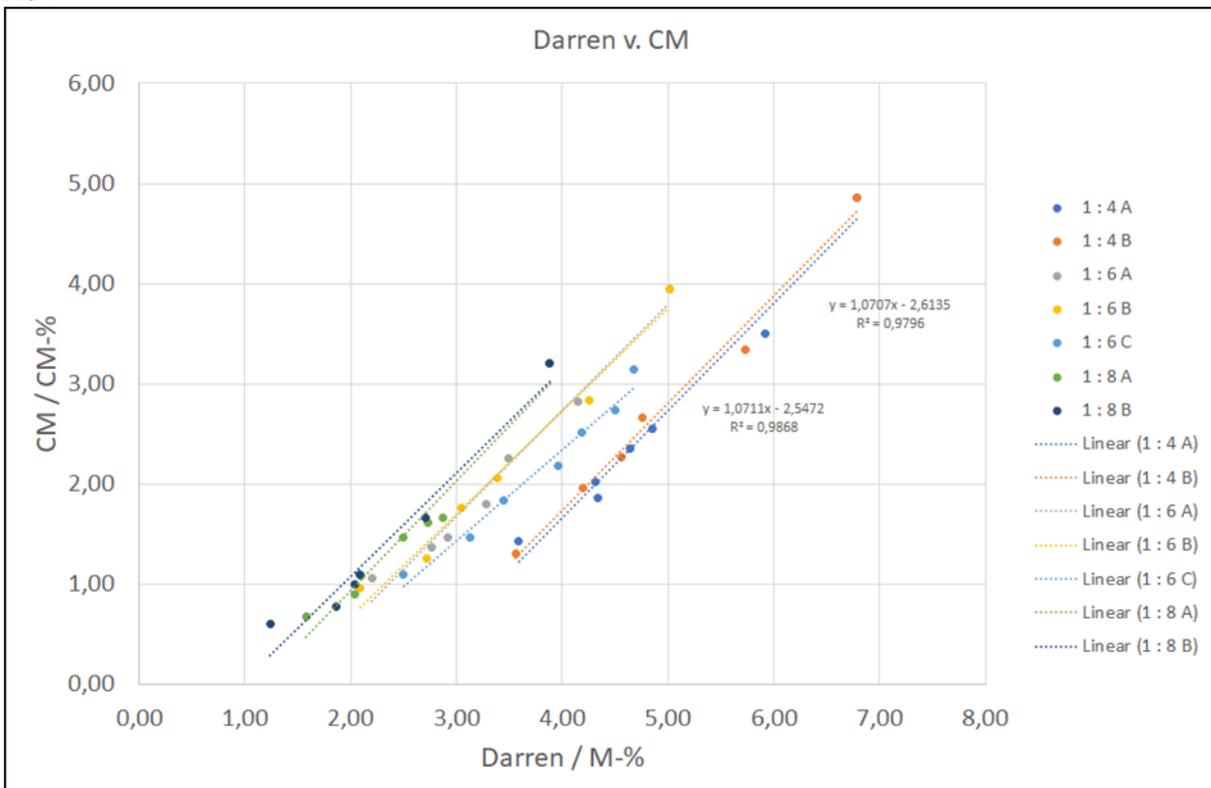


Bild 5

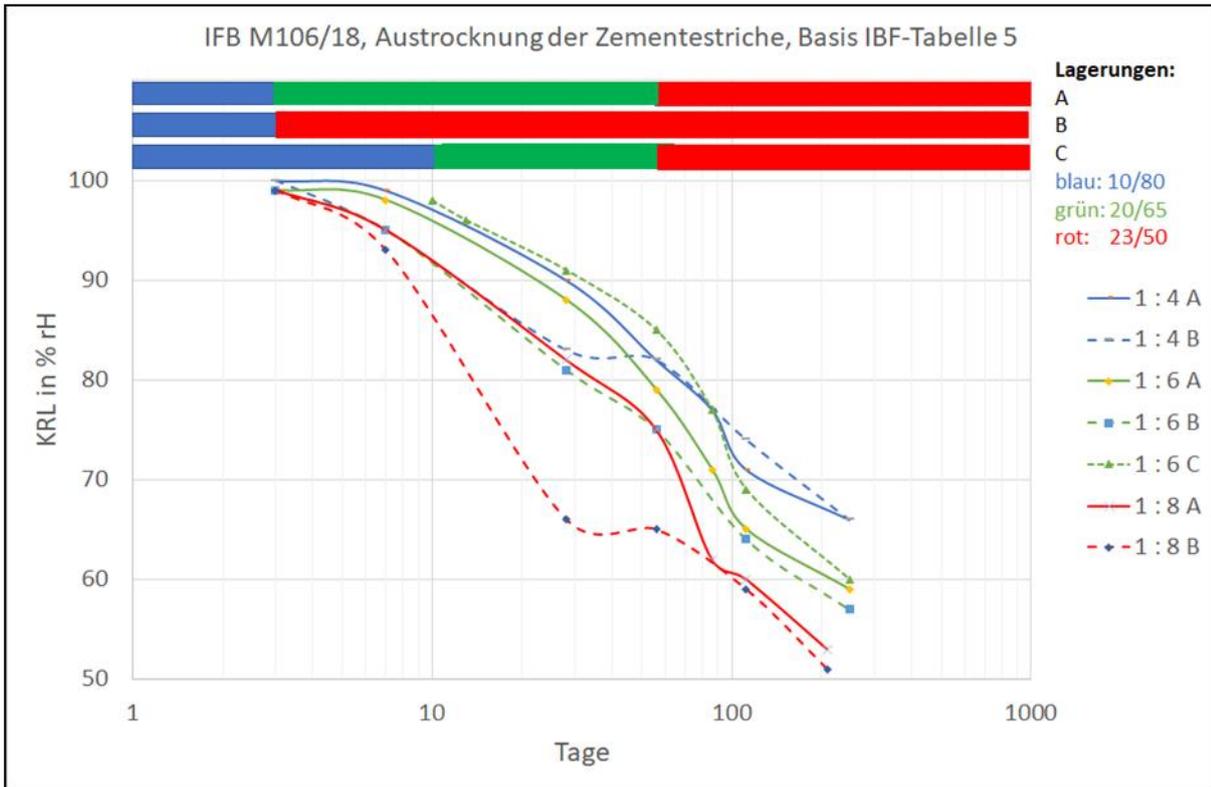


Bild 6

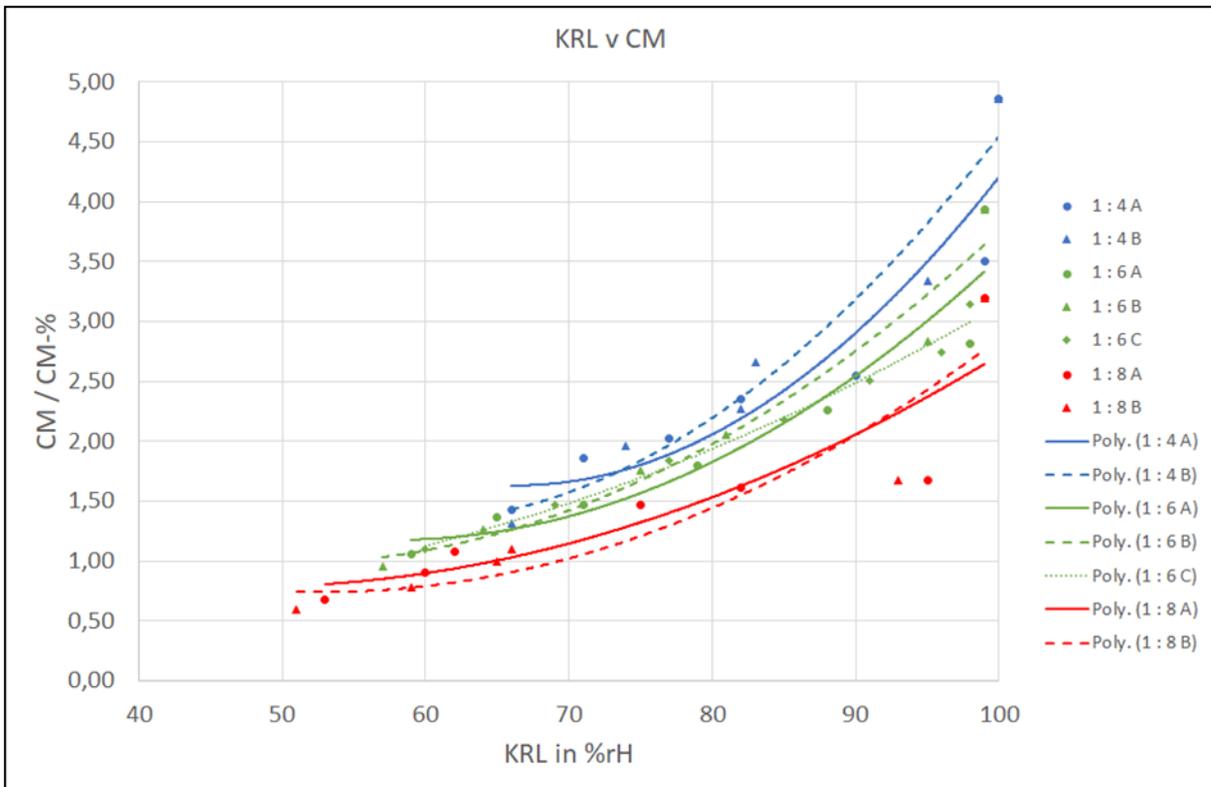


Bild 7

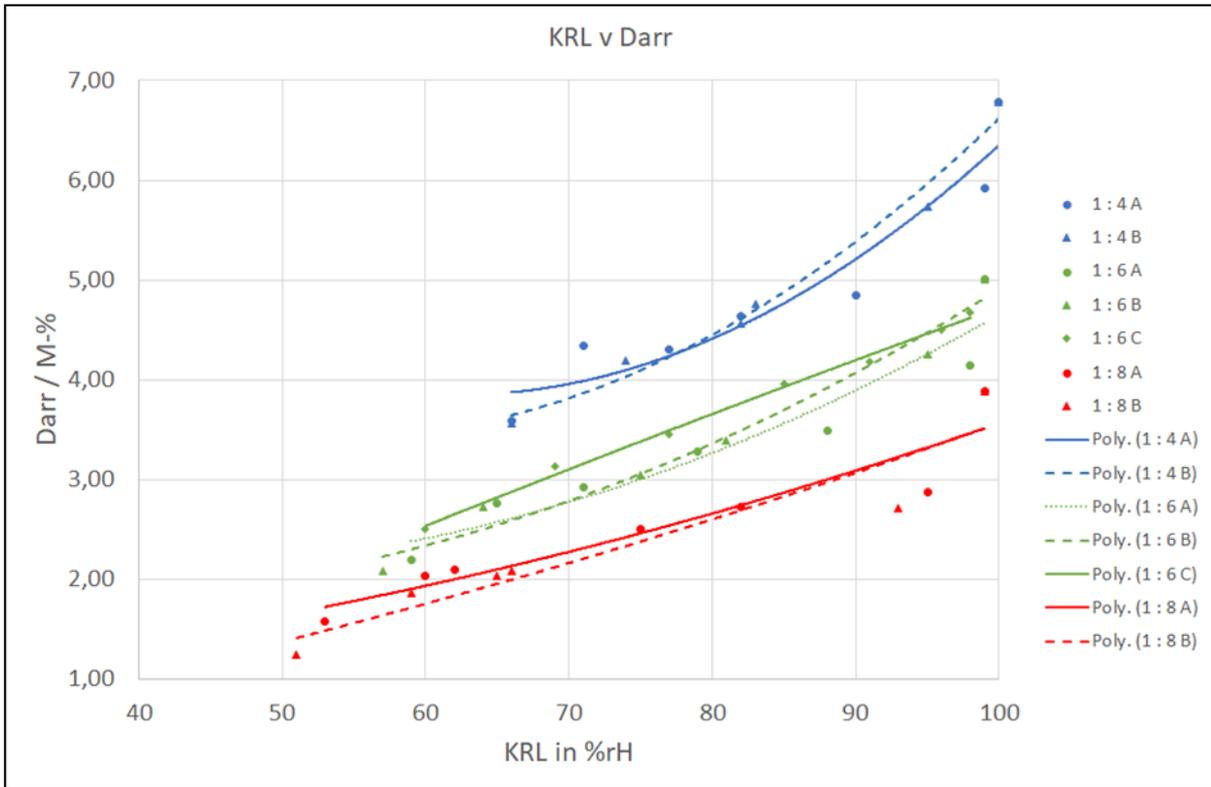
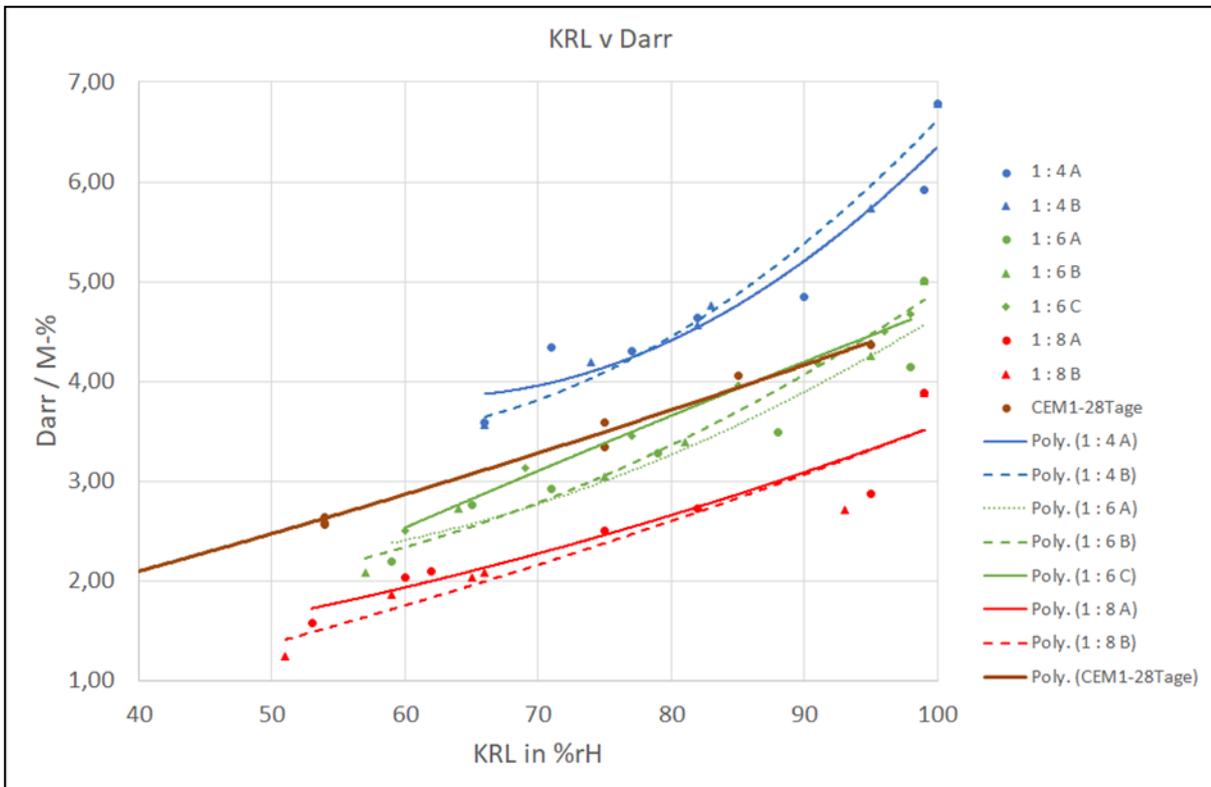


Bild 8



Diese Sätze sind für sich gesehen nur schwer verständlich, werden dann aber weiter unten erläutert. Die Materialabhängigkeit wird im weiteren Verlauf mit der Skizze 4

Siehe Bild 9

begründet. Die IBF-Skizze 4 zeigt dabei die gleichen Informationen wie Bild 6, allerdings werden dort die Messpunkte durch Polygonlinien verbunden und die Achsen sind vertauscht. Mit der Materialabhängigkeit der KRL ist hier tatsächlich gemeint, dass die CM-Werte unterschiedlicher Estriche bei gleichen KRL-Werten unterschiedliche Verläufe haben. Diese Kurven sind in der Tat materialabhängig, dass sind die „Trocknungsisothermen“. Der KRL-Wert als intensive thermodynamische Größe ist es nicht¹². Die Aussage beruht offensichtlich auf dem in den Kapiteln 1.1 und 1.2 erläuterten Missverständnis. Tatsächlich ist der CM-Wert bei gegebener Ausgleichsfeuchte materialabhängig. Man kann sich dies wie folgt klar machen: Hätte man die Trocknung der Proben gestoppt, in dem man sie alle in einen Kasten mit einer Luftfeuchte von 80 % gebracht hätte, hätten alle Proben nach einer unbestimmten Wartezeit eine KRL von 80 % gehabt, alle gleich – unabhängig vom Material. Der CM-Wert der 6 Proben wäre jedoch unterschiedlich gewesen: für ein MV von 1 : 8 bei ca. 1,5 CM-%, für ein MV von 1 : 6 bei ca. 2,0 CM-% und für eine MV von 1 : 4 bei ca. 2,2 CM-%.

Im weiteren Verlauf des Textes wird versucht, dies „Materialabhängigkeit“ mikroskopisch zu deuten. Herangezogen werden hierzu Daten der verschiedenen Porenanteile im Zementleim (siehe IBF-Skizze 9). Im Grundsatz ist dies nicht falsch, die Betrachtung bleibt aber sehr rudimentär. Eine fundierte Betrachtung und Möglichkeiten, diese Daten detailliert auszuwerten und zu verstehen findet man in der neueren Literatur¹³.

2.4 Ausgleichsfeuchte bzw. Trocknungs-dauer von Estrichen bis zur Belegreife

Auch bei diesen Themen werden die Autoren des IBF-Berichts durch ihr fehlendes Verständnis der KRL als intensive thermodynamische Größe in die Irre geführt. Die Ausgleichsfeuchte bei einem Klima von 23 °C und 50 % rH ist naturgemäß zwingend eine KRL von 50 % rH. Die im IBF-Bericht in der Tabelle 11 genannten „KRL-Wert (Ausgleichsfeuchte) % rH“, sind, da sie sich auf ein „... Klima 23/50 ...“ (siehe Seite 12, 2. Abschnitt)

beziehen, offensichtlich falsch, da die dort genannten Werte ~ 66, ~ 57 und ~ 52 % rH sind. In allen drei Fällen kann nur ein Wert von 50 % richtig sein. Die „Herleitung“ dieser Werte leidet unter diesem grundlegenden Missverständnis. Dass dies richtig ist, kann man im Übrigen sehr schön bei den Daten für die calciumsulfatbasierten Estriche sehen. Das letzte Klima der Lagerungen ist jeweils 23 °C und 50 % rH. Bei allen 4 Proben wird am Ende eine KRL von 50 +/- 1 % ausgewiesen. Die Zementestriche hatten also ihre Ausgleichsfeuchte noch nicht erreicht, hätte man sie länger gelagert, hätte man auch dort 50 % gemessen. Es ist wie eine Temperaturmessung: Bringe ich heißen Kaffee, lauwarmes Wasser und ein kaltes Bier zusammen in einen isolierten Kasten, werden nach einiger Zeit alle die gleiche „lauwarme“ Temperatur haben.

Wie schon erwähnt, ist der aktuelle Belegreife-Grenzwert der KRL-Messung (unbeheizt) bei 80 % rH. Die entsprechenden Trocknungsdauern können aus Bild 5 entnommen werden. Sie variieren stark entsprechend a) der Zusammensetzung und b) des Klimas der Lagerung. Da die Differenz zwischen der KRL im Material und der Luftfeuchte der treibenden Potentialdifferenz entspricht, ist die Trocknung bei größerer Differenz schneller. Die weiteren Details ergeben sich für den hygroskopischen Bereich aus den Fick'schen Gesetzen¹⁴.

Wie man Bild 6 entnehmen kann, entspricht der CM-Grenzwert von 2,0 % dem angepassten KRL-Grenzwert von 80 % bei Estrichen mit Mischungsverhältnissen zwischen 1 : 4 und 1 : 6. Man hat hier also innerhalb der Messgenauigkeit die gleiche Trocknungsdauer, da bei Erreichen der 2 CM % auch 80 % KRL unterschritten werden. Lediglich bei Estrichen mit einem Mischungsverhältnis von 1 : 8 ist die Trocknungsdauer bis zum Erreichen von 80 % länger. Dies ist aber in den Augen der TKB auch notwendig, da bei 2,0 CM-% ein aufgetragener Verlegewerkstoff und ein Belag einer Luftfeuchte von 90 % ausgesetzt würden. Die Wahrscheinlichkeit von Schäden in Verlegewerkstoffen, Bodenbelägen und der gesamten Konstruktion nimmt damit erheblich zu.

Im IBF-Bericht¹⁵ BEB 02/2013-A, „Untersuchungen zur Ausgleichsfeuchte unbeheizter Zementestriche“ wurden im Grundsatz bereits ähnliche Daten ermittelt. Insbesondere wurde auch dort beobachtet, dass die Ausgleichsfeuchten in CM-

¹² Eine ausführliche Diskussion der thermodynamischen Grundlagen zur Feuchtemessung enthält der TKB-Bericht 2, Belegreife und Feuchte, Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen Stand: Juli 2013 Erstellt von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf. Dort: Kapitel 4.

¹³ Rosa Maria Espinosa, Sorptionsisothermen von Zementstein und Mörtel, GCA-Verlag, Herdecke 2005

¹⁴

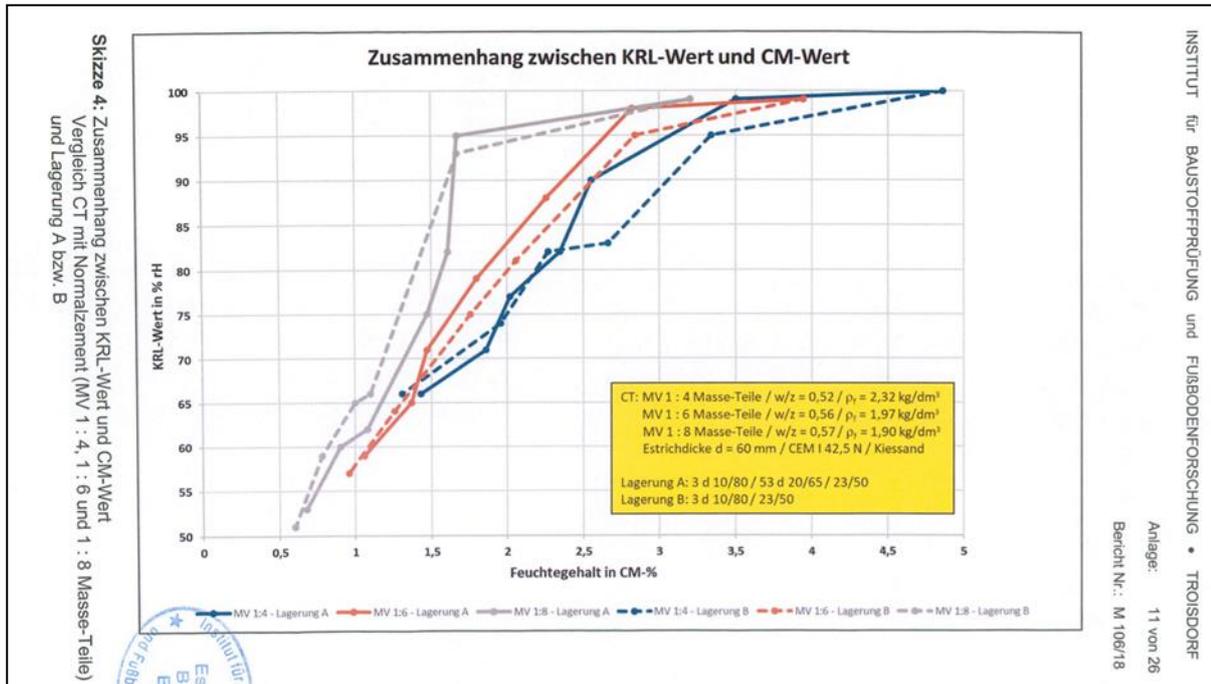
[https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion#Zweites_Ficksches_Gesetz_\(D](https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion#Zweites_Ficksches_Gesetz_(D)

[iffusionsgleichung](#)).

Es sei darauf hingewiesen, dass hier das chemische Potential verwendet werden muss. Die Konzentrations-Näherung ist irreführend, stattdessen muss die Aktivität des Wassers genommen werden, die in guter Näherung dem Dampfdruck des Wassers in der Luft entspricht

¹⁵ Technische Information BEB 02/2013-A (Ersatz für Fassung 02/2013 vom 25.04.2013), Untersuchungen zur Ausgleichsfeuchte unbeheizter Zementestriche, zusammengestellt von Herrn Dipl.-Ing. Egbert Müller

Bild 9



IBF Skizze 4 kopiert aus 1. Im Vergleich zu Bild 6 sind die x- bzw. y-Achse vertauscht.

bzw. Darr-% bei einem Klima von 23 °C und 50 % rH linear von der Zementleimenge im Estrich abhängen, wobei allerdings eine nicht unbeachtliche Streuung der Punkte auffällt. Es liegt nahe zu vermuten, dass ähnlich wie bei den Bildern 3 und 4 eine zusätzliche Gruppierung der Daten weitere Zusammenhänge erkennen lassen würde. In diesem Bericht wird auch schon erwähnt, dass für magere Estriche der CM-Belegreifgrenzwert reduziert und für zementreiche Estriche der Wert erhöht werden könnte.

3. Trocknungsdaten bei Zementestrichen mit Spezialzementen

Das IBF hat auch 2 Spezialzemente für die Herstellung von Estrichproben verwendet und Trocknungsdaten ermittelt.

Siehe Bilder 10 – 12

Anhand der CM-Messungen erlauben diese Estrichzusammensetzungen eine sehr schnelle Belegreife, der Grenzwert von 2,0 CM-% wird nach 2 bzw. 8 Tagen unterschritten.

Tatsächlich sind die Estriche zu diesem frühen Zeitpunkt noch sehr feucht mit KRL-Werten von ca. 95 %. Feuchteempfindliche Materialien und Verlegewerkstoffe würden hier in vielen Fällen nicht sicher funktionieren, wobei dies wahrscheinlich für die MV 1 : 6 Mischung nur eingeschränkt zutrifft, da ähnlich schnelle ternäre Systeme, die das Wasser überwiegend durch interne chemische Reaktionen einbinden (man beachte, dass die End-Feuchte bei ca. 58 % rH bei einer Lage-

rung im Klima 20/65 liegt) und auf ein physikalische Trocknung nicht angewiesen sind, tatsächlich bei sehr hohen Feuchten belegt werden können (die chemische Feuchtebindung muss schneller sein, als schadenswirksame Prozesse). Diese beiden Beispiele zeigen sehr schön, dass hier eine Vorhersage der Belegreife mit der KRL-Methode auch ohne Kenntnis der speziellen Materialeigenschaften funktioniert. Die Beurteilung von CM- oder Darrwerten setzt eine exakte Kenntnis der Sorptionsisothermen voraus.

3.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten

Siehe Bild 13

Auch hier zeigt sich wieder, dass bei genauer Betrachtung die Messpunkte signifikant nicht auf derbalten Ausgleichsgerade von Schnell liegen. Während dies bei dem 1 : 5 Material aufgrund des Darrens bei 60 °C nicht verwunderlich ist, stützt das 1 : 6 Material aber die generelle Aussage, dass Darr- und CM-% nicht korreliert sind.

3.2 Trockenkurven in KRL-Darstellung

Siehe Bild 14

Mit Bild 14 wird unmittelbar klar, dass für diese Estriche 2 CM-% kein Grenzwert für die Belegreife darstellen kann. Zu dem Zeitpunkt haben beide Estriche noch Feuchte von ca. 97 %. Für viele Beläge und Verlegewerkstoffe wäre dies zu feucht. Tatsächlich erreicht der 1 : 6 Estrich hier seine Belegreife bei 80 % rH = 0,8 CM-%.

4. Trocknungsdaten bei Estrichen mit Bindemitteln auf Basis Calciumsulfat

4.1 Die Korrelation von Darr- und CM-Werten

Siehe Bilder 15 & 16

Die Trocknungskurven liegen hier für beide Lagerarten zunächst sehr eng beieinander. Offensichtlich wurde die Trocknung zu Anfang nur unwesentlich vom Klima bestimmt, der Geschwindigkeitsbestimmende Schritt scheinen vielmehr Transportvorgänge im Estrich selbst zu sein. Erst nach ca. 30 Tagen machen sich Unterschiede bemerkbar.

Siehe Bild 17

Vergleicht man die Bilder 15, 16 und 17, haben die beiden ersten Darstellungen den Vorteil, dass man den Eindruck bekommt, dass eine Trocknung stattfindet und man Kontrolle über das Geschehen hat. Bei Bild 17, mit der KRL als kritische Messgröße, bleiben die Werte lange bei 100 % und ändern sich nicht, scheinbar trocknet der Estrich nicht. Dies ist tatsächlich mehr ein psychologisches als ein technisches Problem. Die Trocknung findet statt, solange Luftfeuchte und Luftaustausch über dem Estrich entsprechend niedrig (Luft-

feuchte) bzw. hoch (Luftaustausch) sind. Calciumsulfatbasierte Estriche enthalten rezepturbedingt am Anfang relativ viel Wasser und das sich einstellende Porensystem bzw. die Porenverteilung ist grundsätzlich anders als bei zementbasierten Estrichen.

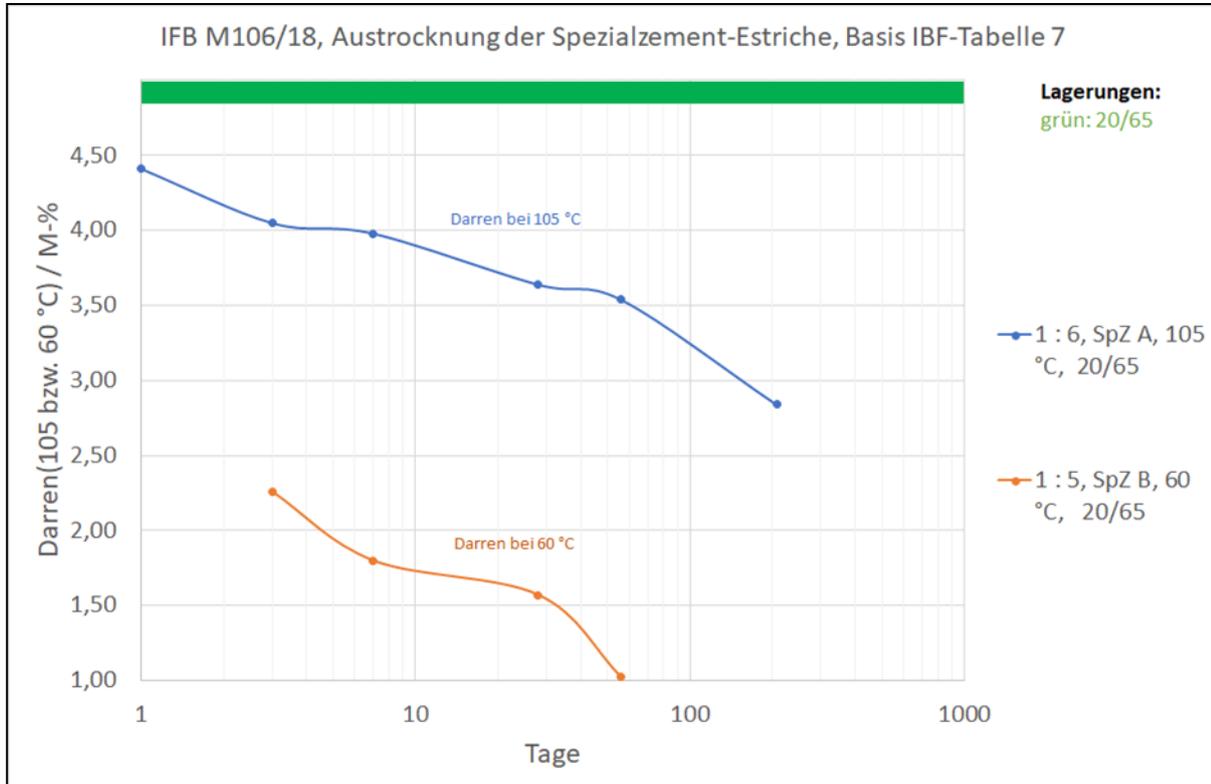
Siehe Bild 18

Allerdings kann man für die Trocknung ein "besseres Gefühl" entwickeln, wenn der KRL-Wert über die lineare Zeit aufgetragen wird.

4.2 Materialabhängigkeit der Feuchtwerte

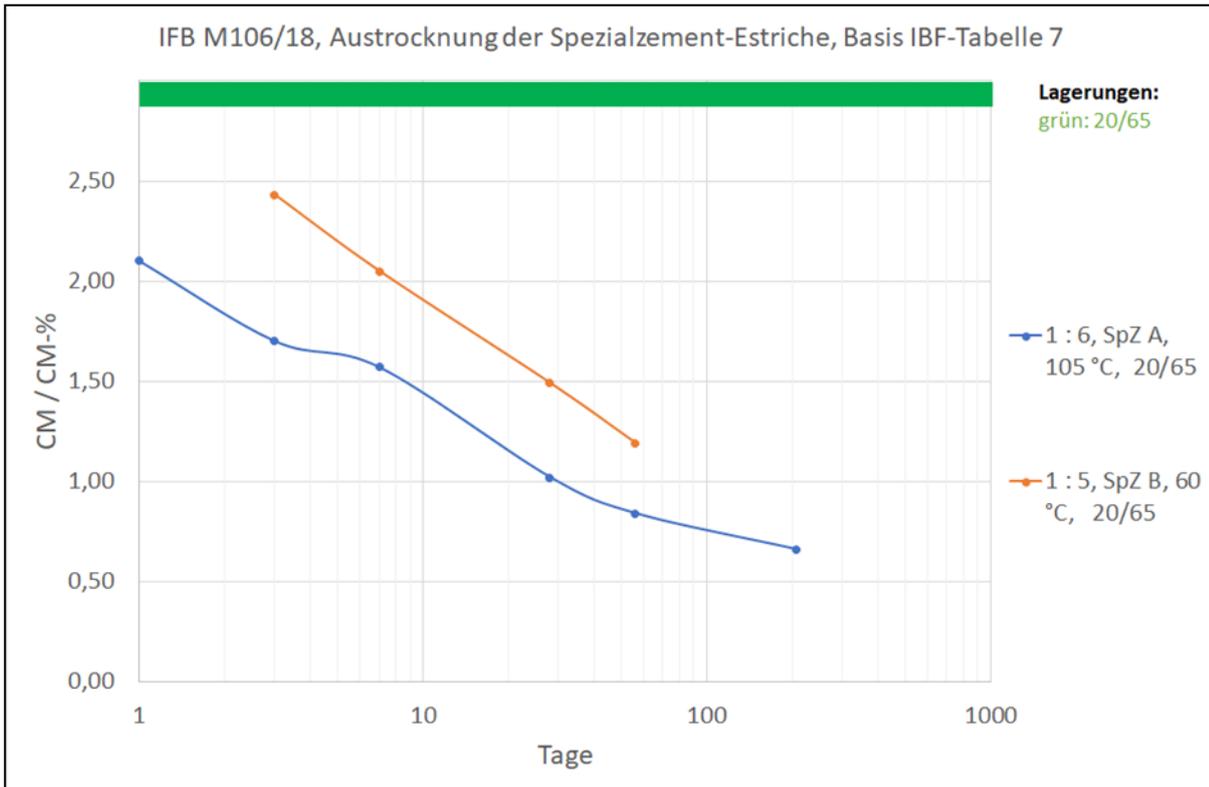
Die Bilder 19 und 20 zeigen CM- über Darr- bzw. KRL-Werte. Man erkennt, dass zwischen CM- und Darr-Werten ein annähernd linearer Zusammenhang besteht, weiter ergibt sich bei CM- über KRL-Werten der bekannte, fast rechtwinklige Verlauf der Trocknungsisothermen. Die Trocknungskurve des konventionellen Mörtels liegt dabei deutlich niedriger aneinander als die des Fließestrichs. Auffällig ist aber, dass der CA-Estrich im Bereich der Belegreife um 80 % rH deutlich niedrigere CM-

Bild 10



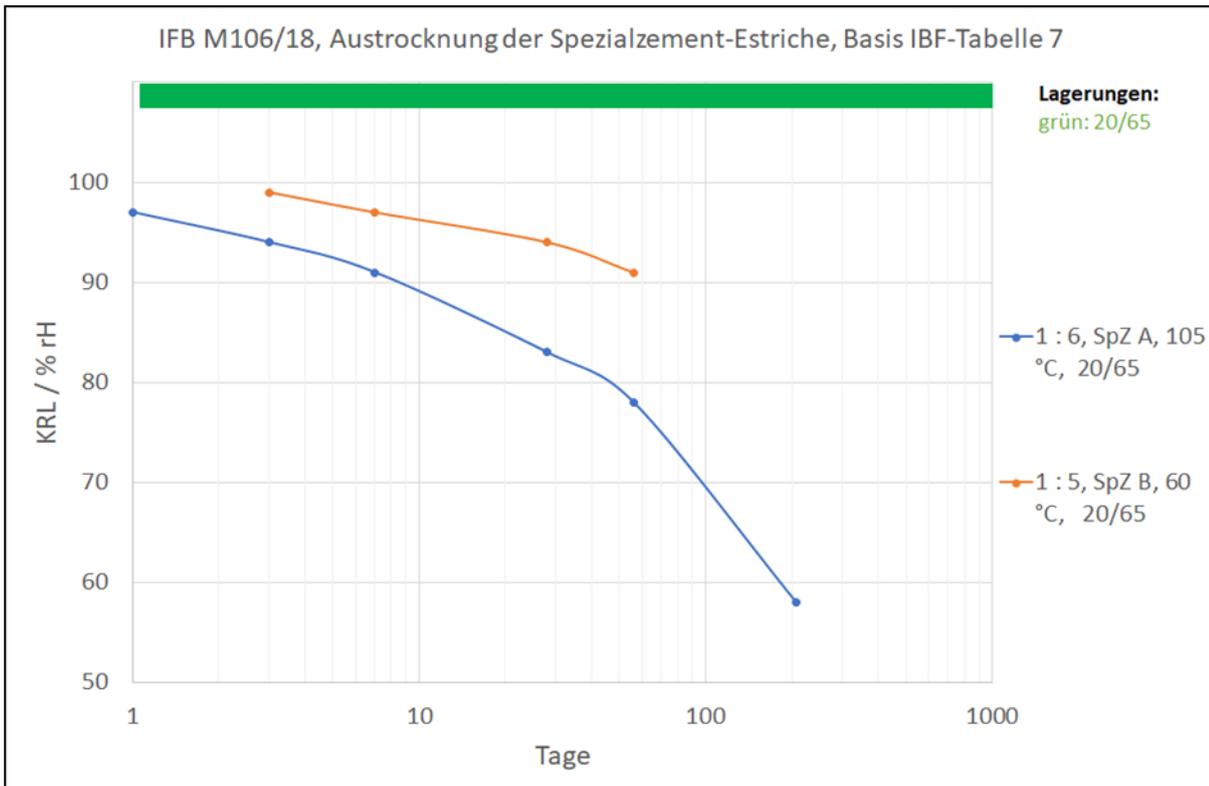
Trockenkurven bei Estrichen mit Spezialzement. Die Proben des 1 : 5 Estrichs wurden bei nur 60 °C gedarrt.

Bild 11



Trocknungskurve der Estriche mit Spezialzement in CM-Werten

Bild 12



Trocknungskurve der Estriche mit Spezialzement in KRL-Werten

Bild 13

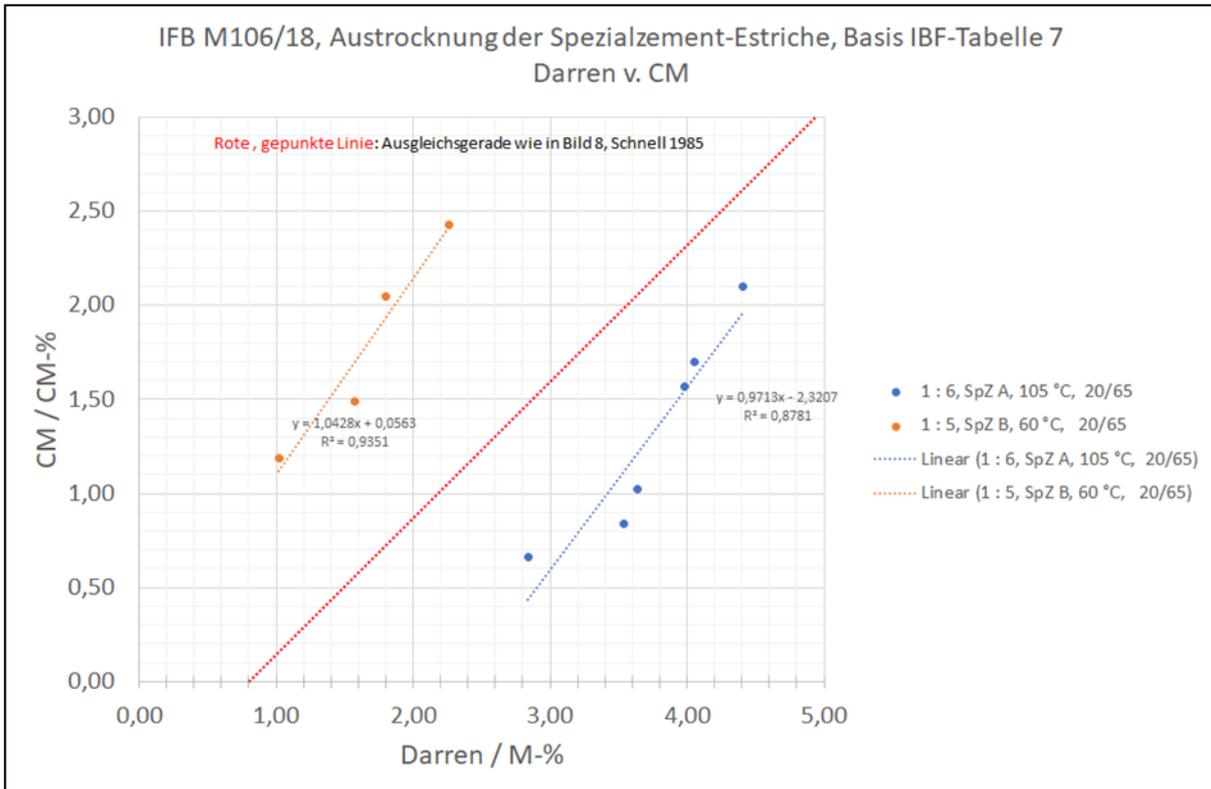


Bild 14

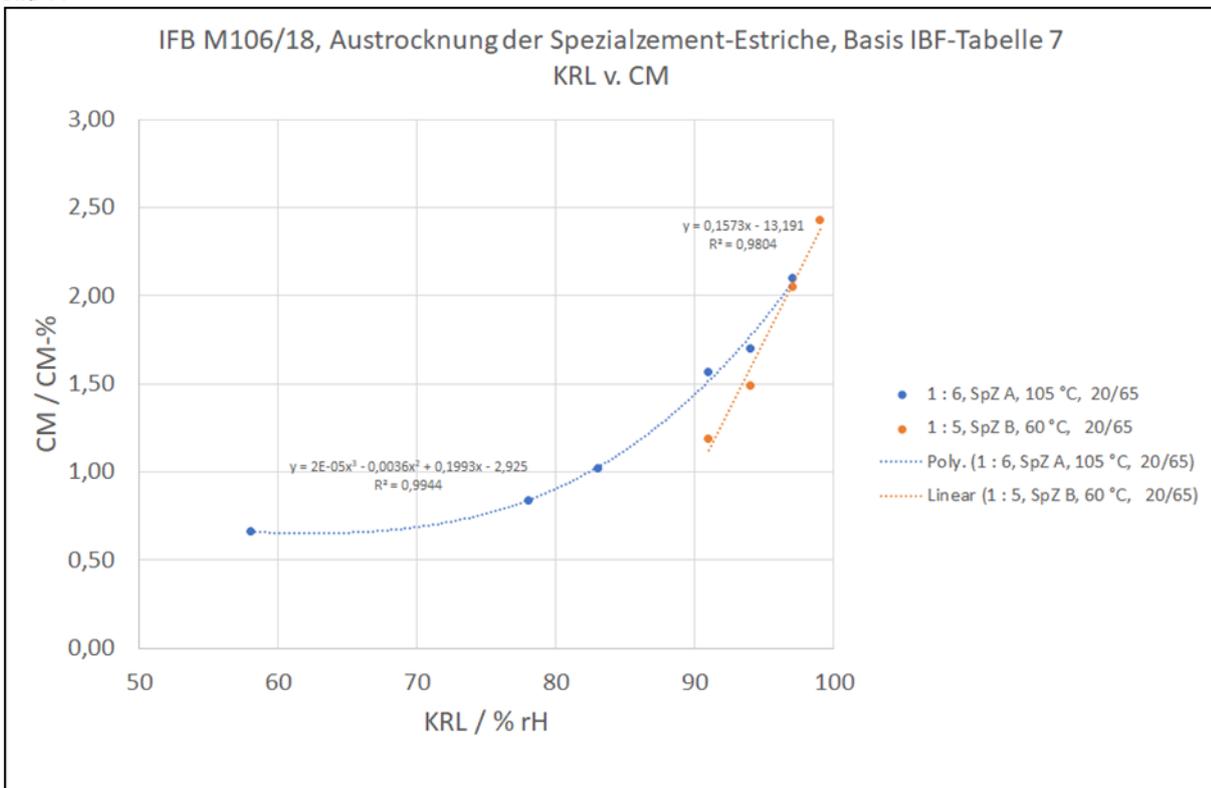


Bild 15

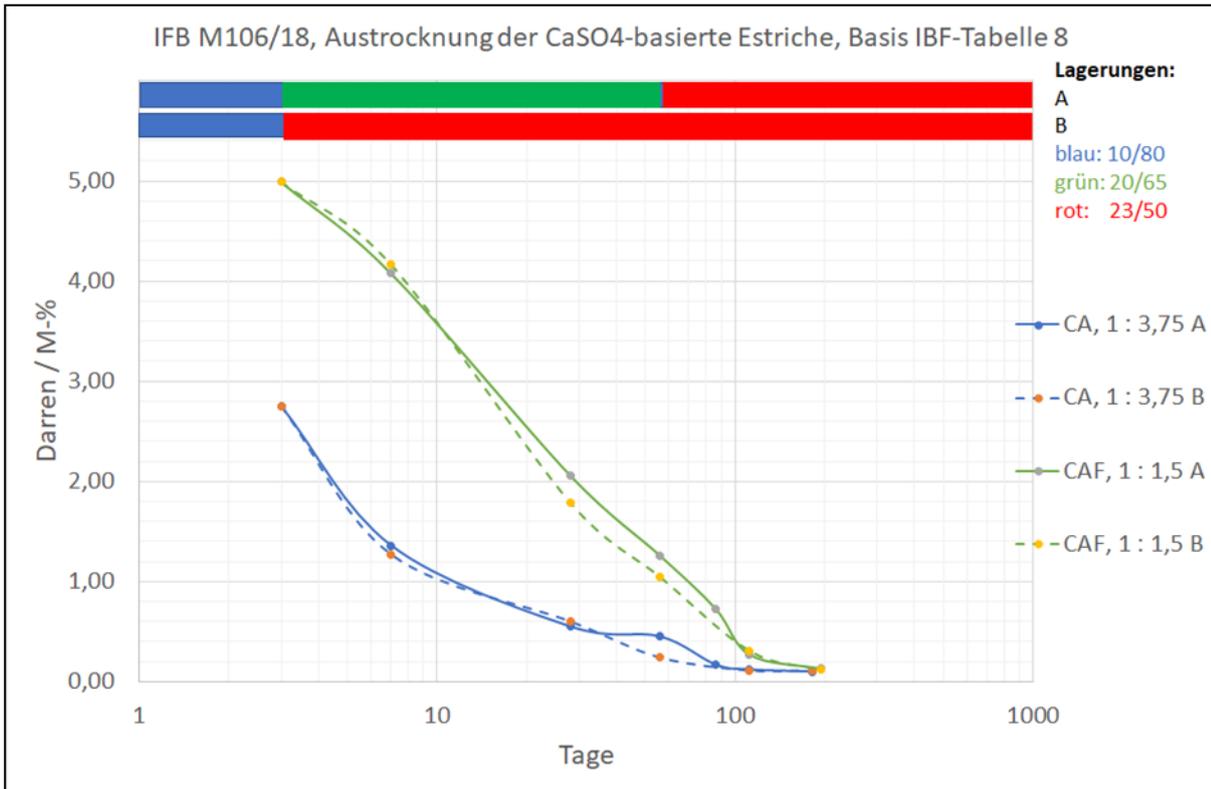


Bild 16

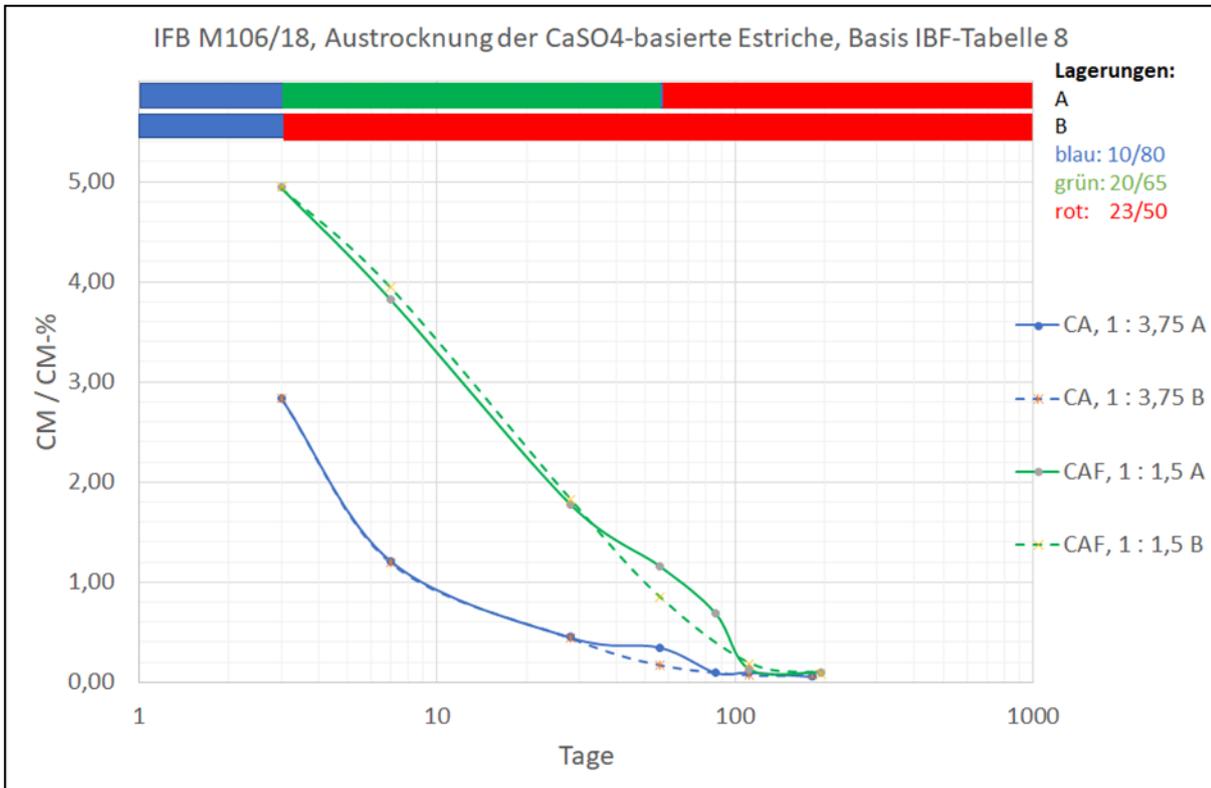
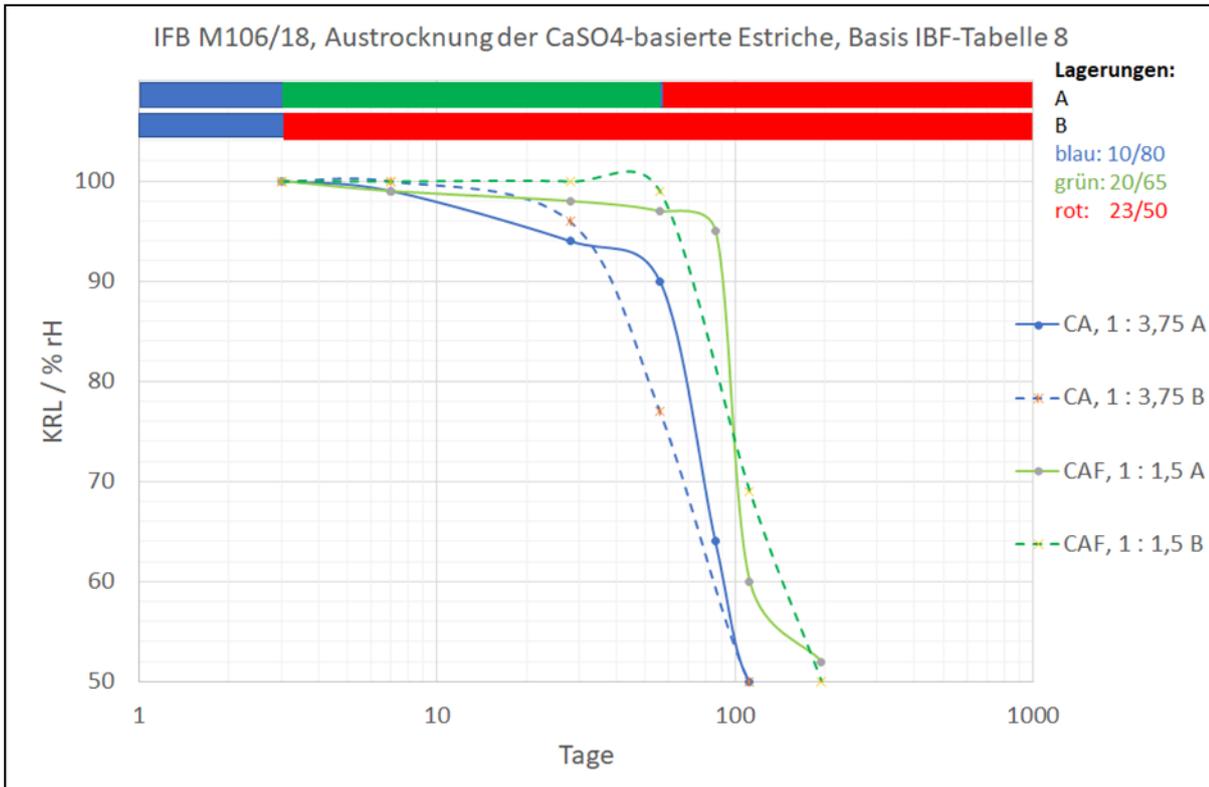
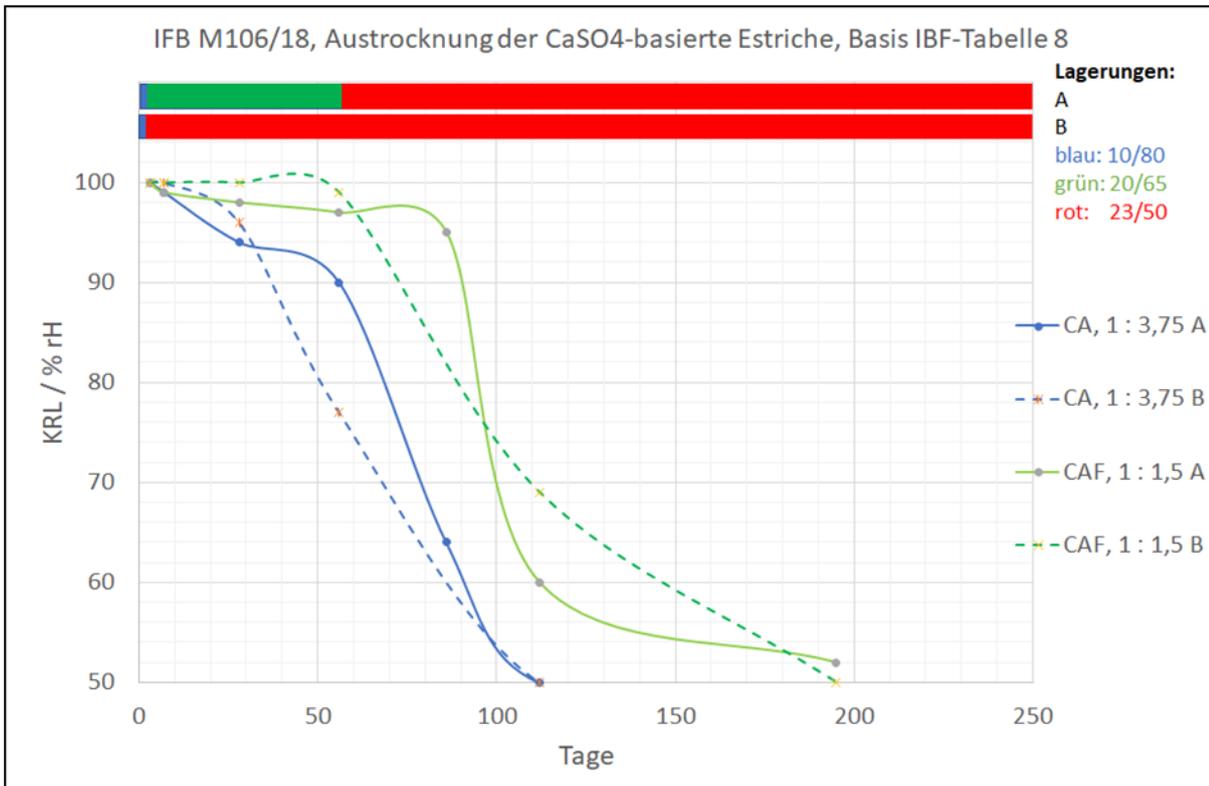


Bild 17



Trocknung der calciumsulfatbasierten Estriche, Zeitachse logarithmisch skaliert

Bild 18



Trocknung der calciumsulfatbasierten Estriche, Zeitachse linear skaliert

Werte als der CAF-Estrich hat. In Bild 21 wird dies nochmal vergrößert dargestellt. Man erkennt, dass der CA-Estrich bei einer KRL von 80 % rH einem CM-Wert von 0,2 % und der CAF-Estrich von 0,4 % hat. Auch hier zeigt sich, dass die Belegreife in CM-% materialabhängig ist und es wird verständlich, wieso einige CAF-Hersteller eine Belegreife bei 0,5 CM-% sehen.

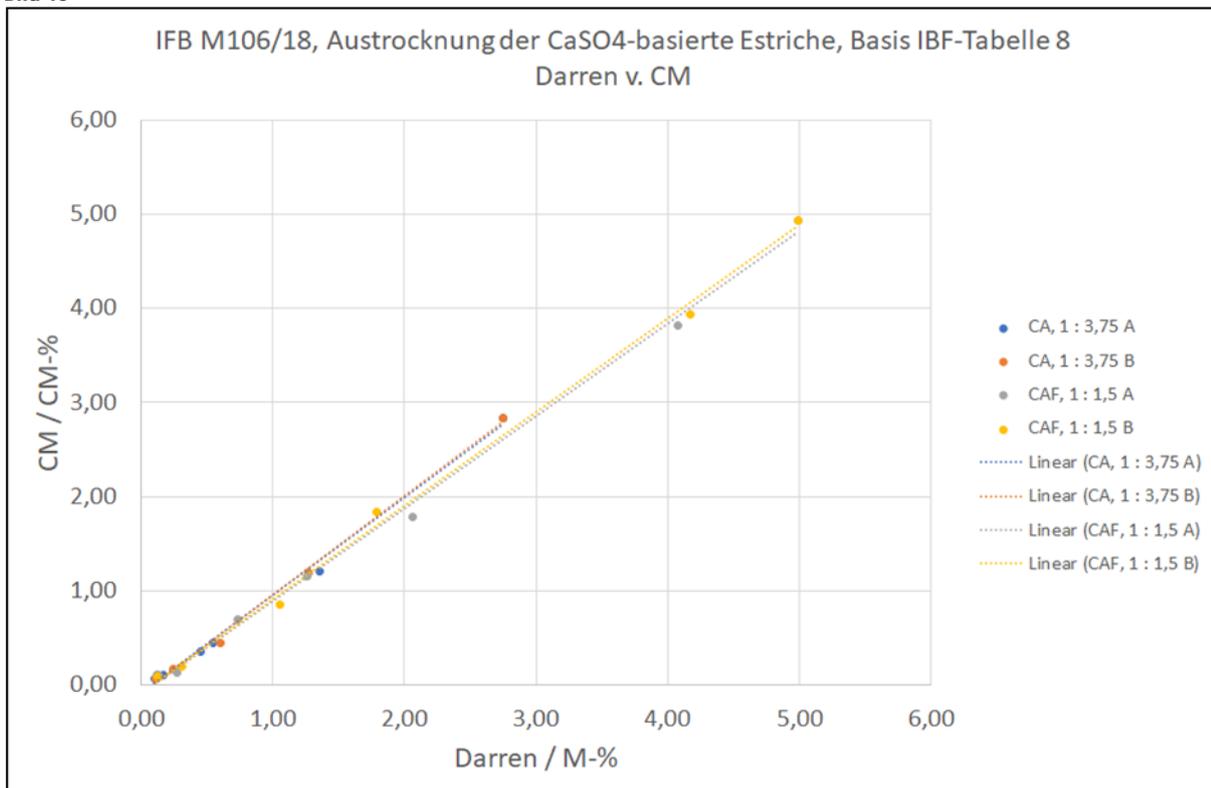
Siehe Bilder 19 – 21

5. Schlussfolgerungen

Der IBF-Bericht liefert gut aufgelöste Daten. Mit ihnen gelingt es zu zeigen, dass die Beziehung von Darr- zu CM-Werten bei Zementestrichen materialabhängig ist. Für diesen Befund gab es bereits Hinweise in der Literatur¹⁶, mit den neuen Messdaten des IBF kann gezeigt werden, wie groß der Effekt tatsächlich ist.

Die behauptete Materialabhängigkeit der KRL dagegen beruht auf einem Missverständnis. Mit dem angepassten KRL-Grenzwert von 80 % ergibt sich bei herkömmlichen Estrichen auf Basis von Normalzementen kein Unterschied in der Trockendauer, die Estriche werden also gleich beurteilt. Lediglich bei neuen Mischungen im Verhältnis 1 : 8 ergibt sich eine längere Trockendauer, da der CM-Grenzwert von 2,0 % für diese Estriche falsch ist. Der KRL-Wert von 80 % gibt aber auch dort ein realistisches Bild in Bezug auf die Belegreife wieder.

Bild 19



¹⁶ O. Baumann, P. Fendt, J. Barth, Kommentar DIN 18356, DIN 18367 und DIN 18299, Rudolf Müller Verlag, Köln 1997. Dort: S. 171, 3. Abschnitt: "... scheidet für ihn eine Untersuchung der Darr-Feuchtemessung (Trockenrückstandbestimmungen) aus. Die in einem solchen Verfahren festgestellten Feuchtwerte liegen höher als die mit einem CM-Feuchte-Messgerät festgestellten Werte (3,0 Gew.-% = ca. 2,0 CM-% Feuchte)". Man beachte den Unterschied zu Schnell 1985 und 1994: 3,5 Gew.-% = 2,0 CM-%.

Bild 20

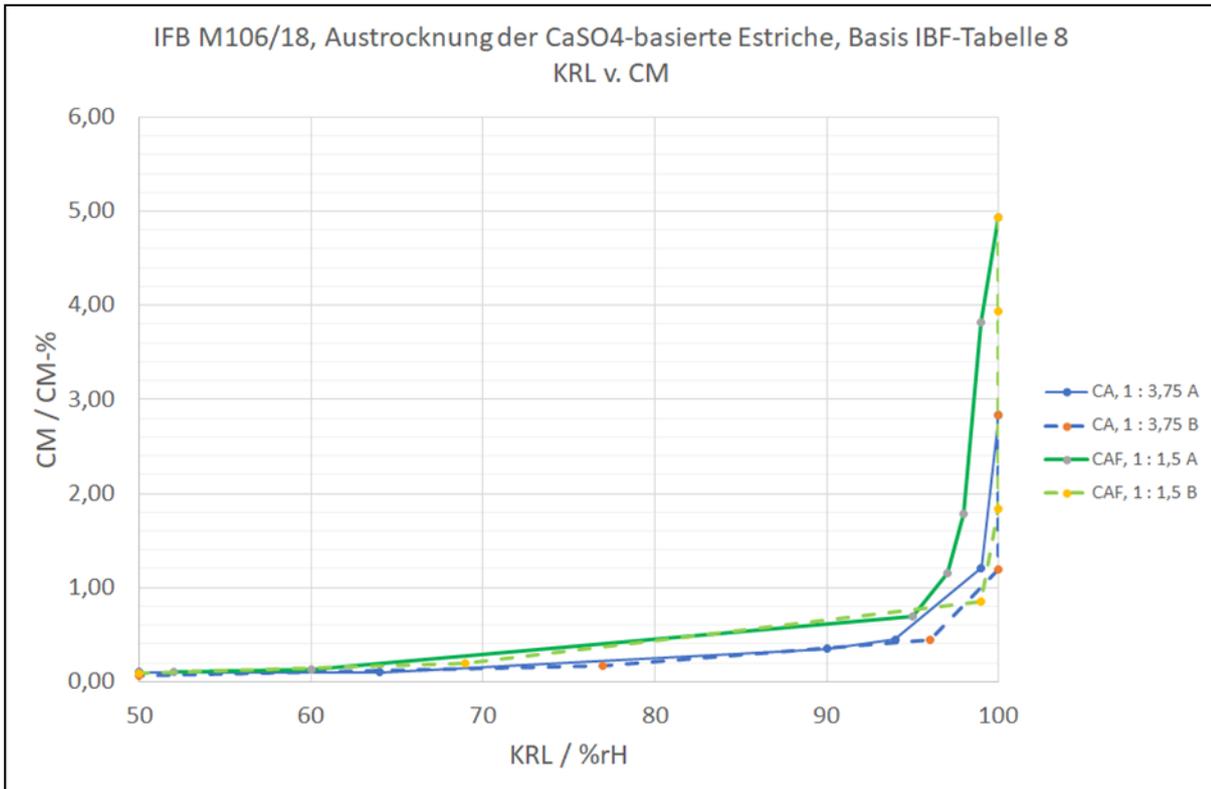
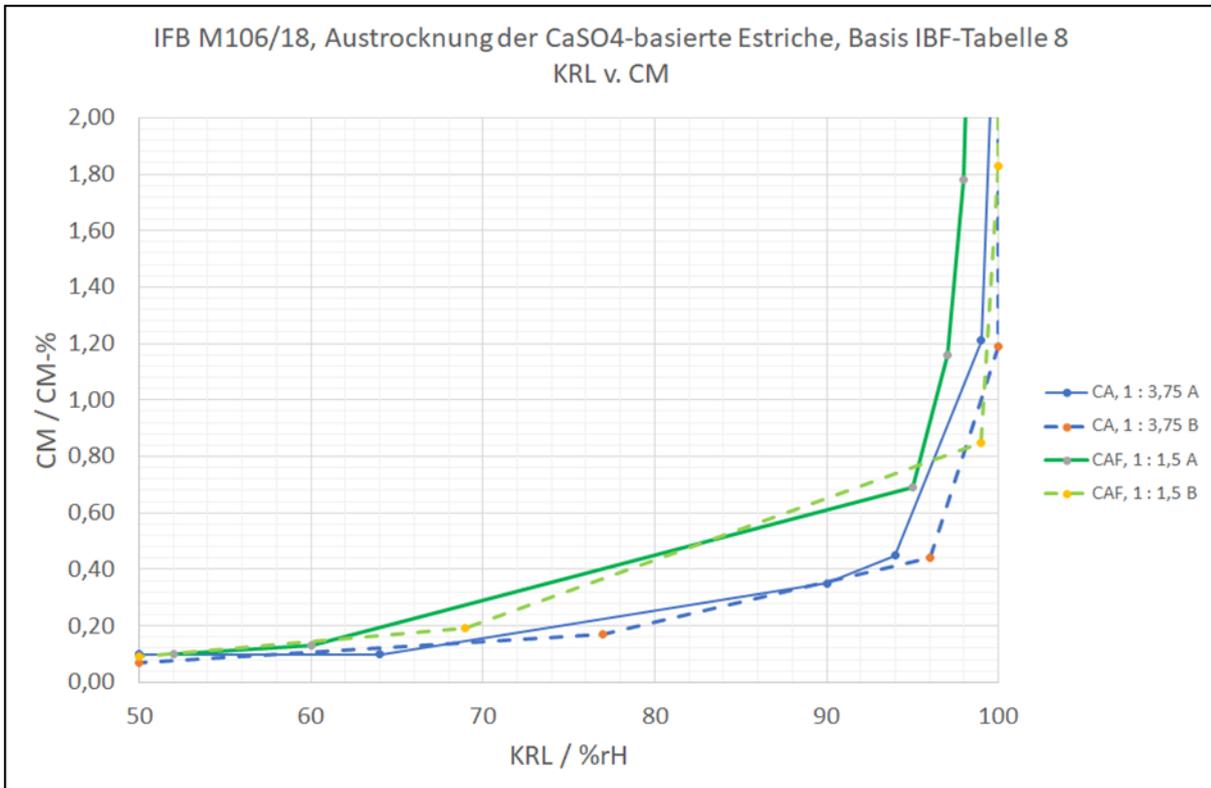


Bild 21



6. Anhang

| TKB-Tabelle 2 Unterschiede zwischen IBF Bericht M106/10 und Schnell 1985 | | | |
|---|---|---|---|
| Belang | IBF Bericht M106/18 dort: IBF-Tabelle 1, 2 | Schnell 1985 Tabelle 1 | Kommentar |
| Bindemittel | werden über Normen- verweise benannt | unklar | Wahrscheinlich wurde von Schnell eben- falls ein Portlandzement eingesetzt ¹⁷ |
| Mischungsverhältnisse • Zementestrich - CT - Spezialzem. • Calciumsulfat - CA - CAF | 1 : 4, 1 : 6, 1 : 8 1 : 6, 1 : 5 1 : 3,75 1 : 1,5 | 1 : 3, 1 : 5 1 : 3,5 | Der Trend geht zu mageren Estrichen. Die Mischungsverhältnisse beeinflussen massiv die Sorptionsisothermen/Trock- nungsisothermen. |
| w/z-Werte • Zementestrich - CT - Spezialzem. • Calciumsulfat - CA - CAF | 0,52; 0,56; 0,57 0,46; 0,53 0,35 0,43 | 0,45 ; 0,58; 0,61 0,34; 0,41 ; 0,47 | Für die neuen IBF-Versuche wurden relativ hohe w/z-Werte gewählt. Auch der w/z-Wert hat einen starken Einfluss auf die Sorptionsisothermen/ Trocknungs-isothermen. |
| Zusatzmittel • CT • CA • CAF | ohne, LP-Mittel Plastifizierer Fließmittel | ohne , ZE-Plus, Glascolith | |
| Estrichplatten • Dicke / cm • Lagerung auf | 6 Polystyrol Trittschall- dämmplatten EPST | 3; 4 schwimmend, Trenn-Schicht | Die neuen Proben sind mit 6 cm deutlich dicker als die alten. In beiden Fällen ist nicht klar, wie stark eine Trocknung nach unten möglich war. Eine Trennschicht muss nicht eine Dampfsperre sein, die genannten Dämmplatten haben μ -Werte in der Größenordnung der Estrichplatten selbst. |
| Lagerungen der Estrichplatten | A: 3 d 10/80, bis 56 d 20/65, dann 23/50 B: 3 d 10/80, dann 23/50 C: 10 d 10/80, bis 56 d 20/65, dann 23/50 (Bsp: "23/50" = 23 °C und 50 % rH) | zunächst: 30 .. 37 d: 10 .. 13 °C / 75 .. 80 % rH; dann: 22 .. 33 d: 20 .. 23 °C / 45 .. 50 % rH | Beide Lagerungstypen starten mit einer Feuchtlagerung von ca. 10 °C und 80 % rH, halten diese aber sehr unterschiedlich lang ein. Das IBF geht dann entweder zur 20/65 und 23/50 über oder gleich zu 23/50. |

¹⁷ Kurt Glass, Zementgebundene Estriche und Industrieböden, Köln, Rudolf Müller, 1996, ISBN 3-481-01102-4. vgl. dort S. 9, übliche Zemente für Estriche