

DIPLOMA THESIS

Drying behavior of heating screeds after flooring

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Trocknungsverhalten von Heizstrichen nach Belagsverlegung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Marina Vranić, BSc

Matr. Nr.: 00926323

unter der Anleitung von

Univ. Prof. **Agathe Robisson**, PhD
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Karl Deix**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Baustofflehre, Werkstofftechnologie
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/207-01, A-1040 Wien

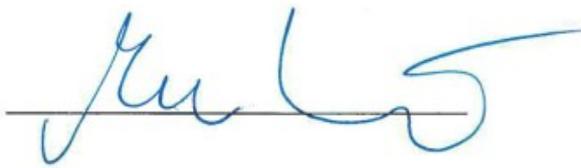
Wien, im Mai 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Mai 2021



Unterschrift

Danksagung

Um dieses Studium erfolgreich abschließen zu können, zählte für mich neben Ehrgeiz, eiserner Disziplin und Durchhaltevermögen, vor allem die Unterstützung von zahlreichen Menschen, die mich durch ihr Fachwissen, gute Ratschläge, aufmunternde und motivierende Worte auf diesem Lebensabschnitt begleitet haben.

Für das vermittelte Fachwissen möchte ich mich bei meinen Professoren der TU Wien bedanken und vor allem bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix, welcher ein hervorragender Betreuer während der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit war und mir mit seinem breiten Wissen zum Thema Estrich bei inhaltlichen Fragen immer tatkräftig zur Seite stand.

Als zweite große Stütze während der letzten Jahre möchte ich meine lieben Vorgesetzten und Arbeitskollegen erwähnen, die mir durch ihr Verständnis geholfen haben, den oft schwierigen Spagat zwischen Arbeit und Prüfungsstress zu bewältigen. Der TU Wien habe ich mein theoretisches Wissen und meinen Arbeitskollegen mein Praxiswissen aus dem Baustellenalltag zu verdanken.

Meine Dankbarkeit möchte ich auch meinen Studienkolleginnen und Studienkollegen ausdrücken, die tage-, wochen- und monatelang mit mir für Prüfungen gelernt haben. Meiner Freundin Susane Kojić danke ich für ihr offenes Ohr für meine kleinen und großen Sorgen zu jeder Tages- und Nachtzeit und ihre aufbauenden Worte, die sie in jeder Situation gefunden hat.

Zu guter Letzt geht mein größter Dank an meine Eltern, Mira und Milan Vranić und meinen Bruder Milan, welche nie an meinem Erfolg gezweifelt haben und mir in schwierigen Situationen stets zur Seite gestanden sind. Ohne ihre mentale und auch finanzielle Unterstützung wäre all dies nicht möglich gewesen. Auch meiner Cousine Željka Glišić möchte ich einen Dank aussprechen, welche mein absolutes Vorbild und meine Mentorin auf meinem Bildungsweg war und mir stets mit den besten Ratschlägen den richtigen Weg gezeigt hat.

Kurzfassung

Das Trocknungsverhalten von Estrich spielt auf der Baustelle in der Ausbauphase eine entscheidende Rolle, um spätere Schäden durch Restfeuchtigkeit zu vermeiden. Eine Reihe von Faktoren beeinflussen den Feuchtigkeitshaushalt im Estrich, so auch das Aufbringen eines Fußbodenbelags.

Der Sinn und Zweck der durchgeführten Untersuchungen war es, den Einfluss des Fußbodenbelags auf das Trocknungsverhalten des Estrichs festzustellen. Aus diesem Grund wurden zwei Zementestrichproben mit einer Stärke von 7,5 cm betoniert und im Anschluss an die 1. Ausheizphase am 42. Tag mit einem Fliesen- und Parkettbelag versehen. Das Messen der relativen Luftfeuchtigkeit auf fünf Ebenen über die Probenhöhe verteilt ermöglichte es die Veränderungen der Feuchtigkeit durch das Heizen und die Belagsverlegung zu erfassen.

Das Ergebnis zeigte, dass der Estrich während dem Ausheizen auf allen Messebenen an Feuchtigkeit verlor und sich mit der Belagsverlegung rasant hohe Feuchtigkeitswerte um die 90 - 100 % einstellten. Besonders das obere Probendrittel trocknete ohne Belag rasch aus und nahm mit Belag sehr schnell hohe Feuchtigkeitswerte wieder an.

Abstract

The drying behavior of screed plays a decisive role on the construction site during the finishing phase in order to avoid later damage due to residual moisture. A number of factors can influence the moisture balance in the screed, including the application of a floor covering.

The purpose of the tests carried out was to determine the influence of the floor covering on the drying behavior of the screed. For this reason, two cement screed samples with a thickness of 7,5 cm were concreted and covered with a tile and parquet floor covering following the first curing phase on the 42nd day. Measuring the relative humidity at five levels distributed over the sample height made it possible to record the changes in humidity due to heating and covering installation.

The results showed that the screed lost moisture at all measurement levels during the bake-out and rapidly reached high moisture values of around 90 - 100 % when the covering was laid. In particular, the upper third of the sample dried out quickly without covering and very quickly resumed high moisture values with covering.

Abkürzungsverzeichnis

%	<i>Prozent</i>
°C	<i>Grad Celsius</i>
μ	<i>Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]</i>
20/55	<i>Temperatur 20 °C und relative Luftfeuchtigkeit 55 %</i>
20/65	<i>Temperatur 20 °C und relative Luftfeuchtigkeit 65 %</i>
A	<i>mit den Auflagerplatten in Berührung stehende Fläche des Probekörpers [mm²]</i>
b	<i>Probenbreite [mm]</i>
B	<i>Breite</i>
cm	<i>Centimeter</i>
CM	<i>Calciumcarbid-Messung</i>
cm ³	<i>Kubikcentimeter</i>
d	<i>Probenhöhe [mm], Achsenabschnitt auf Y-Achse</i>
F _c	<i>Bruchlast bei Druckfestigkeitsprüfung [N]</i>
F _f	<i>Bruchlast beim Biegezugfestigkeitsversuch [N]</i>
g	<i>Gramm</i>
h	<i>Stunde</i>
H	<i>Höhe</i>
h ^{0,5}	<i>Wurzel aus Zeiteinheit</i>
J	<i>Joule</i>
k	<i>Steigung einer Geraden</i>
K	<i>Kelvin</i>
kg	<i>Kilogramm</i>
KRL	<i>korrespondierende relative Luftfeuchte</i>
l	<i>Achsabstand der Auflagerrollen beim Biegezugfestigkeitsversuch [mm]</i>
L	<i>Länge</i>
m	<i>Meter</i>
M1	<i>Feuchtmasse</i>
m ²	<i>Quadratmeter</i>
m ³	<i>Kubikmeter</i>
M3	<i>Trockenmasse</i>
mg	<i>Milligramm</i>
min	<i>Minute</i>
ml	<i>Milliliter</i>
mm	<i>Millimeter</i>

N	Newton
p	<i>Partialdruck des Wassers [Pa]</i>
P1-ü	<i>Probe 1 über dem Heizungsrohr</i>
P1-z	<i>Probe 1 zwischen den Heizungsrohren</i>
P2-ü	<i>Probe 2 über dem Heizungsrohr</i>
P2-z	<i>Probe 2 zwischen den Heizungsrohren</i>
Pa	<i>Pascal</i>
$p_s(T)$	<i>Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur [Pa]</i>
PVC	<i>Polyvinylchlorid</i>
R_c	<i>Druckfestigkeit [N/mm²]</i>
R_f	<i>Biegezugfestigkeit [N/mm²]</i>
RH20	<i>Gaskonstante für Wasser [462 J/kgK]</i>
s_d	<i>Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]</i>
sec	<i>Sekunde</i>
T	<i>absolute Temperatur [K]</i>
u	<i>absolute Luftfeuchtigkeit [kg/m³]</i>
u_f	<i>freier Wassergehalt</i>
u_m	<i>massenbezogener Wassergehalt [%]</i>
u_v	<i>volumenbezogener Wassergehalt [%]</i>
w	<i>Wassergehalt [%]</i>
W/B-Wert	<i>Wasserzementwert</i>
W_w	<i>Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²*h^{0,5}]</i>
ϑ	<i>Temperatur [°C]</i>
φ	<i>relative Luftfeuchtigkeit [%]</i>
κ_0	<i>Minimalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m²/h]</i>
κ_F	<i>Maximalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m²/h]</i>
ρ_w	<i>Dichte des Wassers [$\rho_w = 1000$ kg/m³]</i>

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung.....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Relevanz des Themas	1
1.2 Wissenschaftliche Fragestellung.....	1
1.3 Herangehensweise an die Untersuchungen	1
2 Grundlagen.....	2
2.1 Estrich.....	2
2.1.1 Definition.....	2
2.1.2 Arten und Einsatzbereiche.....	2
2.2 Hygrische Größen und hygrisches Verhalten	7
2.2.1 Wasserdampfpartialdruck.....	7
2.2.2 Sättigungsdampfdruck.....	8
2.2.3 Relative Luftfeuchtigkeit.....	8
2.2.4 Baufeuchte und Sorptionsisotherme	8
2.3 Messmethoden für Feuchtigkeit im Estrich.....	11
2.3.1 CM-Methode	11
2.3.2 Darr-Methode	13
2.3.3 KRL-Methode	14

2.3.4	Belegereife und zulässige Werte.....	16
2.4	Verformungsverhalten	16
2.4.1	Randverformungen	16
3	Empirischer Teil.....	19
3.1	Probenherstellung.....	19
3.1.1	Material und Werkzeug	19
3.1.2	Rezeptur.....	23
3.2	Frischbetonkennwerte	25
3.2.1	Konsistenz.....	25
3.2.2	Rohdichte des Frischestrichs	26
3.3	Untersuchungen am erhärteten Estrich.....	26
3.3.1	Biegezug- und Druckfestigkeiten.....	27
3.3.2	Wasserdampfdiffusionswiderstand	32
3.3.3	Saugversuch	35
3.3.4	Feuchtigkeitsmessungen anhand einer Probe.....	38
3.4	Hauptversuch Trocknungsverhalten von Heizestrich nach Belagsverlegung.....	43
3.4.1	Temperaturverlauf in den Heizestrichproben.....	45
3.4.2	Trocknungsverhalten der Heizestrichproben.....	50
4	Zusammenfassung	59
4.1	Wichtigste Ergebnisse und Antwort auf die Forschungsfrage.....	59
4.2	Ausblick	60
	Literaturverzeichnis	61
	Abbildungsverzeichnis	63
	Tabellenverzeichnis	65

Diagrammverzeichnis	66
Anhang.....	67

1 Einleitung

1.1 Motivation und Relevanz des Themas

Bei nahezu allen Bauvorhaben im Hochbau kommt heutzutage ein Estrich als Unterlage für den späteren Bodenbelag zum Einsatz. Damit ist nicht nur die technisch einwandfreie Ausführung in Hinblick auf Mischverhältnis, Aufbau und Einbringung von großer Bedeutung, sondern auch die Trocknungsphase und das Erreichen der Belegereife. Die Austrocknungsphase steht immer in direktem Konflikt mit den nachkommenden Ausbaugewerken, da diese mitunter weitere Feuchtigkeitsquellen im Neubau darstellen und der Fokus jedoch auf die Trocknung des Estrichs zu legen ist. Eine gute Planung und das Wissen über das Verhalten der Feuchtigkeit im Estrich vor und nach der Belagsverlegung, ist für die Einhaltung des Bauzeitplanes von wesentlicher Relevanz. Aus dieser Motivation heraus habe ich mich der Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Heizestrichen vom Einbau bis nach Belagsverlegung angenommen, um detaillierte Rückschlüsse auf die Feuchtigkeitsverteilung von Heizestrichen in Bezug auf den zeitlichen Verlauf ziehen zu können.

1.2 Wissenschaftliche Fragestellung

Im Zuge der gegenständlichen Diplomarbeit wurde das Trocknungsverhalten von Heizestrichen anhand von Versuchen im Labor unter festgelegten klimatischen Bedingungen beobachtet. Dabei ging es darum, die Feuchtigkeitsveränderung über die Estrichstärke während der Trocknungsphase, sowohl vor als auch nach der Belagsverlegung anhand aufgezeichneter Werte festzustellen und grafisch, mithilfe von Diagrammen, zu veranschaulichen. Insbesondere bei Heizestrichen, die bezüglich Feuchtigkeit kritisch zu betrachten sind, gibt es bisher nur praktische Erfahrungen und sich daraus ableitende Richtlinien, aber keinerlei wissenschaftliche Messwerte.

1.3 Herangehensweise an die Untersuchungen

Die Untersuchung erfolgte an zwei im Labor hergestellten Zementestrichplatten mit den Abmessungen 0,664 x 0,664 x 0,075 m (L x B x H). Die Proben wurden in einer Klimakammer mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % zum Trocknen gelagert, wobei nach 25 Tagen die Fußbodenheizung in Betrieb genommen wurde. Nach der ersten Ausheizphase wurde auf die Probe 1 ein Fliesenbelag und auf die Probe 2 ein Parkettbelag aufgebracht und das Trocknungsverhalten anhand eingebauter Sensoren aufgezeichnet. Die Kombination der verbauten Feuchtigkeits- und Temperatursensoren in den Proben sollten die Verläufe über die Estrichstärke von 7,5 cm dokumentieren und vor allem das Trocknungsverhalten nach der Belagsverlegung veranschaulichen.

2 Grundlagen

Für das bessere Verständnis der durchgeführten Haupt- und Nebenversuche, welche in Kapitel 3 näher beschrieben sind, werden in diesem Kapitel die Grundlagen zum Thema Estrich im Allgemeinen und in Hinblick zum physikalischen Verhalten der Feuchtigkeit im Baustoff erläutert. Weiters werden die Feuchtigkeitsmessmethoden nach heutigem Stand der Technik und aus der Feuchtigkeit resultierendes Verformungsverhalten von Estrichen näher beschrieben.

2.1 Estrich

2.1.1 Definition

„Als Estrich wird eine großflächige, fugenlose, harte Schicht bezeichnet, die auf einem tragenden Untergrund verlegt wird“. (1)

Im Zuge der Rohbauerrichtung ergeben sich in der tragenden Konstruktion gewisse Unebenheiten, welche vor der Verlegung des Endbelags beziehungsweise vor der Fertigstellung ausgeglichen werden müssen, um für den Endkunden ein qualitativ hochwertiges und funktionsfähiges Bauwerk zu schaffen. Estrich eignet sich bestens dafür diese Unebenheiten und Höhendifferenzen zu kompensieren und eine durchgehend tragfähige Schicht zu schaffen. Ein weiterer Aspekt ist die Verbesserung des Wärmeschutzes sowie des Trittschall- und Luftschallschutzes im weiteren Fußbodenaufbau. Dies wird durch den Einbau einer Trittschalldämmung und einer Schüttung unter dem Estrich, sowie durch die Schallentkoppelung im Bereich der Wände mittels Randdämmstreifen erreicht. Beim Heizestrich können die Fußbodenheizungsrohre direkt im Estrich eingebettet werden, was dazu führt, dass die Wärmeverteilung effizienter und gleichmäßiger erfolgt, als wenn die Rohre in einer getrennten Ebene verlegt werden. (1)

2.1.2 Arten und Einsatzbereiche

Die Einteilung von Estrichen kann nach vier Kriterien differenziert werden:

- Beheizter und unbeheizter Estrich
- Nutz- oder Unterlagsestrich
- Verlegeart
- Bindemittel

Beheizte oder unbeheizte Estriche

Bereits zur Zeit der Römer haben die Menschen die Vorteile einer Fußbodenheizung erkannt und umgesetzt. Damals wurden die Decken auf Ziegelsäulen aufgeständert, damit unter dem Boden luftgeführte Hohlräume entstehen. Die Luft wurde mit in der Nähe liegenden Öfen erhitzt und

beheizte durch Zirkulation die darüber liegenden Räume. Ein Nachbau aus damaliger Zeit kann in der Ausgrabungsstätte Carnuntum besichtigt werden. (Abbildung 1)



Abbildung 1: Römische Fußbodenheizung in der Ausgrabungsstätte Carnuntum

In der heutigen Zeit wird die Fußbodenheizung durch Warmwasser geführte Leitungen oder durch elektrische Heizmatten im Fußbodenaufbau betrieben. Je nach Ausführungsvariante ist die Fußbodenheizung in der Estrichebene, in einer Ebene darunter oder darüber angeordnet.

In der gegenständlichen Diplomarbeit wurde, die heute am meisten verwendete Konstruktion, ein Heizestrich mit Warmwasser geführten Leitungen, welche im Estrich eingebettet sind, untersucht.

Nutz- und Unterlagsestriche

Der Nutzestrich wird nach dem Erhärten direkt ohne Belag verwendet und kommt hauptsächlich im Gewerbe und in der Industrie zum Einsatz. (1)

Im Gegensatz dazu steht der Unterlagsestrich, welcher nach Erreichen der Belegereife mit einem Endbelag, beispielsweise Holz oder Feinsteinzeug, überdeckt wird. Das Erreichen der Belegereife spielt dabei die entscheidende Rolle, auf welche in Kapitel 2.3.4 näher eingegangen wird.

Verlegeart

- **Estrich auf Trennlage** ist ein gleitender Estrich. Das bedeutet der Estrich liegt vollflächig auf dem Untergrund auf, ist jedoch durch eine Trennlage beispielsweise mit einer Polyethylen-Gleitfolie von dieser entkoppelt. Der Vorteil liegt darin, dass sich der Estrich auf Trennlage unabhängig von der Rohdecke verformen kann. Als Einsatzbereiche gelten

Unterkonstruktionen, welche biegebeansprucht werden oder bei vorhandenen Abdichtungsebenen, welche durch die Trennlage zu schützen sind. (Abbildung 2)

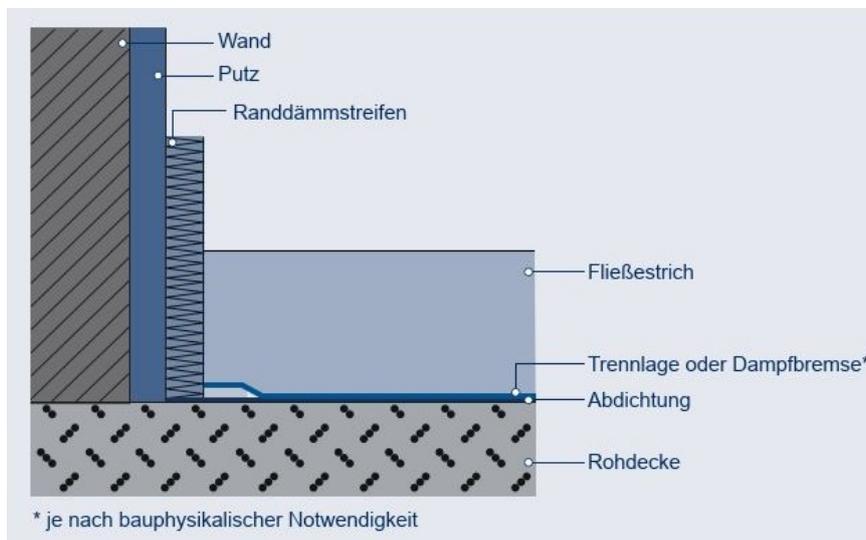


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Estrichs auf Trennlage (2)

- **Verbundestriche** sind im Gegensatz zum Estrich auf Trennlage vollflächig kraftschlüssig mit dem Untergrund verbunden. Eine Verlegung kann „frisch auf frisch“ erfolgen, bevor die Decke ausgehärtet ist. Erfolgt die Verlegung auf einen älteren Untergrund, ist darauf zu achten, dass die Haftbrücke zwischen den beiden Schichten gegeben ist. Dabei ist ein Kugelstrahlen der Decke oder das Aufbringen einer Haftemulsion notwendig. (Abbildung 3)

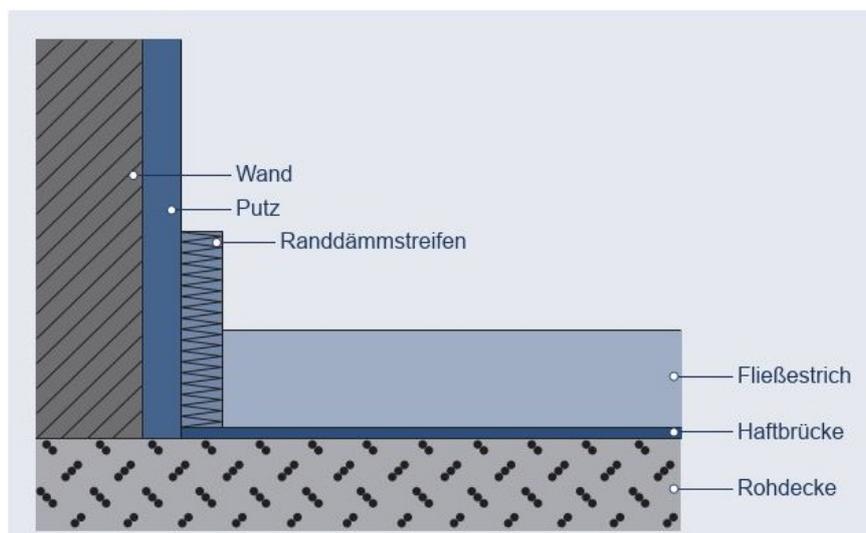


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Verbundestrichs (2)

- Ein **schwimmender Estrich** zeichnet sich durch die Entkoppelung vom Untergrund mittels einer Trittschalldämmplatte und von den aufgehenden Wänden mittels

Randdämmstreifen aus. Die Trittschalldämmplatte hat spezifische Eigenschaften in Hinblick auf Belastbarkeit, Stärke und Schallschutz zu erfüllen. (Abbildung 4)

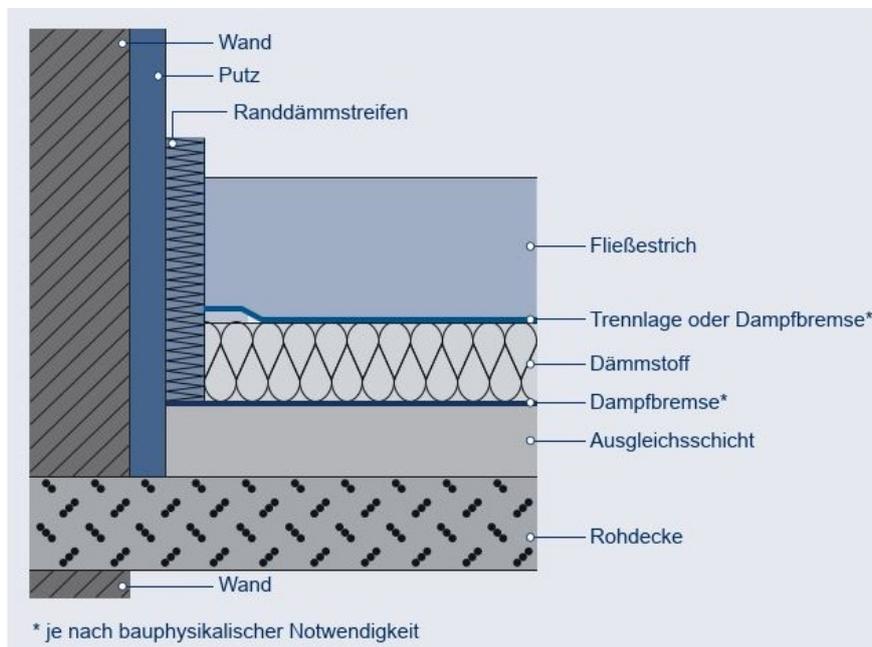


Abbildung 4: Schematische Darstellung des schwimmenden Estrichs (2)

- **Ein Trockenestrich** ist ein Fertigteilestrich, welcher bereits auf einer Dämmschicht aufgebracht ist. Er bringt den Vorteil mit sich, dass keine zusätzliche Feuchtigkeit in das Bauwerk eingebracht wird und im Bauzeitplan keine zusätzlichen Trocknungszeiten vorzusehen sind. Die einzelnen Platten werden kraftschlüssig miteinander verbunden. Diese Verlegeart kommt häufig in der Sanierung zur Anwendung. (1)

Bindemittel

- **Zementestriche** bestehen aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen sowie Zusatzmitteln. Zement ist ein mineralisches, hydraulisches Bindemittel und bindet unter Wasserzugabe ab. Es ist maßgeblich den Zementgehalt zu optimieren, um das Schwinden des Estrichs so gering wie möglich zu halten. Das Schwindmaß kann auch durch Zugabe von Fließmitteln, Optimierung der Zuschlagskörnung, des W/B-Wertes und der Fugenteilung maßgeblich positiv beeinflusst werden. Zementestriche zeichnen sich durch eine gute Feuchtigkeitsbeständigkeit und Brandbeständigkeit aus und eignen sich dadurch auch für die Verlegung in Nassräumen und in bewitterten Bereichen. In bewitterten Bereichen ist darauf zu achten, dass die verwendeten Zuschlagstoffe frostbeständig sind. Zementestriche trocknen eher langsam und es dauert daher eine gewisse Zeit, bis der Feuchtigkeitsgehalt so weit reduziert ist, dass der Belag bedenkenlos verlegt werden

kann. Dieser Sachverhalt wird in der gegenständlichen Diplomarbeit im Kapitel 3.4 näher untersucht. Das Austrocknen des Estrichs führt zum Schwinden. (1)

- **Calciumsulfatestriche**, auch als Anhydritestriche bezeichnet, bestehen aus Anhydritbinder (wasserfreier Gips), Wasser und Zuschlagstoffen. Im Gegensatz zum Zementestrich weist der Calciumsulfatestrich ein sehr geringes Schwind- und Quellmaß auf. Aus diesem Grund können auch größere fugenfreie Flächen hergestellt werden. Die Trocknungsphase ist ebenfalls kürzer als beim Zementestrich. Allerdings ist die Feuchtigkeitsempfindlichkeit maßgeblich bei dieser Estrichart. Im Falle von Durchfeuchtung oder einer erhöhten Luftfeuchtigkeit über eine längere Periode kann es zu massiven Schäden wie beispielsweise Festigkeitsverlust kommen, da der Anhydritbinder wasserlöslich ist. Demzufolge ist der Einsatz solcher Estriche bei geforderter Feuchtigkeitsbeanspruchungsklasse W4 oder höher nicht möglich. Eingeschränkte Hitzebeständigkeit ist ein weiteres Merkmal des Anhydritestrichs. (1)
- **Magnesiaestriche** bestehen aus Magnesia, einer wässrigen Salzlösung und Füllstoffen. Als Füllstoffe kommen sowohl organische als auch anorganische Stoffe in Frage. Größere Flächen ohne Fugen können mit einem Magnesiaestrich ebenfalls hergestellt werden. Durch die Variation der Menge der Komponenten kann auch der E-Modul variiert werden. Als Nachteil dieser Estrichart ist dessen Feuchtigkeitsunbeständigkeit zu nennen. Daher ist auf aufsteigende Feuchtigkeit bei nicht unterkellerten Bauwerken besonders Acht zu geben. (1)
Das Schwindmaß des Magnesiaestrichs liegt etwa in der Größenordnung zwischen dem Schwindmaß des Zement- und Anhydritestrichs. (3)
- **Gussasphaltestriche** bestehen hauptsächlich aus Bitumen und Zuschlagstoffen und wird heiß (~ 200 °C) eingebracht. Die Estrichart ist wasser- und frostbeständig und kann daher sowohl in Bereichen mit erhöhter Feuchtigkeit als auch in frei bewitterten Bereichen verwendet werden. Es treten keine Quell- und Schwindverformungen auf. Der Gussasphaltestrich hat eine feuchtigkeitssperrende Funktion, jedoch nicht im Ausmaß einer klassischen Abdichtung oder einer Dampfbremse. Die Besonderheit dieses Estrichs ist die rasche Begehbarkeit in wenigen Stunden nach dem Einbringen. Bei der Planung des Gussasphaltestrichs sind Einzellasten und eventuelle Strahlungswärme zu berücksichtigen, da dadurch Verformungen verursacht werden können. Diese Estrichart verträgt sich nicht mit Ölen, Fetten und Benzin. (1)
- **Bitumenemulsionestriche** bestehen aus Zement, Bitumenemulsion, Sand und Splitt und kommen nur als Verbundestriche zum Einsatz. Er wird in einer Stärke von maximal 20 mm verbaut und muss vor schnellem Feuchtigkeitsverlust nach dem Einbau geschützt werden. Der Nachteil bei dieser Estrichart ist, ähnlich wie beim Gussasphaltestrich, die

Unverträglichkeit bei längerem Kontakt mit Ölen, Benzin und Temperaturen über 40 °C. (1)

- **Kunstharzmodifizierte Estriche** sind hauptsächlich mit Kunststoffdispersion angereicherte Zement- und Anhydritestriche. Dabei variiert die beigemischte Menge des Zusatzstoffes zwischen 5 und 30 % des Zementgehaltes. Diese Estrichart wird in geringen Schichtstärken ausgeführt. (1)
- **Kunstharzestriche** bestehen aus Bindemittel auf Reaktionsharzbasis beispielsweise ungesättigte Polyester-, Epoxid- und Polyurethanharze. Diese Estrichart wird hauptsächlich als Verbundestrich mit einer Schichtstärke zwischen 10 und 20 mm eingesetzt. (1)

2.2 Hygrische Größen und hygrisches Verhalten

Der Fokus bei der gegenständlichen Diplomarbeit liegt auf dem Trocknungsverhalten des Heizestrichs, wobei die physikalischen Größen in Bezug auf die Aufnahme beziehungsweise Abgabe der Feuchtigkeit von wesentlicher Bedeutung sind. Daher werden die wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge in Hinblick auf das hygrische Verhalten nachstehend erläutert.

2.2.1 Wasserdampfpartialdruck

Unsere Umgebungsluft ist ein Gasgemisch und besteht neben den Hauptbestandteilen Stickstoff und Sauerstoff unter anderem auch aus Wasserdampf, anders gesagt handelt es sich um Wasser im gasförmigen Aggregatzustand. Je nach Wasserdampfmenge differiert die Dichte der Luft, was dazu führt, dass die feuchtere Luft leichter ist und nach oben steigt. (4)

Betrachtet man den Wasserdampf pro Volumeneinheit spricht man von der absoluten Luftfeuchtigkeit. Dabei erzeugt der Wasserdampf Druck in der Atmosphäre, welcher in der Fachsprache als Wasserdampfpartialdruck bezeichnet wird. Die Berechnung erfolgt nach dem idealen Gasgesetz unter Einbeziehung der Gaskonstante für Wasser, der Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit. (Formel 1) (5)

$$p = u * RH_{20} * T = u * RH_{20} * (\vartheta + 273,15)$$

Formel 1: Partialdruck des Wasserdampfes in Pa

p	Partialdruck des Wasserdampfes [Pa]
u	absolute Luftfeuchtigkeit [kg/m ³]
RH ₂₀	Gaskonstante für Wasser = 462 J/kgK
T	absolute Temperatur [K]
ϑ	Temperatur [°C]

2.2.2 Sättigungsdampfdruck

Die Luft kann je nach Temperatur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen. Es gilt, dass wärmere Luft eine größere Menge an Wasserdampf aufnehmen kann. Wenn die maximale Kapazität erreicht bzw. überschritten wird, bildet sich Kondensat und der überschüssige Anteil des Wasserdampfes wechselt in den flüssigen Aggregatzustand.

Dabei beschreibt der Sättigungsdampfdruck die maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge als Funktion der Temperatur. In der Literatur findet man Tabellen, die den Sättigungsdampfdruck unter Angabe von Temperatur in Zehntel-Grad-Schritten angeben. Beispielsweise beträgt der Sättigungsdampfdruck bei 20 °C 2342 Pa und bei 30 °C 4249 Pa. (5)

2.2.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur. Man könnte auch sagen, es ist das Verhältnis zwischen der Menge des vorliegenden Wasserdampfes in der Luft zu der mengenmäßigen Aufnahmekapazität an Wasserdampf der Luft bei derselben Temperatur. (Formel 2) (5)

$$\varphi = \frac{p}{p_s(T)} * 100 [\%]$$

Formel 2: relative Luftfeuchtigkeit in %

- φ relative Luftfeuchtigkeit [%]
- p Partialdruck des Wasserdampfes [Pa]
- $p_s(T)$ Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur [Pa]

2.2.4 Baufeuchte und Sorptionsisotherme

Baustoffe und dadurch auch Bauteile, die eine offenporige Struktur haben, neigen dazu in einem Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebungsluft zu stehen. Durch die Van-der-Waals Kräfte wird die Feuchtigkeit an den Porenwänden angelagert und je nach relativer Luftfeuchtigkeit gespeichert oder wieder abgegeben. Dabei sind Baustoffe, die nicht allzu dicht sind, natürlich aufnahmefreudiger für Feuchtigkeit gegenüber anderen mit weniger Poren und Kapillaren. Metall ist ein Beispiel für einen Baustoff, der keinen Wasserdampf in die Struktur aufnimmt. Sollten offenporige Baustoffe über einen längeren Zeitraum zu viel Feuchtigkeit ausgesetzt sein, kann es höchstwahrscheinlich zu Schäden in Form von Abnahme der Stabilität und Funktionalität sowie zu Bakterien- und Pilzbefall kommen. (6)

Daher ist es essenziell, vor allem die Baufeuchte, welche im Zuge der Bauwerkerrichtung entsteht, zu beobachten und mit entsprechenden Maßnahmen und angemessenen Trocknungszeiten aus der Konstruktion zu bringen beziehungsweise auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren. Vor allem durch das Einbringen von Estrichen wird eine enorme Menge an Feuchtigkeit ins Bauwerk eingeschleust. Es erfordert eine gewisse Praxiserfahrung und Fachwissen des Baustellenteams diese Feuchtigkeit zu beseitigen und dadurch das Risiko für Folgeschäden auf ein Minimum zu reduzieren.

Generell kann man den Eintritt von freier Feuchtigkeit in flüssiger oder gasförmiger Form im Groben durch vier Arten unterscheiden.

- **Zugegebenes Wasser im Baustoff**, welches für die Verarbeitung notwendig ist. Im konkreten Beispiel wird der Sand und Estrichzement mit Wasser vermischt und verbaut. Dieses Wasser muss in späterer Folge aus dem Bauteil entweichen, um den Bodenbelag aufbringen zu können. Eine gewisse Restfeuchtigkeit verbleibt jedoch im Bauteil. Darauf wird allerdings später noch eingegangen.
- **Diffusion** ist der Feuchtigkeitsaustausch in Form von Wasserdampf, der durch die Bauteile hindurch erfolgt. Dieser lässt sich nur mithilfe von z.B. Dampfsperren verhindern. Die bauphysikalische Erklärung zur Diffusion ist die Druckdifferenz zwischen der Umgebungsluft auf der einen und auf der anderen Seite eines Bauteils. Als klassisches Beispiel dafür dienen Außenwände oder Dächer.
- **Konvektion** ist der Transport von Wasserdampf durch einen Luftstrom bei undichten Stellen in der Konstruktion, durch welche ein Kondensat auf der kälteren Bauteilseite auftreten kann. Die Ansammlung von Kondensat kann längerfristig die Bausubstanz massiv schädigen. Der transportierende Luftstrom hängt im Wesentlichen von der Luftdruckdifferenz zwischen Außen- und Innenraum sowie von der Luftdichtheit des Bauteils ab. (7)

Die Kenngröße für Baustofffeuchtigkeit ist zum einen der massenbezogene und zum anderen der volumenbezogene Wassergehalt und lässt sich mit Formel 3 berechnen. (5)

Unter der Masse und dem Volumen für die Berechnung des Wassergehaltes von Baustoffen versteht man die Masse beziehungsweise das Volumen des im Stoff vorhandenen Wassers im Verhältnis zu Masse beziehungsweise Volumen des bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Stoffes. Im Falle, dass ein Baustoff mehr Wassermasse als Trockenmasse hat, spricht man von einem Feuchtegehalt von über 100 %. (6)

$$u_m = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des trockenen Stoffes}} * 100 \quad u_v = \frac{\text{Volumen des Wassers}}{\text{Volumen des trockenen Stoffes}} * 100$$

Formel 3: massenbezogener und volumenbezogener Wassergehalt in %

u_m massenbezogener Wassergehalt [%]

u_v volumenbezogener Wassergehalt [%]

Mithilfe der Dichte des Wassers und der Rohdichte des Stoffes ist eine Umrechnung von volumenzu massenbezogenem Wassergehalt möglich. (Formel 4) (5)

$$u_m = \frac{\text{Dichte des Wassers}}{\text{Rohdichte des Stoffes}} * u_v$$

Formel 4: Umrechnung von volumenbezogenen auf massenbezogenen Wassergehalt

Wie bereits erwähnt, findet ein Feuchtigkeitsaustausch des Baustoffes mit seiner Umgebungsluft statt, bei dem ein Gleichgewichtsbestreben herrscht. Das bedeutet, dass je größer die relative Luftfeuchtigkeit ist, desto mehr Wasserdampf wird im Baustoff aufgenommen und umgekehrt. Der Wassergehalt, welcher sich im Gleichgewichtszustand einstellt, wird als Gleichgewichts- oder Ausgleichsfeuchte bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur lässt sich mit einer Funktion für jeden Baustoff darstellen und wird als Sorptionsisotherme bezeichnet. (Abbildung 5) (5)

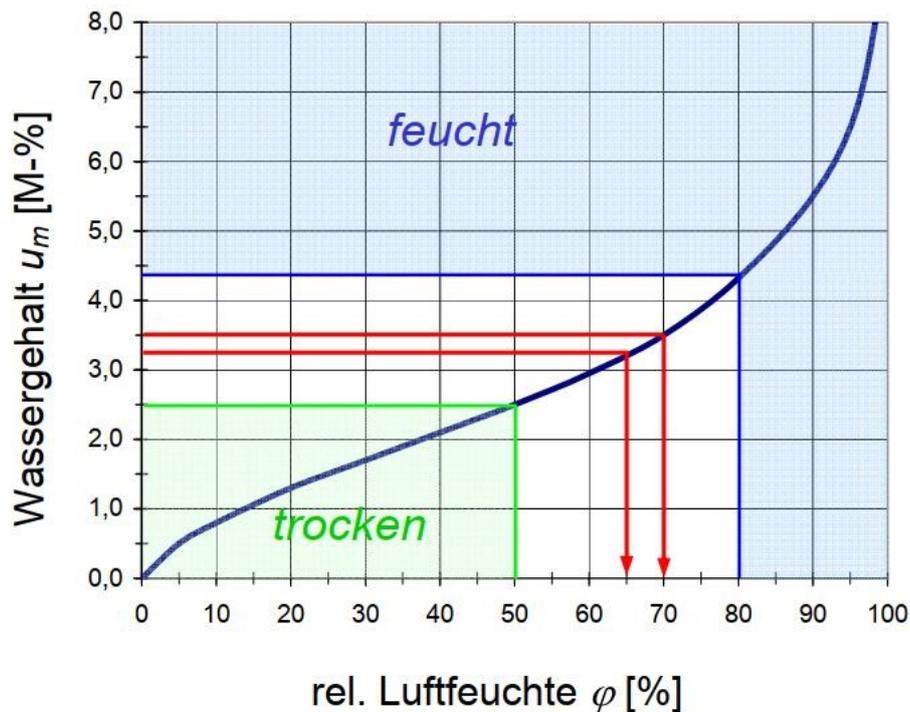


Abbildung 5: Sorptionsisotherme für Zementestriche (8)

2.3 Messmethoden für Feuchtigkeit im Estrich

Um die Belegereife zu bestimmen, ist nach der Austrocknungsphase des eingebauten Estrichs der Feuchtigkeitsgehalt anhand einer Messung festzustellen. Nach heutigem Stand der Technik wird zwischen zerstörungsfreien Messmethoden, wie beispielsweise der Denzel- und der Caisson-Methode, und zerstörenden Messmethoden, wie beispielsweise der Darr-, CM- und KRL-Methode, unterschieden. In den nachstehenden Kapiteln werden die zerstörenden Messmethoden näher erläutert und die verwendete Messmethode in der gegenständlichen Diplomarbeit genauer beschrieben. Generell ist festzuhalten, dass in der Praxis vor Belagsverlegung zwingend eine Feuchtigkeitsmessung durchzuführen ist und die Ergebnisse zu protokollieren sind.

2.3.1 CM-Methode

Die Calciumcarbid-Methode ist heutzutage die am häufigsten angewendete Feuchtigkeitsmessmethode auf der Baustelle. Sie hat sich aufgrund der unkomplizierten und raschen Durchführung etabliert. Jedoch gibt es auch etliche Kritikpunkte dieser Messmethode, wie zum Beispiel die Manipulationsanfälligkeit und die große Streuung der Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Estrichen. Um ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten, ist eine erhöhte Sorgfalt bei der Durchführung der Methode erforderlich.

Vor Messbeginn ist das CM-Messgerät auf Funktionstüchtigkeit zu überprüfen. Die Prüfung erfolgt, indem man in die CM-Druckflasche die vom Hersteller mitgelieferten Stahlkugeln und eine Ampulle mit 1 ml Wasser hineingibt und die Flasche nach dem Verschließen schüttelt. Etwa 10 min danach sollte auf dem Manometer, welches auf der CM-Druckflasche angebracht ist, ein Druck von $1,00 \pm 0,05$ bar bei einer Temperatur zwischen 18 °C und 20 °C angezeigt werden. Sollte dies nicht der Fall sein ist eventuell die Dichtung oder das Manometer defekt. Das CM-Messset ist auf Abbildung 6 zu sehen. (9)

Beim Einbringen des Heizestrichs sollten im Zuge der Betonage die späteren Messstellen mit Hilfe von kleinen, herausstehenden, einbetonierten Markierungen gekennzeichnet werden, um eventuelle Beschädigungen der Fußbodenheizungsleitungen bei der Probeentnahme zu vermeiden. Generell sollten repräsentative Stellen für die Feuchtigkeitsuntersuchungen herangezogen werden, beispielsweise mittig im Raum und über das Geschoss verteilt.

Die Messdurchführung erfolgt, indem man an der gekennzeichneten Stelle mit einem Meißel und einem Hammer den Estrich bis zur Polyethylen-Folie aufbricht und aus der unteren Estrichhälfte eine Probe entnimmt. Anschließend wird je nach Estrichart, in unserem Fall bei Zementestrich 20 g bzw. 30 g der Probe in einer Schüssel zerkleinert und eingewogen. In die CM-Druckflasche werden nun die Probe, die Stahlkugeln und eine mit Calciumcarbid gefüllte Glasampulle

hineingegeben und dicht verschlossen. Durch kräftiges Schütteln wird die Glasampulle durch die Stahlkugeln zerschlagen und eine chemische Reaktion zwischen der Restfeuchtigkeit im Estrichgut und dem Calciumcarbid wird ausgelöst. Es entsteht das Gas Azetylen. Nach 10 Minuten wird der entstandene Druck in der Flasche am Manometer abgelesen. Mit dem abgelesenen Druck und der Einwaage wird der Wassergehalt anhand einer Umrechnungstabelle (Tabelle 1) ermittelt. Zwischen den einzelnen Werten in der Tabelle 1 ist eine lineare Interpolation zulässig. (9)

Tabelle 1: Umrechnungstabelle CM-Messung

Druck am Manometer [bar]	Einwaage					
	100 g	50 g	20 g	10 g	5 g	3 g
	Wassermenge in %					
0,20	0,19	0,38	0,90	1,90	3,80	6,30
0,30	0,28	0,58	1,50	2,90	5,80	9,70
0,40	0,38	0,78	2,00	3,90	7,80	13,00
0,50	0,47	0,98	2,50	4,90	9,80	16,30
0,60	0,57	1,18	3,00	5,90	11,80	19,70
0,70	0,66	1,37	3,50	6,90	13,80	23,00
0,80	0,76	1,57	4,00	7,00	15,80	26,30
0,90	0,85	1,76	4,50	8,90	17,80	29,70
1,00	0,95	1,96	5,00	10,00	19,90	33,10
1,10	1,05	2,16	5,50	11,00	21,90	36,50
1,20	1,14	2,35	6,00	12,00	23,90	39,90
1,30	1,23	2,55	6,50	13,00	26,00	43,30
1,40	1,33	2,74	7,00	14,00	28,00	46,70
1,50	1,42	2,94	7,50	15,00	30,00	50,00

Der Kritikpunkt an dieser Messmethode ist hauptsächlich die leichte Manipulierbarkeit der Ergebnisse bei unsorgfältigem Umgang mit dem Messgerät. Beispielsweise kommen deutlich höhere Werte heraus, wenn man die Kugeln mit angefeuchteten Fingern berührt. Weiters muss auch auf das ausreichende Schütteln und die Wartezeit bei der Messung geachtet werden. Die Menge und die Körnung des Carbids können auch unterschiedlich sein und sich auf das Messergebnis auswirken.



Abbildung 6: CM-Messgerät und Manometer

In der gegenständlichen Diplomarbeit findet man im Kapitel 3.3.4 die Auswertung der CM-Messung, der Darr-Messung sowie der KRL-Messung für die Probe Nr. 3, um eine Korrelation zwischen den Messwerten der verschiedenen Messmethoden herzustellen.

2.3.2 Darr-Methode

Bei der Darr-Methode handelt es sich um die Feuchtigkeitsbestimmung anhand einer Trocknung in einem Trockenofen. Es ist ein gravimetrisches Verfahren, sprich man ermittelt eine Stoffmenge, in dem Fall die Wassermenge, durch Bestimmung der Masse durch das Wiegen. Für die Durchführung wird eine Probe aus der unteren Hälfte des Estrichs entnommen, bevorzugterweise mittels eines Meißels und eines Hammers, da die Wärmeentwicklung durch die Probeentnahme so klein wie möglich gehalten werden soll, damit die Feuchtigkeit entsprechend erhalten bleibt. Das entnommene Estrichgut muss sofort in einem luftdichten Behälter verschlossen werden und bis zum Trockenofen transportiert werden.

Die Zementestrichprobe wird anschließend in einen Messbecher gegeben, dessen Gewicht vorab bestimmt werden muss. Die gewogene Estrichprobe wird im Trockenofen bei 105 °C bzw. 50 °C gedarrt, bis sie die Gewichtskonstanz erreicht hat. Das bedeutet, dass die Gewichtsabnahme unter 0,1 % innerhalb von 24 Stunden beträgt. Die Konstanz wird durch wiederholtes Wiegen in bestimmten Zeitabständen festgestellt. Anschließend kann der Feuchtigkeitsgehalt anhand der Formel 5 aus Kapitel 3.1.2 errechnet werden. Abbildung 7 zeigt die Messbecher mit der Probe im Trockenofen.

Die Darr-Methode liefert bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C um 1,0 % – 1,7 % höhere Messwerte als die CM-Methode. Diese prozentuellen Abweichungen können bei diversen Estricharten noch weiter streuen.

Die Kritikpunkte an dieser Messmethode sind der größere Aufwand im Vergleich zur CM-Methode und die längere Auswertungsdauer durch den Trocknungsvorgang im Ofen sowie die Verfälschung des Ergebnisses bei sorgloser Lagerung der Probe.



Abbildung 7: Darrvorgang im Zuge der Feuchtigkeitsmessung an der Probe Nr. 3

2.3.3 KRL-Methode

Die Methode zur Messung der korrespondierenden relativen Luftfeuchte (KRL) eignet sich besonders gut bei unbekannter Zusammensetzung des Estrichs. Das Prinzip bei der Messung beruht darauf, dass die unmittelbare Umgebungsluft mit dem Probekörper einen Gleichgewichtszustand anstrebt. Die Feuchtigkeit des Probekörpers wird an die Umgebungsluft abgegeben beziehungsweise aus der Umgebungsluft aufgenommen bis sich die Ausgleichsfeuchte einstellt.

Dabei wird Stemmgut aus der unteren Hälfte des Estrichs entnommen und auf eine Körnung unter 8 mm zertrümmert. Anschließend wird die Probe mit einem Temperatur- und Feuchtesensor in einen Beutel oder Behälter gegeben. Der Behälter ist luftdicht zu verschließen. Der Vorteil bei der KRL-Methode ist, dass kein genaues Abwiegen notwendig ist, außer man wendet eine Kombination aus der KRL- und CM-Methode an, dann sollte man gleich die richtige Menge einwiegen, welche schließlich auch bei der CM-Messung benötigt wird. Diese Messmethode lässt

Rückschlüsse auf die Richtung des Feuchtigkeitsflusses zu, da diese immer vom feuchteren zum trockeneren Bereich fließt.

Nach einer 30-minütigen Wartezeit, in der sich die Probe und die Luft im Behälter an die Raumlufttemperatur angepasst haben und sich ein Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Probe und der Luft im Behälter eingestellt hat, kann der Wert abgelesen werden. Sollte sich der Messwert innerhalb von 3 Minuten um nicht mehr als $\pm 1\%$ geändert haben, kann man die Messung als abgeschlossen betrachten. Wichtig ist, dass während der Messung der Beutel samt Inhalt nicht direkter Wärmestrahlung oder Zugluft ausgesetzt ist. Auf Abbildung 8 ist der Behälter mit einer Estrichprobe und dem Feuchtigkeitssensor zu sehen.



Abbildung 8: KRL Messung in einem Plastikbehälter an der Probe Nr. 3

Ein Nachteil der Anwendung der KRL-Methode in der Praxis ist die unterschiedliche Temperatur, das fehlende Normenwerk, die fehlende Messvorschrift oder einheitliche Grenzwerte für den deutschsprachigen Raum. (10)

Beim Hauptversuch der gegenständlichen Diplomarbeit wurde die Feuchtigkeit in den Estrichplatten anhand von Sensoren gemessen, welche eine Gleichspannung aufzeichnen, die dann basierend auf der KRL-Methode in die relative Luftfeuchtigkeit umgerechnet werden kann.

2.3.4 Belegereife und zulässige Werte

Der Begriff „belegereif“ wird in Kombination mit Unterlagsestrichen verwendet. Man spricht von einem belegereifen Estrich, wenn die Restfeuchtigkeit unter einem bestimmten Grenzwert liegt und daher ein Belag ohne Folgeschäden verlegt werden kann. Im Falle einer Belagsverlegung bevor die zulässigen Werte laut der CM-Messmethode in der Tabelle 2 erreicht sind, ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit Schäden zu rechnen. Dabei kann es sich sowohl um Verformungen des Estrichs als auch des Belages, einer Blasenbildung unter dem Fußbodenbelag oder der Ablösung des Verbundes zwischen Belag und Estrich handeln.

Tabelle 2: Zulässige Restfeuchtigkeitswerte für Zementestriche nach der CM-Messmethode

Zulässige Werte nach der CM-Messmethode	ÖNORM B 5236 (11)	ÖNORM B 3407 (12)
	Holzfußböden	Fliesen, Platten, Mosaik
Nicht beheizter Zementestrich	< 2,00 CM %	< 2,00 CM %
Beheizter Zementestrich	< 1,80 CM %	< 1,80 CM %

2.4 Verformungsverhalten

Die Ursachen für Verformungen von Bauteilen können verschiedenster Natur sein. Im gegenständlichen Kapitel ist die Verformung in Zusammenhang mit dem Trocknungsverhalten von Estrichen von zentraler Bedeutung. Daher wird diese Erscheinung nachfolgend genauer erörtert.

2.4.1 Randverformungen

Unter den Randverformungen versteht man das Aufwölben und das Absenken der Randbereiche einer schwimmend verlegten Estrichplatte. Diese Erscheinung kann die Folge von verschiedenen Ursachen sein, unter anderem auch, dass zementgebundene Baustoffe die Eigenschaft haben, im Zuge des Abbindens Wasser abzugeben und sich dadurch in horizontaler Richtung zu verkürzen. Dieser Vorgang wird in der Fachsprache als „Schwinden“ bezeichnet. Daher ist es erforderlich den Frischestrich in der ersten Zeit nach dem Einbringen - diese Phase wird in der Fachsprache als „Schutzzeit“ bezeichnet - gegen zu rasches Austrocknen zu schützen, damit das Schwindmaß so gering wie möglich gehalten wird. Eine einfache Maßnahme ist es, keine Zugluft durch offene Fenster und Türen aufkommen zu lassen. Das Schwindmaß wird ebenfalls durch die Rezeptur und

die Estrichstärke beeinflusst. Die erste Grafik in Abbildung 10 zeigt den Estrich im frisch eingebauten Zustand und damit als ebene Platte. Im Zuge der zu raschen Austrocknung kommt es zum Schwinden und in den Randbereichen zu konkaven Verwölbungen, wie die zweite Grafik bei Abbildung 10 darstellt. (3)

Estriche können nur einseitig austrocknen, da darunter meist eine Folie liegt, die ein Feuchtigkeitsgefälle entstehen lässt. Dieses Gefälle führt neben Schwinden auch zum Wölben der Randbereiche. Dem Ganzen steht das Eigengewicht des Estrichs gegenüber, was zur Folge hat, dass dickere Estrichplatten unter gleichen Bedingungen eine geringere Verwölbung erfahren. Ein Anteil der Verformung bildet sich zurück infolge weiterer Austrocknung im unteren Estrichbereich. Bei größeren bleibenden Randverformungen besteht die Möglichkeit, durch Befeuchtung der Oberfläche in den Randbereichen oder durch Lastaufbringung diesen entgegenzuwirken. Das Schwinden ist ein mehrjähriger Prozess und kann beim Estrich je nach Stärke ein Endschwindmaß von ca. 0,55 mm/m betragen. Je dünner der Estrich, desto höher das abgeklungene Schwindmaß innerhalb der ersten 28 Tage. (13)

Erwärmt man die Estrichplatte einseitig entsteht ein Temperaturgefälle, welches die gleichen Verformungen wie das Feuchtigkeitsgefälle auslöst. Wenn die Wärmequelle auf der Oberseite platziert ist, wird die Estrichplatte an den Rändern konkav und im Gegenzug bei einer Erwärmung von unten konvex verformt. Die Verformungen sind reversibel nach der Beendigung der Erwärmung. Bei diesen Vorgängen ist die Belastung auf die darunterliegende Dämmung zu berücksichtigen, da bei der Verformung die Eigenlastabtragung nicht mehr vollflächig, sondern über kleinere Auflagerbereiche über die Dämmung erfolgt. Die Dämmung erfährt dadurch eine höhere Belastung und daraufhin eine größere Kompression an diesen Stellen. Diese Erscheinung ist in der dritten und vierten Grafik der Abbildung 10 zu sehen. Unter den Umständen, dass bereits eine Randverformung vorliegt, kann diese durch Eigengewicht und Verkehrslast größer werden. (13)

Das Aufbringen eines Belags auf den Estrich kann ebenfalls als Ursache für eine Verformung genannt werden, da je nach Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungskoeffizient des Belags die Verformung des Estrichs behindert werden kann. Weiters wird das Feuchtigkeitsgefälle im Estrich beispielsweise durch einen dampfdichten Belag umgekehrt und führt, bei verfrühter Belagsverlegung, bevor sich die Ausgleichsfeuchte eingestellt hat, zu einer Austrocknung im unteren Bereich des Aufbaus und zu einer Feuchtigkeitsansammlung unter dem Belag. Erhebliche Schäden am Estrich und Belag sind die Folge. Die vierte Grafik bei Abbildung 10 zeigt, dass durch das Absenken des Randbereiches die elastischen Fugen zwischen Sockel und Belag aufreißen. (13)

Die Abbildung 9 zeigt anhand einer Systemskizze in welche Richtung sich der Diffusionsstrom bewegt und dass sich durch die nahezu dampfsperrende Wirkung des Belags, eine Tauebene unter dem Kleber bildet und die bereits erwähnten Schäden verursacht.

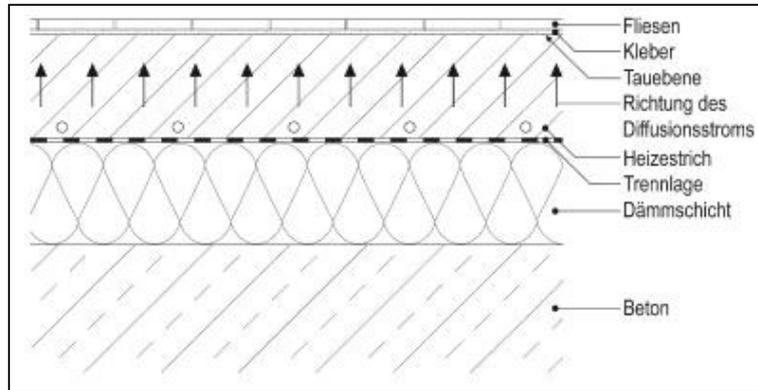


Abbildung 9: Richtung des Diffusionsstromes bei austrocknenden Heizstrichen (14)

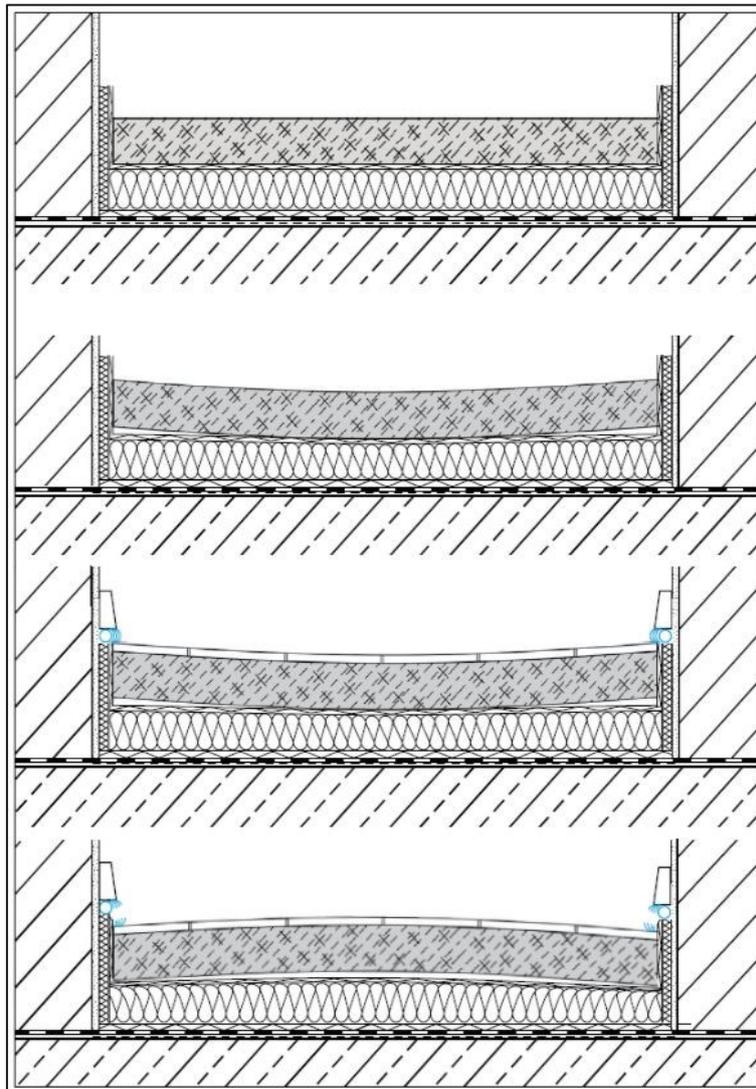


Abbildung 10: Vom Einbauzustand über Schwinden zu Schüsseln nach Belagsverlegung (15)

3 Empirischer Teil

Der empirische Teil dieser Diplomarbeit setzt sich aus dem durchgeführten Hauptversuch und sämtlichen Nebenversuchen zusammen. Im Hauptversuch wird das Trocknungsverhalten anhand von zwei Estrichflächen, von der Herstellung bis nach der Belegung mit unterschiedlichen Oberbelägen, untersucht. Die Nebenversuche setzen sich zusammen aus Untersuchungen am Frischestrich und an den erhärteten Estrichproben. Zuerst werden die Vorbereitungsarbeiten und die Versuchsanordnungen, sowie die verwendeten Rezepturen aufgezeigt. Im Anschluss wird mit der Versuchsdurchführung und Darstellung der Ergebnisse auf jeden Versuch einzeln eingegangen. Das Kapitel schließt ab mit der Beschreibung und Auswertung des Hauptversuches zum Trocknungsverhalten von Heizestrichen nach der Belagsverlegung.

3.1 Probenherstellung

Um das Trocknungsverhalten beim Heizestrich untersuchen zu können, wurden im Rahmen der Diplomarbeit ein Hauptversuch und sämtliche Nebenversuche am frischen als auch am erhärteten Estrich, wie in dem nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben, durchgeführt. Dafür war es erforderlich drei Zementestrich-Mischungen herzustellen. Für den Hauptversuch wurden zwei Estrichplatten mit Sensoren aus der Mischung 1 und 2 hergestellt und die Mischung 3 wurde für die Nebenversuche herangezogen. Alle Mischungen wurden im Labor des Instituts für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie der Technischen Universität Wien angerührt, wo dann auch die Versuche stattgefunden haben. Die dafür verwendeten Werkzeuge und die genaue Rezeptur für die jeweiligen Mischungen sind im nachstehenden Kapitel näher beschrieben.

3.1.1 Material und Werkzeug

Schalung und Fußbodenheizung

Die zwei für den Hauptversuch verwendeten Schalungen mit einer Größe von 70 x 70 x 10 cm (L x B x H) wurden auf einer externen Baustelle angefertigt und ins Labor gebracht. Die Schalung bestehend aus Schalungsplatten der Fa. DOKA mit einer Stärke von 2,7 cm wurde seitlich mit einer 1,8 cm starken Dämmung ausgekleidet. Die Abdichtung der Ichen der Schalung erfolgte mit Bausilikon. Abbildung 11 zeigt die einzelnen Komponenten für die Erstellung der Estrichplatten und die fertige Verarbeitung dieser.

Im Anschluss daran wurde eine Trittschalldämmplatte der Fa. KE KELIT mit einer Stärke von 2,5 cm verlegt, bei welcher es sich um ein Klettplattensystem handelte. Dabei ist auf die KM636

KELOX FB Klettplatte EPS-T 650 eine Klebe-Klettfolie aufgebracht, mit dessen Hilfe die Fußbodenheizungsrohre verlegt werden konnten, ohne dass eine zusätzliche Befestigung benötigt wurde. Bei den verlegten Fußbodenheizungsrohren handelte es sich um KMU 121K KELOX-ULTRAX FB Klettrohre.

Vor Beginn der Heizphase wurde der Heizkreis an das F25-HE Kälte-Umwälzthermostat der Fa. JULABO angeschlossen.

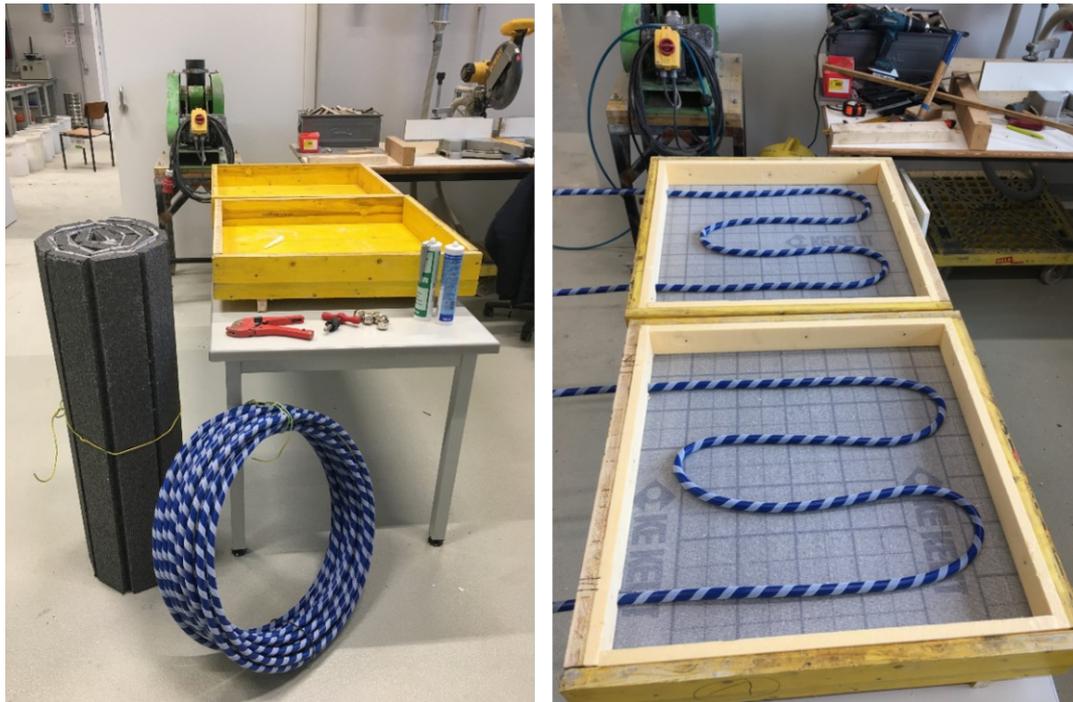


Abbildung 11: Schalungsherstellung für Hauptversuch

Messeinrichtung und Klimaschrank

In den beiden Estrichplatten wurden jeweils zehn Feuchtigkeits- und zehn Temperatursensoren installiert. Die Sensoren wurden kurz vor Versuchsbeginn an die Drähte, welche zur Messeinrichtung gehören, gelötet, nummeriert und auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft.

- Luftfeuchtigkeitssensoren: Fa. HONEYWELL, Typ HIH-4031 (Abbildung 15)
- Temperatursensoren: Thermoelement Typ K

Die Anordnung der Sensoren während des Versuches ist in Tabelle 3, auf Abbildung 12 und Abbildung 13 ersichtlich. Es wurden pro Probe jeweils 2 Blöcke zu je 5 Sensoren verwendet um den Trocknungsverlauf über mehrere Höhen im Aufbau direkt über dem Heizungsrohr sowie zwischen den Heizungsrohren messen zu können. Zu jedem Feuchtigkeitssensor wurde an der selben Stellen auch ein Temperaturfühler montiert. Alle 20 Minuten erfolgte eine automatische

Aufzeichnung der Werte in einer Excel-Tabelle. Abbildung 14 zeigt die Platzierung der Sensorenblöcke vor der Betonage.

Tabelle 3: Sensorenanordnung

Position des Sensorenblocks	Ausrichtung	Probe 1 - Fliesen		Probe 2 - Parkett		Sensorenhöhe im Aufbau von oben nach unten
		Nummerierung				
Estrichstärke 75 mm		Feuchte-sensor	Temperatur-sensor	Feuchte-sensor	Temperatur-sensor	
		P1-ü		P2-ü		
Über dem Heizungrohr	Probenoberseite	115	215	106	206	1,1 cm
		114	214	107	207	2,6 cm
		113	213	108	208	4,1 cm
		112	212	109	209	5,6 cm
	Probenunterseite	111	211	110	210	7,1 cm
		P2-z		P2-z		
Zwischen den Heizungrohren	Probenoberseite	120	220	105	205	1,1 cm
		119	219	104	204	2,6 cm
		118	218	103	203	4,1 cm
		117	217	102	202	5,6 cm
	Probenunterseite	116	216	101	201	7,1 cm

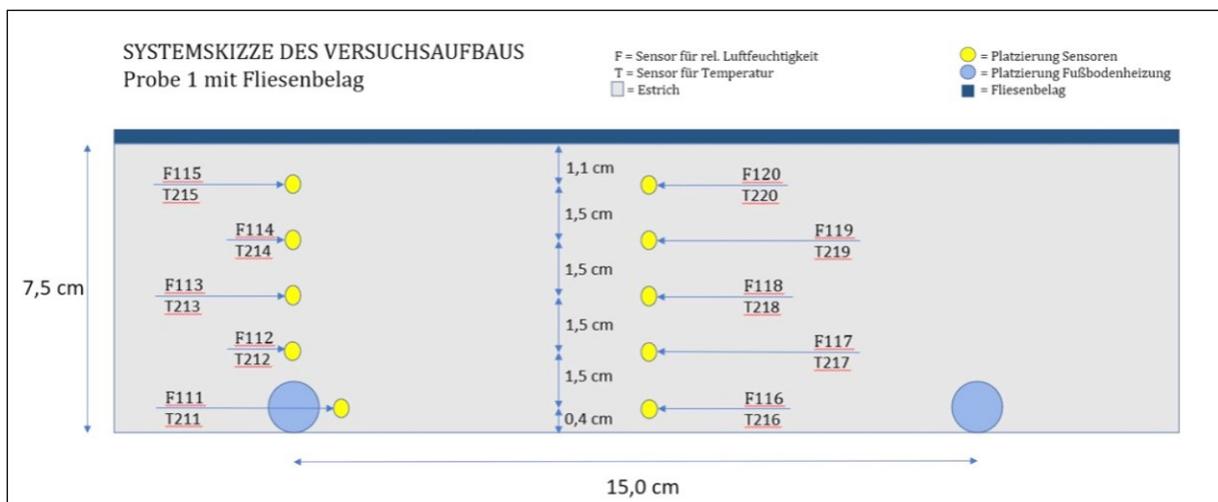


Abbildung 12: Systemskizze Probe 1

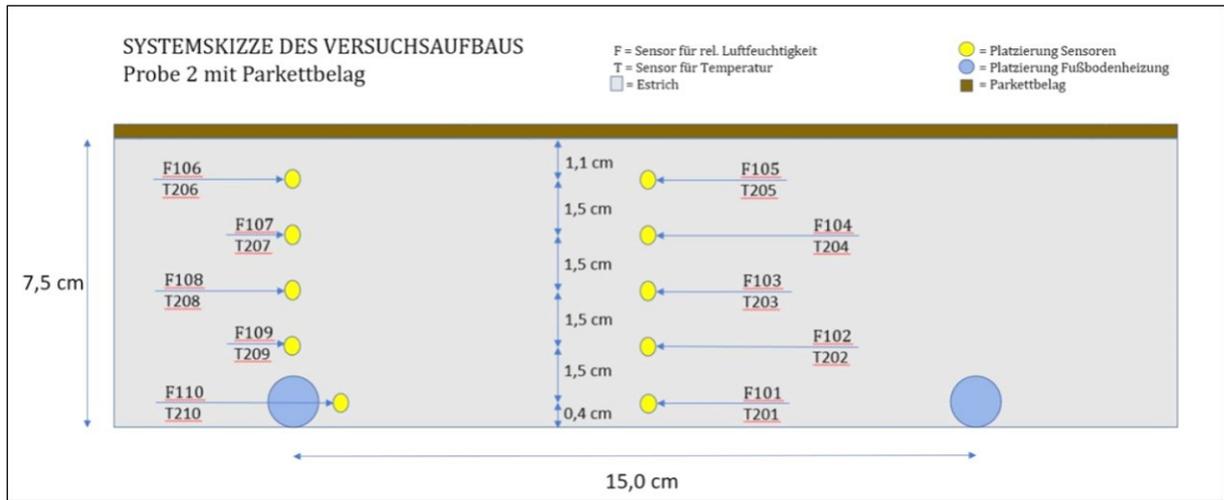


Abbildung 13: Systemskizze Probe 2

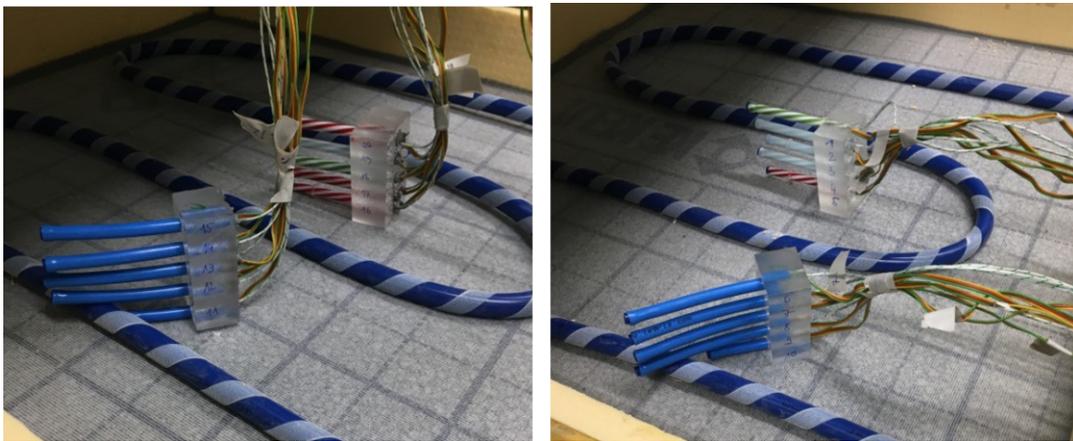


Abbildung 14: Sensorenanordnung in Probe 1 (links) und Probe 2 (rechts)

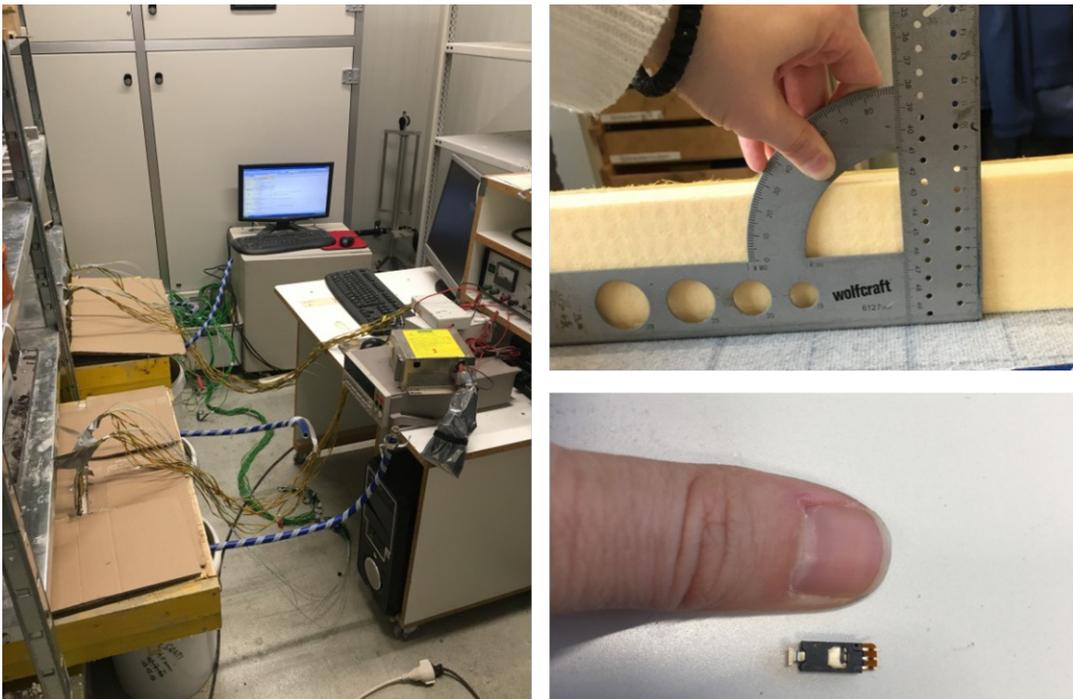


Abbildung 15: Klimakammer, Aufbauhöhe 7,5 cm, Feuchtigkeitssensor

Die Messeinrichtung bestand aus:

- Klimakammer Fa. PA SYSTEMS mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % (abgekürzt 20/65): Verwahrung der Estrichplatten während des Versuches (Abbildung 15)
- Trocknungsschrank Fa. BINDER: Verwahrung der Sandproben zur Bestimmung des Wassergehaltes
- Keithly 2700 Multimeter, Messung der Gleichspannung und der Temperatur alle 20 Minuten mit Excel-Link

Werkzeuge

Für die Herstellung der Mischungen und Versuchsdurchführung wurden folgende Werkzeuge benötigt:

- Kreissäge
- Tellerzwangsmischer
- Scheibtruhe
- Maurerkelle
- Rüttelplatte, zum Verdichten der Estrichprismen
- Waagen in diversen Größen
- Ausbreittisch für das Ausbreitmaß
- Universalprüfmaschine Typ Zwick 250
- Prismenschalung und Schalöl
- PVC-Zylinder als Schalung für den Saugversuch
- Meißel und Hammer
- Bausilikon
- Kunstharz Buntlack der Fa. SWINGCOLOR in blau
- Pinsel
- Baufolie

3.1.2 Rezeptur

Die Versuchsdurchführung erfolgte anhand eines Zementestrichs E225 ohne Beschleuniger. Für den Hauptversuch wurden 2 Mischungen, in der Tabelle 4 mit Probe Nr. 1 und Probe Nr. 2 bezeichnet, angerührt und für die Nebenversuche wurde eine weitere Mischung, in der Tabelle 4 als Probe Nr. 3 bezeichnet, angemischt. Alle Mischungen bestanden aus Estrichzement, CEM II/A-L 42,5 N, der Fa. BAUMIT, Rundkornkiessand der Korngruppe 0/4 und Wasser. Im Anhang befindet sich das Datenblatt zum Estrichzement.

Tabelle 4: Mischverhältnis

	Datum	Sand	Zement	Zugabe Wasser	Wasser im Sand	Gesamt-wasser	W/B-Wert	Mischdauer
		[kg]	[kg]	[l]	[l]	[l]	[-]	[min]
Hauptversuche								
Probe Nr. 1	28.01.2021	70,30	10,00	5,46	1,46	6,92	0,69	2,00
Probe Nr. 2	28.01.2021	70,30	10,00	6,34	1,24	7,58	0,76	2,00
Nebenversuche								
Probe Nr. 3	26.02.2021	70,30	10,00	7,22	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	2,00

Durch die bereits im Sand enthaltene Grundfeuchtigkeit variiert die Menge an zugegebenem Wasser bei den einzelnen Mischungen. Diese wurde beeinflusst durch die Lagerform in sogenannten „Big Bags“, bei denen der Oberflächensand durch Verdunstung einen niedrigeren Feuchtigkeitsgehalt aufweist als weiter unten liegender Sand. Es wurde die hinzugefügte Wassermenge angepasst, um eine für die Estrichverlegung übliche Konsistenz für die drei Mischungen zu erhalten. Im Vergleich dazu sind zugemischte Mengen an Sand und Zement konstant.

Zwischen der Herstellung der ersten beiden Proben und der Probe Nr. 3 liegt ein zeitlicher Abstand von fast einem Monat, somit hatte der Sand genug Zeit, um wieder an der Oberfläche auszutrocknen. Diese Tatsache spiegelt sich wider in der Wassermenge der Probe Nr. 3, da diese deutlich höher ist, verglichen mit den vorhergehenden Proben.

Für die Ermittlung des Wassergehaltes im Sand wurde nach ÖNORM EN 1097-5 eine Sandprobe abgewogen und dadurch die Feuchtmasse (M_1) ermittelt. Anschließend wurde die Probe im Klimaschrank bei 110 ± 5 °C getrocknet und gewogen, bis sich eine Massenkonstanz eingestellt hatte, dadurch ließ sich die Trockenmasse (M_3) bestimmen. Aus der Differenz der beiden Massen ließ sich der Wassergehalt (w) prozentuell in Bezug auf die Trockenmasse anhand von Formel 5 herleiten.

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} * 100 \text{ [in \%]}$$

Formel 5: Prozentueller Wassergehalt (16)

w Wassergehalt [%]

M_1 Feuchtmasse

M_3 Trockenmasse

In Tabelle 5 sind die im Sand enthaltenen Wassergehalte, welche durch das Wiegen ermittelt wurden, angegeben. Diese wurden bei der Angabe des Mischverhältnisses in Tabelle 4 berücksichtigt.

Tabelle 5: Wassergehalt im Sand bei Proben Nr. 1 und 2

		Probe Nr. 1	Probe Nr. 2
Tara	[g]	196,49	160,58
M1	[g]	501,92	511,49
M3	[g]	495,74	505,39
w	[%]	2,07	1,77

3.2 Frischbetonkennwerte

3.2.1 Konsistenz

Die Konsistenz eines Stoffes ist definiert als die Steifigkeit. Im Fall von Frischbeton bzw. Frischestrich spielt die Steifigkeit eine bedeutende Rolle in Hinblick auf die Verarbeitbarkeit. Je steifer eine Masse ist, desto schwieriger gestaltet sich das Befördern durch eine Pumpe, sowie die Einbringung als auch die Verdichtung. Die Eigenschaft der Konsistenz wird mithilfe der Ausbreitmaßklassen und Verdichtungsmaßklassen eingeteilt, wobei für Estriche nur das Ausbreitmaß wesentlich ist. (17)

Um das Ausbreitmaß bestimmen zu können, ist es erforderlich, den Ausbreitversuch nach ÖNORM EN 1015-3 durchzuführen. Dabei wird auf einem Ausbreittisch ein Setztrichter platziert und von oben mit der Estrichmasse befüllt. Der Frischestrich wird in zwei Lagen in den Setztrichter eingefüllt, wobei nach jeder Lage mit einem sogenannten Stampfer etwas nachverdichtet wird, um das Volumen des Setztrichters vollständig zu füllen. Danach wird der Setztrichter angehoben und der Frischestrich durch 15 Stöße ausgebreitet, welche durch die Bewegung des Ausbreittisches ermöglicht werden. Wenn dieser Vorgang abgeschlossen ist, wird der Durchmesser des ausgebreiteten Frischestrichs zweimal abgemessen und der Mittelwert der beiden Maße errechnet. Die Messrichtungen stehen im rechten Winkel zueinander. (Abbildung 16) (18)

Die Ausbreitmaße für die vorliegenden Proben sind in Tabelle 6 beschrieben.

Tabelle 6: Versuchsergebnisse Konsistenz

	Ausbreitmaß
	[mm]
Probe Nr. 1	112,50
Probe Nr. 3	120,00



Abbildung 16: Versuch zur Bestimmung des Ausbreitmaßes

3.2.2 Rohdichte des Frischestrichs

Die Rohdichte wurde anhand der Probe Nr. 3 laut Rezeptur in Tabelle 4 bestimmt. Dabei wog der Frischestrich 18,37 kg bei einem Volumen von 0,008 m³. Daraus ergab sich eine Rohdichte von 2296,25 kg/m³.

3.3 Untersuchungen am erhärteten Estrich

Als Bestandteil der Nebenversuche wurden sämtliche Untersuchungen an den erhärteten Estrichproben durchgeführt, um verschiedene Formen des hygrischen Verhaltens sowie Feuchtigkeitsgehalte mit unterschiedlichen Methoden zu bestimmen. Weiters erfolgten mechanische Versuche zur Feststellung der Festigkeitseigenschaften, um zu überprüfen, ob die laut ÖNORM geforderten Materialkennwerte aufgrund der verwendeten Rezeptur eingehalten wurden.

Folgende Versuche sind Gegenstand dieses Kapitels:

- Biegezugfestigkeitsversuch
- Druckfestigkeitsversuch
- Versuch zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes
- Saugversuch zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten
- CM-Messung an der Probe Nr. 3
- KRL-Messung an der Probe Nr. 3

- Darr-Messung an der Probe Nr. 3

Die Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes und des Wasseraufnahmekoeffizienten wurde durchgeführt, um Kennwerte für eine zukünftige Berechnung des thermischen und hygrischen Verhaltens von Heizestrichen zu erhalten.

3.3.1 Biegezug- und Druckfestigkeiten

Für die Ermittlung der Festigkeiten wurde laut Rezeptur wie bereits im Kapitel 3.1.2 beschrieben, die Probe Nr. 3 angemischt. Die Prismen wurden in Hinblick auf die Größe, Maßgenauigkeit, Ebenheit, Rechtwinkligkeit und Oberflächenrauigkeit nach den Anforderungen der ÖNORM EN 13892-1 hergestellt. Die Verdichtung erfolgte lagenweise auf einem Rütteltisch. Die Schalung bestand aus Stahlplatten, welche durch eine Verschraubung gelockert bzw. angezogen werden konnten. Bevor der Estrich in die Form eingebracht wurde, wurde ein Schalöl aufgetragen, um das Ausschalen zu erleichtern. (19)

In Summe wurden 18 Stück Prismen mit den Abmessungen 160 x 40 x 40 mm (L x B x H) angefertigt. (Abbildung 17)



Abbildung 17: Prüfkörper im frischen und erhärteten Zustand für Nebenversuche

Mit den hergestellten Estrichprismen wurden nun die Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit anhand der, in der ÖNORM EN 13892-2 beschriebenen Prüfverfahren ermittelt. Das verwendete Prüfgerät war die Universalprüfmaschine Typ Zwick 250.

Die Lastanordnung für die Biegezugfestigkeit bestand aus zwei Stahlauflegerrollen und einer Stahllastrolle, welche etwa 50 mm lang waren und einen Durchmesser von $10 \pm 0,5$ mm aufwiesen. Die Auflagerrollen waren in einer Ebene mit einem Achsabstand von $100 \pm 0,5$ mm angeordnet und die Lastrolle war in einer parallelen Ebene genau zwischen den Auflagerrollen platziert. Beim Versuch wurde ein Prisma zwischen die Auflager- und Lastrolle gelegt und die Lastaufbringung erfolgte durch das Absenken der Lastrolle in Richtung Auflagerrollen. Dabei wurde eine Belastungsgeschwindigkeit von 50 ± 10 N/sec gewährleistet, wobei die Lastaufbringung stoßfrei zu erfolgen hatte. Die Last zum Zeitpunkt des Brucheintrittes wurde dabei als F_f bezeichnet und in Newton angegeben. (Abbildung 19, links) (20)

Die Biegezugfestigkeit R_f ist mit der Bruchlast F_f , der Probenlänge l , der Probenbreite b und Probenhöhe d durch Formel 6 zu berechnen.

$$R_f = \frac{1,5F_f * l}{b * d^2} \text{ [in N/mm}^2\text{]}$$

Formel 6: Biegezugfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 (20)

R_f	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
F_f	Bruchlast [N]
l	Achsabstand der Auflagerrollen beim Biegezugfestigkeitsversuch [mm]
b	Probenbreite [mm]
d	Probenhöhe [mm]

Die am 26.02.2021 betonierten Estrichprismen wurden am 15.04.2021 der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Das Alter der Proben betrug 49 Tage. (Abbildung 18)



Abbildung 18: oben: Prismen vor Biegezugfestigkeitsprüfung, unten: Prismen nach Druckfestigkeitsprüfung

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt ebenfalls nach den Vorgaben der ÖNORM EN 13892-2. Sie ist am selben Tag wie die Biegezugfestigkeitsprüfung und mit denselben Prüfprismen durchzuführen, welche die Biegezuguntersuchung durchlaufen haben.

Dabei bestand die Belastungsanordnung der Prüfmaschine Zwick aus zwei Auflagerplatten mit einer Fläche A von 40×40 mm und einer Plattenstärke von 10 mm. Die Lastaufbringung erfolgte, indem die obere Platte in Richtung der unteren Platte gedrückt wurde. Dadurch, dass bei der Biegezugfestigkeitsprüfung jeweils drei Prüfkörper pro Set untersucht wurden, ergaben sich insgesamt sechs Hälften pro Set, diese wurden alle einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Die Lastaufbringung erfolgte stoßfrei und wurde bis zum Eintritt des Bruches fortgesetzt. Die Last zum Zeitpunkt des Brucheintrittes wurde dabei als F_c bezeichnet und in Newton angegeben. (Abbildung 19, rechts) (20)

Die Druckfestigkeit R_c ist mit der Bruchlast F_c und der, mit der Auflagerfläche in Berührung stehenden Probekörperfläche $A = 1600$ mm durch Formel 7 zu berechnen.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [in N/mm}^2\text{]}$$

Formel 7: Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 (20)

R_c Druckfestigkeit [N/mm²]

F_c Bruchlast [N]

A mit den Auflagerplatten in Berührung stehende Fläche des Probekörpers [mm²]

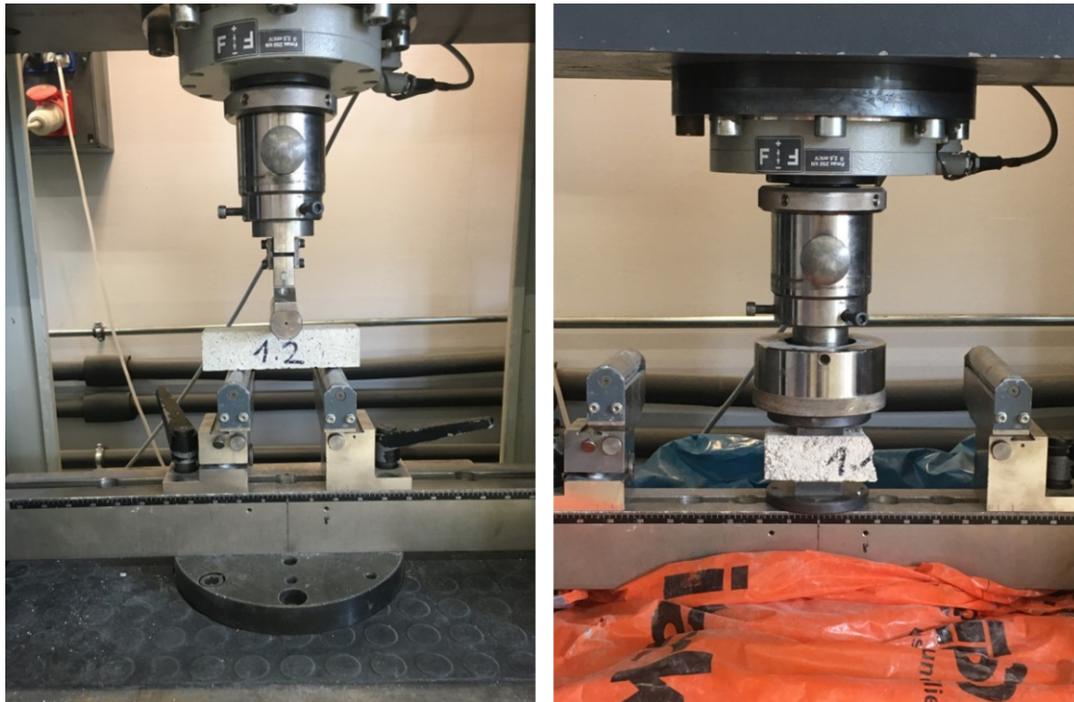


Abbildung 19: links: Biegezugfestigkeitsprüfung, rechts: Druckfestigkeitsprüfung

Vor der Untersuchung auf Biegezug- und Druckfestigkeiten wurden die Massen und die Dichten jedes Primas ermittelt. Tabelle 7 zeigt die ermittelten Werte. Die Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 8 dokumentiert.

Tabelle 7: Masse und Dichte der Prüfprismen

		Volumen = 256,00 cm ³	
Set	Probennummer	Masse	Dichte
		[g]	[g/cm ³]
1	1	547,50	2,14
	2	569,50	2,22
	3	567,50	2,22
Mittelwerte Set 1		561,50	2,19
2	4	570,00	2,23
	5	556,50	2,17
	6	552,50	2,16
Mittelwerte Set 2		559,67	2,19

Tabelle 8: Ergebnisse Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten

		Biegezugfestigkeiten				Druckfestigkeiten			
		Belastungsgeschwindigkeit 50 N/sec				Belastungsgeschwindigkeit 500 N/sec			
		Probenlänge $l = 100$ mm				Fläche $A = 1600$ mm ²			
		Normative Mindestbiegezugfestigkeit 4 N/mm ² (21)				Normative Mindestdruckfestigkeit 20 N/mm ² (21)			
						Linke Hälfte		Rechte Hälfte	
Set	Proben- nummer	d [mm]	b [mm]	F_f [N]	R_f [N/mm ²]	F_c [N]	R_c [N/mm ²]	F_c [N]	R_c [N/mm ²]
1	1	39,92	40,31	2883,58	6,73	52035,42	32,52	50712,14	31,70
	2	39,98	40,44	2783,03	6,46	59470,59	37,17	61007,54	38,13
	3	40,15	40,49	3014,65	6,93	56806,07	35,50	54157,70	33,85
Mittelwerte Set 1					6,71		35,06		34,56
2	4	40,27	39,82	3011,06	6,99	53557,53	33,47	51677,66	32,30
	5	39,84	39,65	3093,66	7,37	58764,44	36,73	50668,60	31,67
	6	40,11	39,58	2795,60	6,59	51966,73	32,48	54053,09	33,78
Mittelwerte Set 2					6,99		34,23		32,58

Die Güteanforderungen, welche laut ÖNORM B 3732 (Abbildung 20) an einen Zementestrich E225 gestellt werden, wurden bei den Versuchen von allen Proben eingehalten.

Estrichart und nationale Bezeichnung	Erst- ^a und Güteprüfung an Prismen		Bauteilprüfung ^{b,c} am fertigen Estrich
	Biegezugfestigkeitsklasse nach ÖNORM EN 13813	Druckfestigkeitsklasse nach ÖNORM EN 13813	Biegezugfestigkeit
			N/mm ²
Zementestrich E 225	F4	C20	2,5
Zementestrich ^f E 300	F5	C30	3,2
Calciumsulfatestrich E 225	F4	C20	2,5
Magnesiaestrich E 225	F4	C20	2,5
Zementfließestrich/ Calciumsulfat-Fließestrich E 225 F	F4	C20	3,2 ^d
Zementfließestrich/ Calciumsulfat-Fließestrich E 300 F	F5	C30	4,2 ^d
Calciumsulfatestrich E 400	F7 ^e	C40 ^e	4,4
Zementestrich E 400 ^f	F7 ^e	C40 ^e	4,4

^a Die Auswertung der Prüfergebnisse hat gemäß dem in der ÖNORM EN 13813 beschriebenen Verfahren zu erfolgen.
^b Weicht ein Einzelwert um mehr als 20 % vom gemeinsamen Mittel ab, ist er auszuschneiden. Weichen zwei Einzelwerte um mehr als 20 % vom gemeinsamen Mittel ab, ist eine Mittelwertbildung unzulässig.
^c Wenn die Estrichdicke größer als die Sollstärke ist und die geforderte Biegezugfestigkeit nicht erreicht wird, ist zu überprüfen, ob die ermittelte Bruchkraft gleich groß oder größer als die aus der geforderten Biegezugfestigkeit und der Sollstärke errechnete Bruchkraft ist. In diesem Fall ist die Bauteilprüfung positiv.
^d Werden diese geforderten höheren Festigkeiten nicht nachgewiesen, dürfen die für Fließestrich verringerten Minstdicken gemäß **Tabelle A.3** und **Tabelle A.4** nicht angewendet werden.
^e Diese Festigkeitsklasse wird in der Regel durch Kunstharzmodifikation erreicht.
^f Nur auf Trennlage oder auf nicht nachgiebigen Dämmstoffen (Zusammendrückbarkeit der gesamten Dämmschicht höchstens 2 mm).

Abbildung 20: Schwimmende Estriche und Estriche auf Trennlage - Mindestfestigkeiten laut ÖNORM B 3732 (21)

3.3.2 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Dieser Nebenversuch wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 12086 an der Probe Nr. 3 durchgeführt. Die Rezeptur der Probe ist im Kapitel 3.1.2 näher beschrieben. Dabei wurde auf einer Baufolie eine gleichmäßige 1,9 cm starke Estrichschicht ausgerollt und mit PVC-Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm ausgestochen und zum Erhärten liegen gelassen. Nachdem die Estrichmasse erhärtet war, konnte man den Zylinder mit der eingebauten Probe sowohl von oben als auch von unten mit einem Silikonrand abdichten. In Summe standen drei Probekörper zur Verfügung. Zwei Stück davon wurden mit Wasser (Wasserhöhe 1,5 cm) befüllt und die dritte Probe beinhaltete Silikagel. Abschließend wurden die PVC-Zylinder mit den Proben auf die PVC-Zylinder mit dem Füllinhalt gesetzt und ringsum mit einer Silikonfuge verschlossen. (Abbildung 21, Abbildung 22)



Abbildung 21: Probenherstellung zur Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

In den mit Wasser befüllten Proben wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % und in der mit Silikagel gefüllten Probe eine relative Luftfeuchtigkeit von 0 % in der Berechnung angesetzt. Die Lagerung erfolgte in der Klimakammer 20/55 und alle Proben wurden in gewissen Zeitabständen abgewogen und die Ergebnisse in Tabelle 9 dokumentiert. Zur Veranschaulichung der Massenabnahme bei den mit Wasser gefüllten Proben 1 und 3 und der Massenzunahme bei der mit Silikagel gefüllten Probe 2, sind die Ergebnisse im Diagramm 1 dargestellt.

Tabelle 9: Massenzu- bzw. abnahme in mg/h

Datum	Uhrzeit	Δt [h]	Probe 1 - Wasser			Probe 2 - Silikagel			Probe 3 - Wasser		
			Masse [g]	Massen-differenz	mg/h	Masse [g]	Massen-differenz	mg/h	Masse [g]	Massen-differenz	mg/h
15.04.2021	10:30		1587,630			1518,980			1512,450		
21.04.2021	13:25	146,92	1587,530	-0,100	-0,681	1523,720	4,740	32,263	1510,370	-2,080	-14,158
27.04.2021	09:45	140,33	1585,120	-2,410	-17,173	1527,060	3,340	23,800	1506,560	-3,810	-27,150
03.05.2021	11:30	145,75	1582,100	-3,020	-20,720	1529,750	2,690	18,456	1502,680	-3,880	-26,621
04.05.2021	13:30	26,00	1581,490	-0,610	-23,462	1530,020	0,270	10,385	1501,900	-0,780	-30,000
05.05.2021	14:15	24,75	1580,480	-1,010	-40,808	1529,980	-0,040	-1,616	1500,650	-1,250	-50,505
06.05.2021	10:10	19,92	1578,680	-1,800	-90,377	1529,900	-0,080	-4,017	1498,390	-2,260	-113,473
11.05.2021	12:30	122,33	1575,260	-3,420	-27,956	1530,170	0,270	2,207	1493,750	-4,640	-37,929
12.05.2021	13:10	24,67	1574,620	-0,640	-25,946	1530,360	0,190	7,703	1492,840	-0,910	-36,892
13.05.2021	10:30	21,33	1571,320	-3,300	-154,687	1531,100	0,740	34,688	1488,340	-4,500	-210,938
21.05.2021	08:00	189,50	1568,320	-3,000	-15,831	1531,570	0,470	2,480	1484,670	-3,670	-19,367
			Mittelwert der letzten 5 Werte		62,960	Mittelwert der letzten 5 Werte		8,612	Mittelwert der letzten 5 Werte		83,720

Die Massenänderung in Milligramm je Stunde ergibt sich aus der Differenz der Masse zum Zeitpunkt 2 und der Masse zum Zeitpunkt 1 dividiert durch die zeitliche Differenz von Zeitpunkt 2

und Zeitpunkt 1. Der Versuch gilt als beendet, wenn die Massenänderung in Milligramm je Stunde minimal wird im Vergleich zum vorletzten Wert. (22)

Tabelle 10: Berechnung Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl (μ) und Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d)

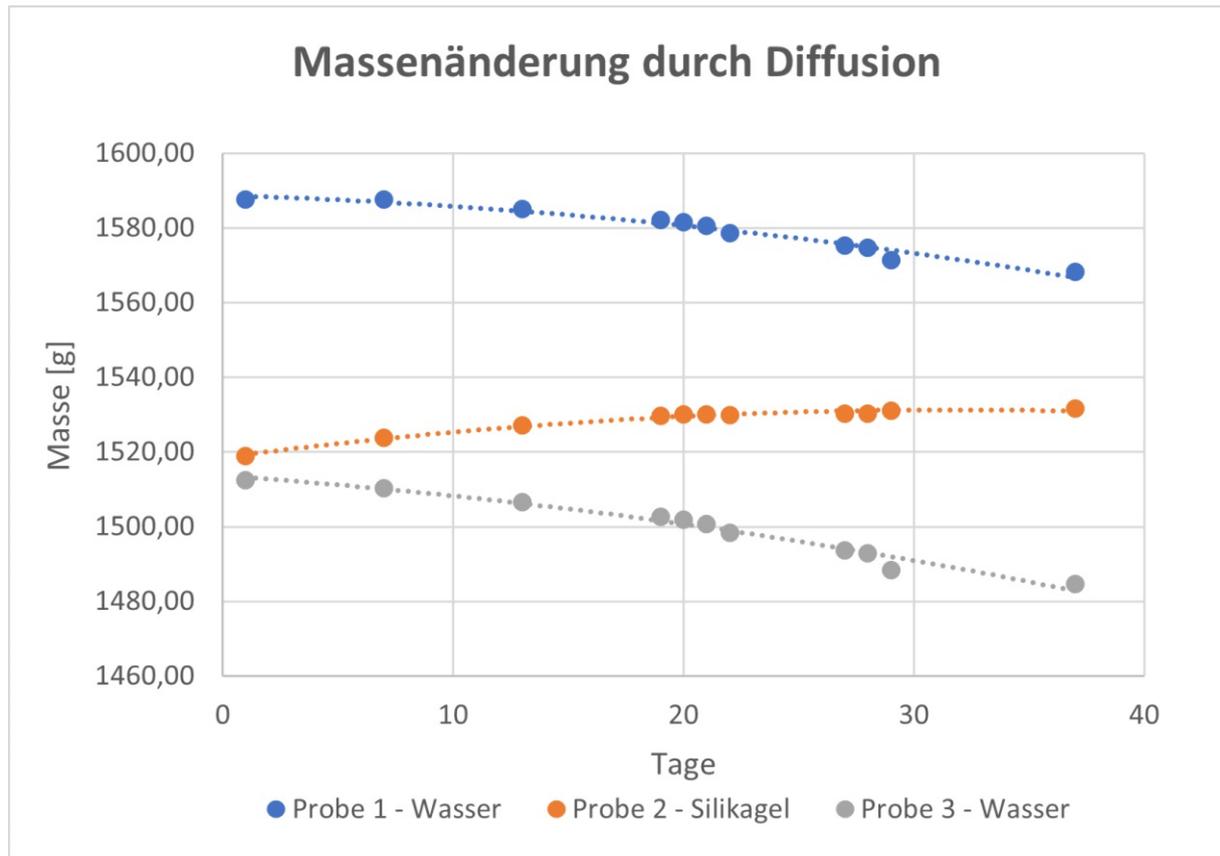
Probennummer	G	A	p_s		Δp	W	Z	d	δ	δ_{Luft}	μ	s_d
	Mittelwert der letzten 5 Werte	Probenfläche	Wasserdampf-sättigungsdruck bei 20°C	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampf-teildruckdifferenz	Wasserdampf-diffusions-durchlass-koeffizient	Wasserdampf-diffusions-durchlass-widerstand	Probenstärke	Wasserdampf-diffusions-leitkoeffizient	Wasserdampf-diffusions-leitkoeffizient der Luft	Wasserdampf-diffusions-widerstandszahl	Wasserdampf-diffusions-äquivalente Luftschichtdicke
	[mg/h]	[m ²]	[Pa]	[%]	[Pa]	[mg/m ² hPa]	[m ² hPa/mg]	[m]	[mg/mhPa]	[mg/mhPa]	[-]	[m]
1	62,960	0,0177	2340	45	1053	3,383	0,2956	0,019	0,064	0,705	10,97	0,208
2	8,612	0,0177	2340	55	1287	0,379	2,6408	0,019	0,007	0,705	97,99	1,862
3	83,720	0,0177	2340	45	1053	4,499	0,2223	0,019	0,085	0,705	8,25	0,157

In Tabelle 10 sind die Werte aus den Berechnungen der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke nach der ÖNORM EN 12086 angeführt. Für die mit Wasser gefüllten Proben 1 und 3 ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = 9,61$ und bei einer Schichtstärke von $d = 0,019$ m ergibt sich eine Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke von $s_d = 0,183$ m. Der Wert für die mit Silikagel gefüllte Probe 2 beträgt $\mu = 97,99$ und bei einer Schichtstärke von $d = 0,019$ m ergibt sich eine Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke von $s_d = 1,862$ m. Der im Trockenbereich gemessene μ -Wert (Probe 2) liegt deutlich höher als der im Feuchtbereich festgestellte Wert (Probe 1 und 3), was durch den fehlenden Kapillarwassertransport in den Poren erklärt werden kann. In der Literatur werden für den Feuchtbereich μ -Werte von 15 angegeben. (23)



Abbildung 22: Fertige Proben zur Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

Diagramm 1: Massenänderung durch Diffusion



3.3.3 Saugversuch

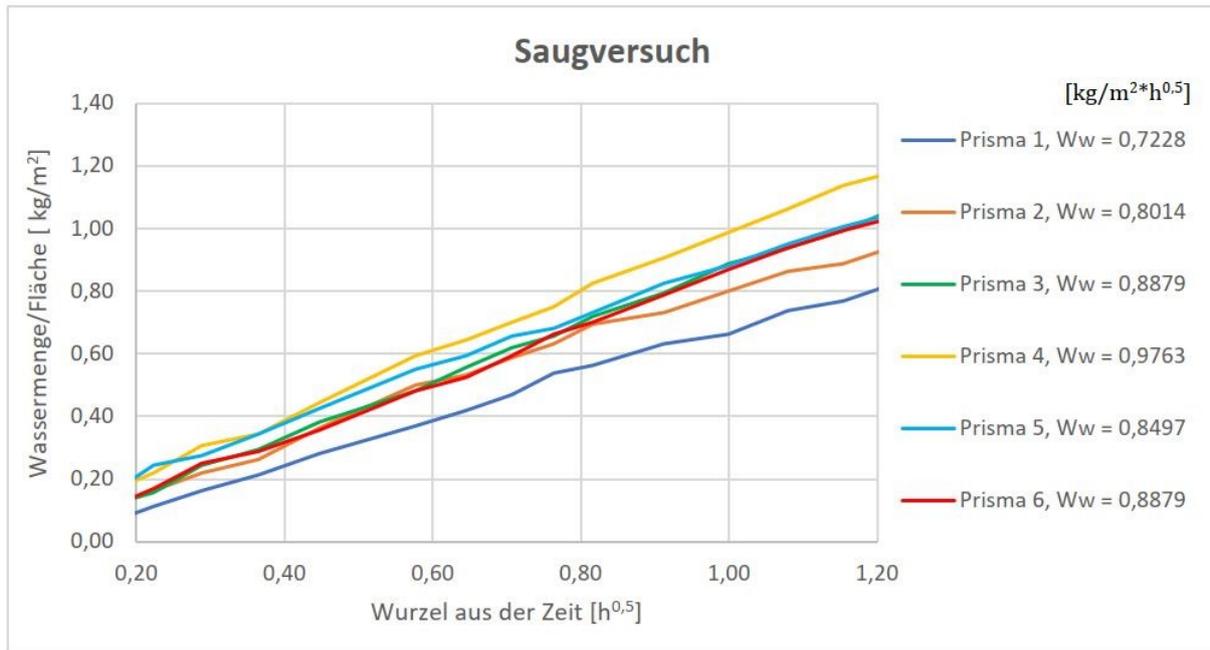
Der Saugversuch in Anlehnung an die DIN EN ISO 15148 dient zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten, welcher die Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte beschreibt. Einige Tage vor Versuchsbeginn wurden sechs Stück der erhärteten Estrichprismen auf allen vier Längsseiten mit einem Kunstharzlack bestrichen und trocknen gelassen. Die Beschichtung hatte die Aufgabe die Wasseraufnahme und -abgabe über die Seitenflächen zu verhindern und ausschließlich die Wasseraufnahme über die im Wasser eingetauchte Stirnseite zu gewährleisten. (Abbildung 23)



Abbildung 23: Beschichtete Prismen für den Saugversuch

Zuerst wurden alle sechs Prismen abgewogen, bevor sie in eine Schale mit einem 1,5 cm hohen Wasserpegel aufgestellt wurden. Die Proben wurden auf liegende ca. 3 mm starke Metallstifte platziert, um die Stirnseite vom Schalenboden abzuheben, damit eine vollflächige Wasseraufnahme gesichert werden konnte. Mit dem Eintauchen der Proben wurde auch die Stoppuhr gestartet. Insgesamt wurden 15 Wägungen durchgeführt, jeweils nach der 1. min, 3. min, 5. min, 8. min, 12. min, 20. min, 25. min, 30. min, 35. min, 40. min, 50. min, 60. min, 70. min, 80. min und 90. min. Die Ergebnisse wurden protokolliert und im Diagramm 2 durch das Auftragen der Wurzel aus der Zeit auf der X-Achse und des Gewichtszuwachses pro Aufnahme­fläche, bezogen auf das Startgewicht auf der Y-Achse grafisch dargestellt. Pro Probekörper ergab sich eine Gerade, dessen Steigung mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten W_w gleichzusetzen ist. (Abbildung 25)

Diagramm 2: Ergebnisse Saugversuch



Der Mittelwert der Wasseraufnahmekoeffizienten aller Prismen beträgt 0,8543 kg/m²*h^{0,5}, das entspricht laut Abbildung 24 einem wasserhemmenden Baustoff. Der wesentliche Grund für die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten ist seine Notwendigkeit, um den Flüssigkeitsleitkoeffizienten berechnen zu können. Dieser ist wiederum für die Berechnung von kapillaren Vorgängen erforderlich.

Benennung	W _w [kg/m ² *h ^{0,5}]
wassersaugend	> 2
wasserhemmend	0,5 < W _w ≤ 2
wasserabweisend	0,001 < W _w ≤ 0,5
wasserdicht	≤ 0,001

Abbildung 24: Benennung von Baustoffschichten nach der Größe ihrer Wasseraufnahmekoeffizienten W_w (14)

Die Berechnung des Flüssigkeitsleitkoeffizienten κ_F erfolgt nach Formel 8. (14)

$$\kappa_F = \frac{W_w^2}{(4 * \rho_w * u_f)^2} * \ln\left(\frac{\kappa_F}{\kappa_0}\right) \text{ [in m}^2\text{/h]}$$

Formel 8: Berechnung Flüssigkeitsleitkoeffizient [m²/h]

W_w Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²*h^{0,5}]

ρ_w Dichte des Wassers [ρ_w = 1000 kg/m³]

u_f freier Wassergehalt [-], Annahme 5,0%

κ_F Maximalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m^2/h]

κ_0 Minimalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m^2/h]

κ_F / κ_0 Annahme 400 (14)

Im gegenständlichen Versuch ergibt sich ein Flüssigkeitsleitkoeffizient von $1,09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$.

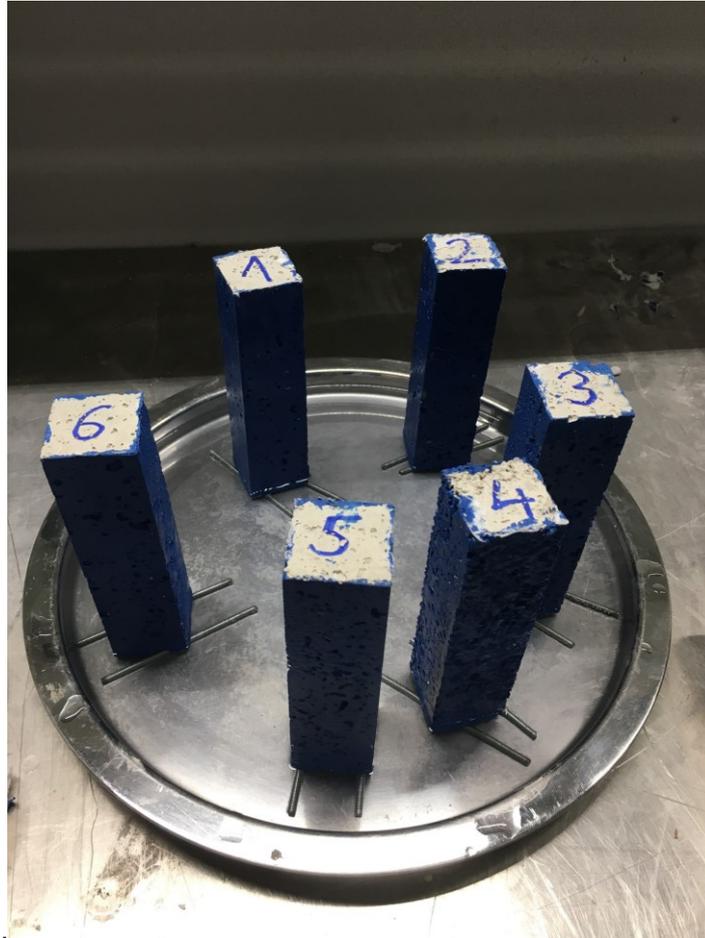


Abbildung 25: Prismen in einer wassergefüllten Schale

3.3.4 Feuchtigkeitsmessungen anhand einer Probe

Zur Ermittlung des Trocknungsverhaltens der Estrichplatten für den Hauptversuch wurde die KRL-Messmethode angewendet. Um einen direkten Bezug der protokollierten Werte, welche die verbauten Sensoren in den Proben aufgezeichnet haben, mit den Werten der CM-Methode und der Darr-Methode herzustellen, wurden an drei Probekörpern jeweils alle drei Messmethoden angewendet. Für die Herstellung der drei Probekörper wurde die Mischung, welche als Probe Nr. 3 in der Tabelle 4 bezeichnet wird, herangezogen. Diese Vorgangsweise ermöglicht die Messwerte aller Methoden von ein und derselben Probe festzustellen, um einen Vergleich zwischen diesen herstellen zu können. (Abbildung 26)



Abbildung 26: Probe für die Durchführung der CM-, Darr- und KRL-Messung

Der genaue Ablauf der Messmethoden ist in Kapitel 2.3 beschrieben. Der Probekörper wurde mit einem Meißel und einem Hammer aufgeschlagen und aus dem unteren Drittel wurde Stemmgut entnommen. Pro Probekörper wurden jeweils 20 g bzw. 30 g eingewogen und der CM-Messung unterzogen. Anhand des angezeigten Drucks am Manometer konnte mithilfe von Tabelle 1 der Wassergehalt ermittelt werden.

Weiters wurden größere Brocken in eine Plastikbox mit einem Luftfeuchtigkeitssensor luftdicht eingeschlossen. Nachdem sich die Temperatur in der Plastikbox mit der Umgebungstemperatur ausgeglichen hat, wurde am Sensor die relative Luftfeuchtigkeit, welche sich durch Ausgleichen der Feuchtigkeit aus der Probe mit der Luft in der Box eingestellt hatte, abgelesen. (Abbildung 8)

Nachdem die KRL-Messung abgeschlossen war, wurde mit denselben Estrichstücken aus der Plastikbox die Darr-Messung gestartet. Dabei wurden pro Probekörper zwei abgewogene, befüllte Glasbecher in den Trocknungsofen gestellt und nach dem Erreichen der Gewichtskonstanz erneut gewogen, um aus der Gewichtsabnahme den Wassergehalt vor dem Darrvorgang zu bestimmen. Die Berechnung des Wasseranteils bei 50 °C und 105 °C erfolgte mithilfe von Formel 5.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit den verschiedenen Messmethoden sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Feuchtigkeitswerte von Probe Nr. 3 mittels verschiedener Messmethoden

Nr.	CM			KRL		DARR			
	Einwaage [g]	Druck [bar]	Wassergehalt [CM - %]	Temperatur [°C]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Darrtemperatur [°C]	m _f [g]	m _t [g]	Wassergehalt [Masse - %]
1-50	30,00	0,80	3,19	20,58	74,10	50	127,10	123,68	2,77
1-105	30,00	0,80	3,19	20,58	74,10	105	119,75	115,20	3,95
2-50	20,00	0,67	3,35	20,11	83,11	50	115,50	111,10	3,96
2-105	20,00	0,67	3,35	20,11	83,11	105	139,00	132,37	5,01
3-50	20,00	0,59	2,95	20,07	78,09	50	131,55	127,83	2,91
3-105	20,00	0,59	2,95	20,07	78,09	105	115,05	110,61	4,01

Um die Ergebnisse der drei verschiedenen Messmethoden zueinander in Relation zu stellen, wurden die Messergebnisse in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

Diagramm 3: Gegenüberstellung CM-% und relative Luftfeuchtigkeit nach KRL

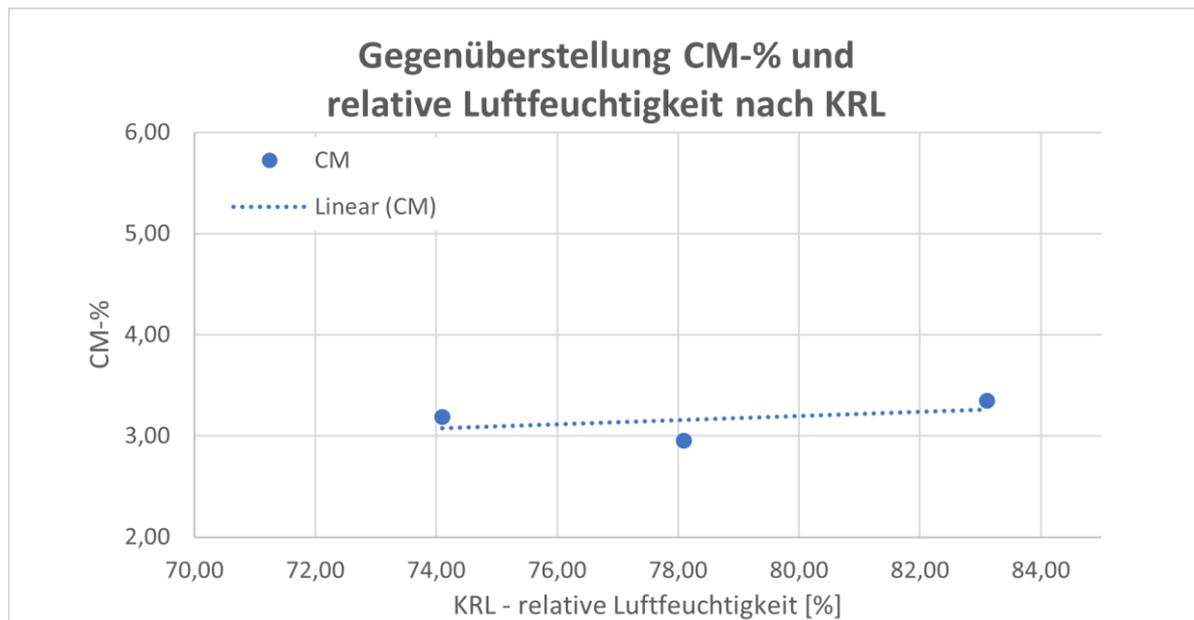


Diagramm 3 zeigt anhand von drei Wertepaaren die Beziehung zwischen den CM-% und der relativen Luftfeuchtigkeit nach der KRL-Messmethode bei einer Temperatur um 20 °C für die Probe Nr. 3. Man erkennt, dass die CM-Werte in der gleichen Größenordnung, sehr große Unterschiede in der relativen Luftfeuchtigkeit bedeuten können. Daher kann es in der Praxis durchaus passieren, dass ein Estrich aufgrund der CM-Messung als belegereif eingeschätzt wird, aber die relative Luftfeuchtigkeit dennoch zu hoch ist und somit ein darauffolgender Schaden des Belages nicht ausgeschlossen werden kann. Um eine konkretere Aussage zur Korrelation der beiden Größen formulieren zu können, benötigt man eine größere Anzahl an Wertepaaren.

Diagramm 4: Gegenüberstellung Darr-Massen% und relative Luftfeuchtigkeit nach KRL

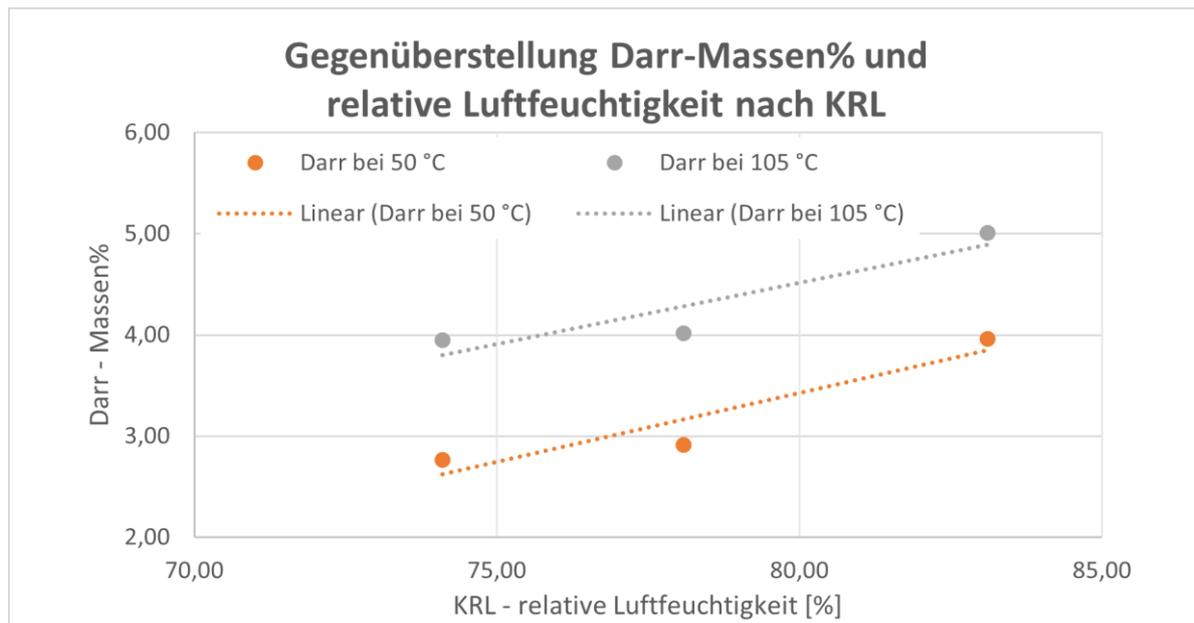


Diagramm 4 stellt die Messergebnisse aus dem Darrvorgang den Messergebnissen nach der KRL-Messmethode gegenüber. Hier zeigt sich, dass sich die Darrfeuchten für die gleiche Darrtemperatur trotz geringer Probenanzahl in der Nähe einer Ausgleichsgeraden wiederfinden und somit eine gute Korrelation abgebildet wird.

Weiters wurde die Korrelation zwischen den CM-Messwerten und den Darr-Messwerten betrachtet. Vorab lässt sich sagen, dass die Darr-Werte naturgemäß höher liegen als die CM-Werte. Das liegt daran, dass bei der CM-Messung nur „lose gebundenes“ Wasser für das Messergebnis herangezogen wird. Im Gegensatz dazu wird beim Darrvorgang zusätzlich auch ein Teil des chemisch gebundenen Wassers erfasst, was zu einem höheren Wert führt. Problematisch ist, dass mit zunehmendem Alter des Estrichs in Kombination mit höherer Luftfeuchtigkeit auch der Anteil an chemisch gebundenem Wasser zunimmt. Somit erscheint ein jüngerer Estrich trockener, was zu einer Fehlinterpretation in Bezug auf die Belegereife bei Bestimmung durch die Darr-Methode führt. Es ist daher erforderlich das Alter des Estrichs in die Beurteilung der Messergebnisse einzubeziehen. (24)

Diagramm 5: Gegenüberstellung CM-% und Darr-Massen%

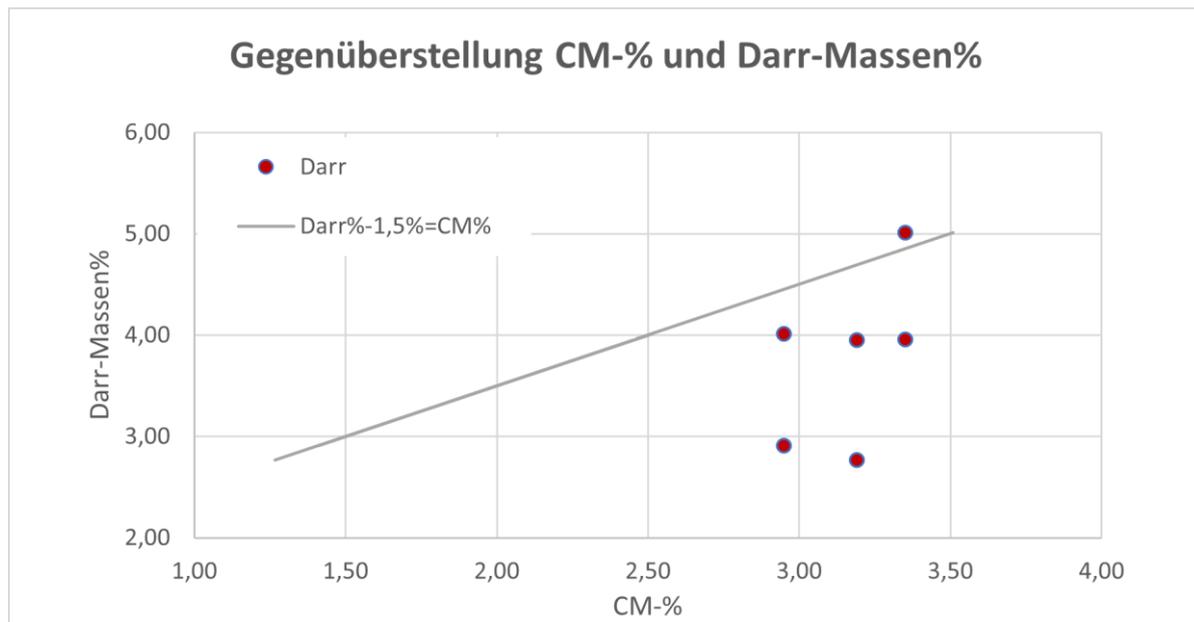


Diagramm 5 stellt die Werte aus der Darr-Messung den Werten aus der CM-Messung gegenüber. Aus der Literatur kennt man die Formulierung, dass die Darr-Werte abzüglich 1,5 % zu den CM-Werten führen. Im Diagramm 5 ist dieser Zusammenhang anhand der Geraden dargestellt. Es fällt auf, dass die untersuchten Proben dieser Formulierung nicht eindeutig folgen und somit keine schlüssige Korrelation in diesem Fall ermittelt werden kann. (3)

3.4 Hauptversuch Trocknungsverhalten von Heizestrich nach Belagsverlegung

Der Hauptversuch der gegenständlichen Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Trocknungsverhalten des Heizestrichs und unterteilt sich in zwei Phasen. Die 1. Phase beginnt beim Anmischen des Frischestrichs und endet mit der Belagsverlegung. Die 2. Phase erstreckt sich von der Belagsverlegung bis zum Versuchsende und der Auswertung der Versuchsergebnisse. Die zeitliche Einteilung der einzelnen Schritte während der gesamten Versuchsdauer ist in Abbildung 27 dargestellt.

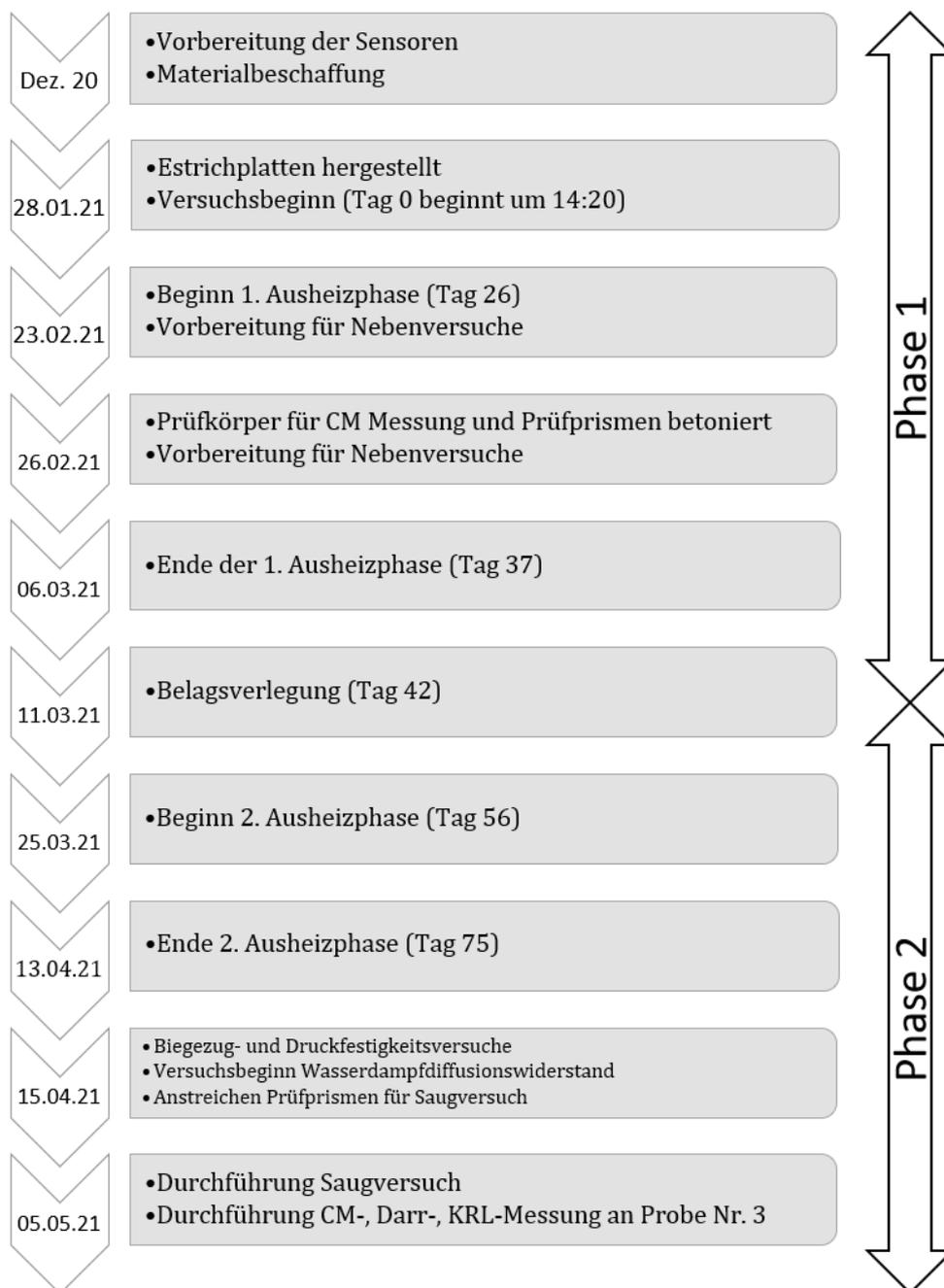


Abbildung 27: Zeitlicher Ablauf der Versuchsdurchführungen

Wie bereits im Kapitel 3.1.1 beschrieben wurden zwei Estrichprobeflächen hergestellt, welche mit Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensoren auf verschiedenen Höhen im Aufbau ausgestattet wurden. Es wurde eine Ausheizperiode mittels Fußbodenheizung durchgeführt und im Anschluss darauf wurde auf die Probefläche 1 ein Fliesenbelag und auf die Probefläche 2 ein Parkettbelag aufgebracht. Das Ziel der Untersuchungen war es das Trocknungsverhalten über die Zeit zu beobachten und die Veränderung im Trocknungsverlauf nach der Belagsverlegung festzustellen. (Abbildung 28)



Abbildung 28: links: Probe 1 mit Fliesenbelag, rechts: Probe 2 mit Parkettbelag

Nach Abschluss des Versuchsablaufes laut Abbildung 27 wurden die Gleichspannungen, welche alle 20 Minuten über die gesamte Versuchsdauer durch die Feuchtigkeitssensoren aufgezeichneten wurden, ausgewertet. Dafür war es notwendig vor Versuchsbeginn bei einer Temperatur von 20 °C die vorherrschende relative Luftfeuchtigkeit in einem Klimaschrank (Typ Binder) auf 50 %, 65 %, 80 % und 90 % einzustellen. Bei jedem der Werte wurden mittels Feuchtigkeitssensoren die vorherrschenden Gleichspannungen aufgezeichnet. Somit war es möglich Zusammenhänge zwischen gemessenen Gleichspannungen und der vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeit herzustellen. In Tabelle 12 sieht man die von den Sensoren 101, 102 und 103 aufgezeichneten Gleichspannungen bei verschiedenen Luftfeuchtigkeitswerten. Diese Wertepaare wurden in einem Koordinatensystem aufgetragen, wodurch sich die Ausgleichsgerade mit den Parametern k und d ergeben hat. Für jeden Sensor wurde eine Ausgleichsgerade im Zuge der Kalibrierung ermittelt, um diese dann für die Umrechnung der Gleichspannungen aus dem Hauptversuch auf die relative Luftfeuchtigkeit zu verwenden.

Tabelle 12: Kalibrierung der Luftfeuchtigkeitssensoren

Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Sensor 101	Sensor 102	Sensor 103
°C	[%]	Gleichspannung [Volt]		
20	50	2,3865	2,3696	2,3612
20	65	2,8802	2,8792	2,8685
20	80	3,4560	3,4328	3,4197
20	90	3,7573	3,7525	3,7288
k		28,6880	28,6530	28,9310
d		-18,256	-17,819	-18,278

In der Abbildung 29 sind beispielhaft die Koordinatensysteme zur Ermittlung der Ausgleichsgeraden für die Sensoren 101 und 102 zu sehen. Dieser Vorgang wurde für alle 20 Sensoren wiederholt.

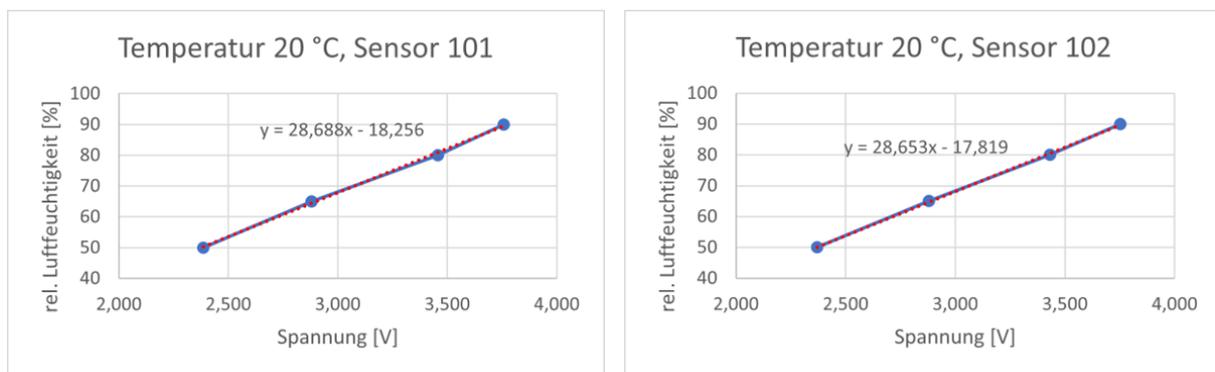


Abbildung 29: Ausgleichsgerade aus der Kalibrierung für die Sensoren 101 und 102

3.4.1 Temperaturverlauf in den Heizstrichproben

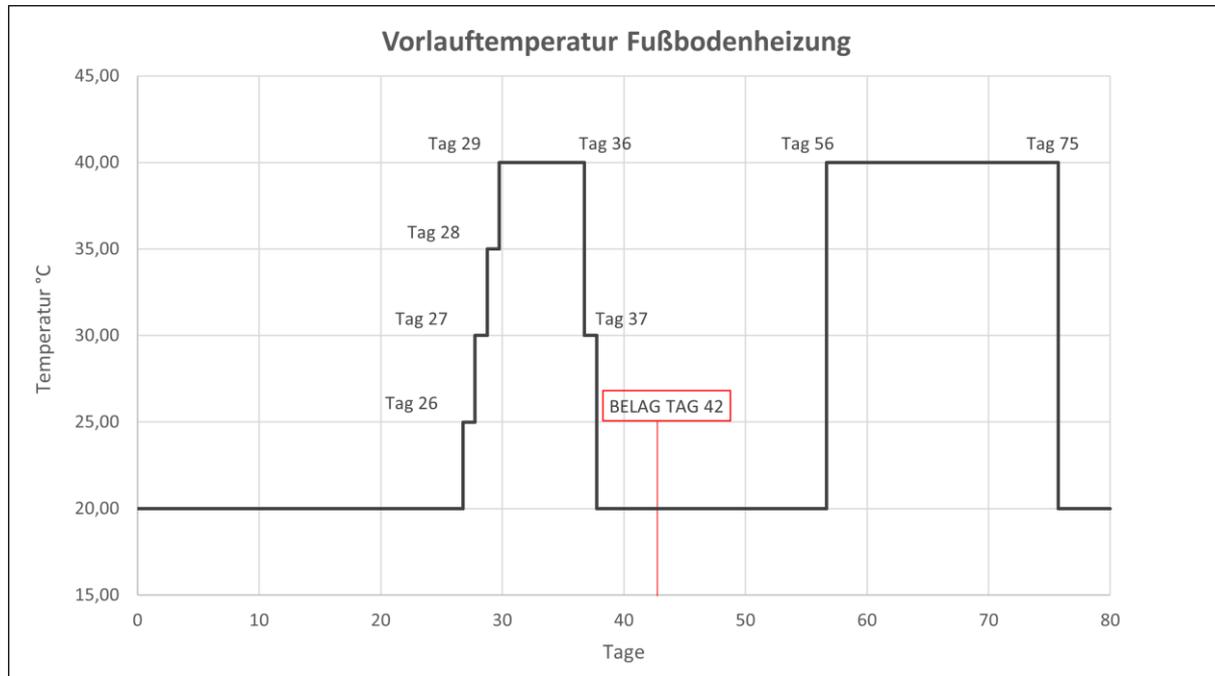
Wie bereits erwähnt wurde zu jedem Luftfeuchtigkeitssensor auch ein Temperatursensor installiert. Um sich im Anschluss die aufgezeichneten Temperaturwerte anzusehen, ist es wichtig vorab den Verlauf der Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung zu kennen.

Im Diagramm 6 ist ersichtlich, dass die Fußbodenheizung am 26. Tag auf 25 °C gestellt wurde und täglich um 5 °C erhöht wurde. Beim Erreichen der maximalen Vorlauftemperatur von 40 °C wurde diese über 7 Tage konstant gehalten. Um die 1. Ausheizphase zu beenden, wurde die Temperatur der Fußbodenheizung täglich um 10 °C reduziert bis die Raumtemperatur von 20 °C am 37. Tag wieder erreicht wurde. Rund 18 Tage später wurde die Vorlauftemperatur in einer 2. Ausheizphase direkt auf 40 °C gestellt und rund 19 Tage später wieder auf 20 °C zurückgesetzt.

Diagramm 7 und Diagramm 8 zeigen nun die aufgezeichneten Temperaturen auf verschiedenen Höhen im Aufbau jeweils direkt über einem Heizungsrohr und zwischen zwei Heizungsrohren an. Während des Versuches sind manche Sensoren ausgefallen, diese wurden in den Legenden der

Diagramme gekennzeichnet. Kurz nach dem Beginn der zweiten Ausheizphase gab es einen Ausfall des Computers, wodurch über mehrere Tage keine Aufzeichnungen erfolgt sind.

Diagramm 6: Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung über die Versuchsdauer



Zum leichteren Verständnis werden in der weiteren Analyse den Sensoren folgende Bezeichnungen zugeordnet:

- **Block P1-ü:** Sensor 211 – 215 in der Probe 1 über dem Heizungsrohr
- **Block P1-z:** Sensor 216 – 220 in der Probe 1 zwischen den Heizungsrohren
- **Block P2-ü:** Sensor 206 – 210 in der Probe 2 über dem Heizungsrohr
- **Block P2-z:** Sensor 201 – 205 in der Probe 2 zwischen den Heizungsrohren

Es ist auffällig, dass in allen Blöcken die Temperatur in den ersten 3 Tagen eine kurzzeitige Erhöhung um rund 5 °C erfährt. Diese Erscheinung ist auf die freigesetzte Hydratationswärme beim Abbinden des Zementes zurückzuführen. Bis zur Aktivierung der Fußbodenheizung auf eine Vorlauftemperatur von 20 °C am 25. Tag zeichneten alle funktionierenden Wärmefühler eine Temperatur um die 19 °C bei einer Raumtemperatur von 20 °C auf.

Während der 1. Ausheizphase ist zu erkennen, dass die Fühler über dem Rohr eine höhere Temperatur als an der Estrichoberfläche aufgezeichnet haben. Der Block P1-ü zeigt diesen Sachverhalt besonders deutlich. Zwischen Sensor 215 und 213 liegen 3 cm Estrichstärke und der Temperaturunterschied beträgt rund 1 °C. Umgekehrt sieht das Ganze bei den Wärmefühlern aus, welche zwischen den Heizungsrohren platziert sind. Hier zeigt sich, dass die Sensoren, welche

näher zur Oberfläche liegen eine geringfügig höhere Temperatur aufgezeichnet haben. Gut erkennbar ist es beim Block P1-z zwischen dem 30. und 36. Tag.

Generell lässt sich sagen, dass die Differenz zwischen Vorlauf- und Estrichtemperatur immer größer wurde mit Zunahme der Ausheiztemperatur. Die Abbildung 30 zeigt, dass die durch eine Wärmebildkamera aufgezeichnete Temperatur der Estrichoberfläche etwa 27,3 °C bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C beträgt. Weiters zeigte sich, dass der Estrich direkt über dem Heizungsrohr etwas wärmer war als der Estrich zwischen den Heizungsrohren.

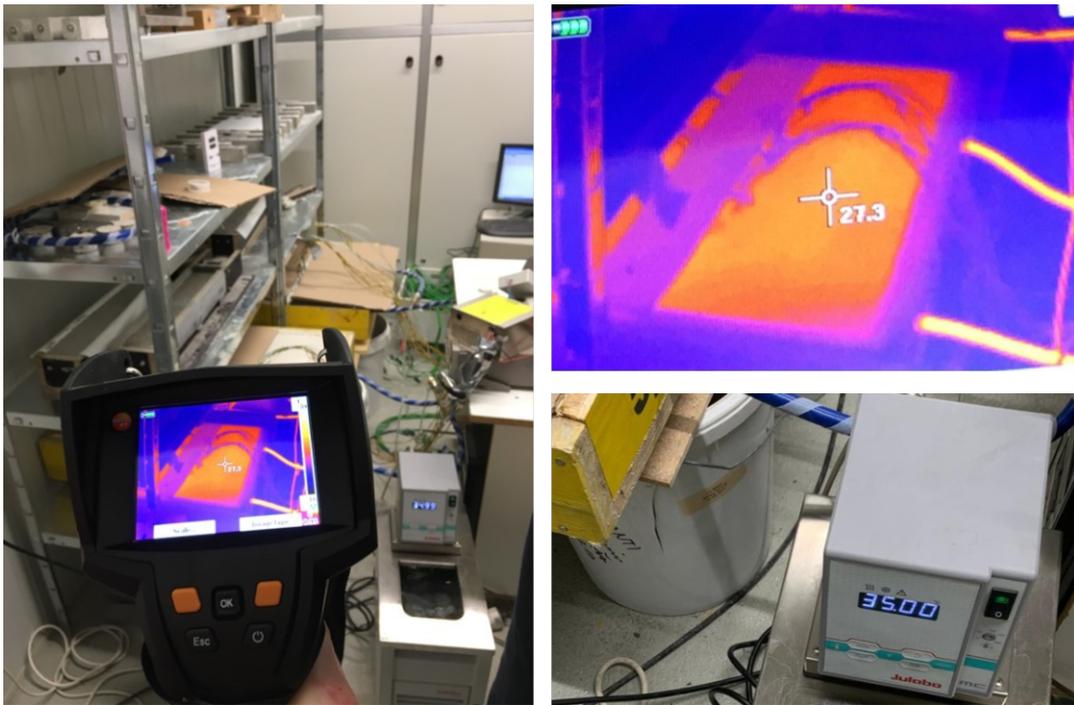


Abbildung 30: Wärmebild-Estrichtemperatur 27,3 °C bei 35 °C Vorlauftemperatur

Diagramm 7: Temperaturverlauf Probe 1

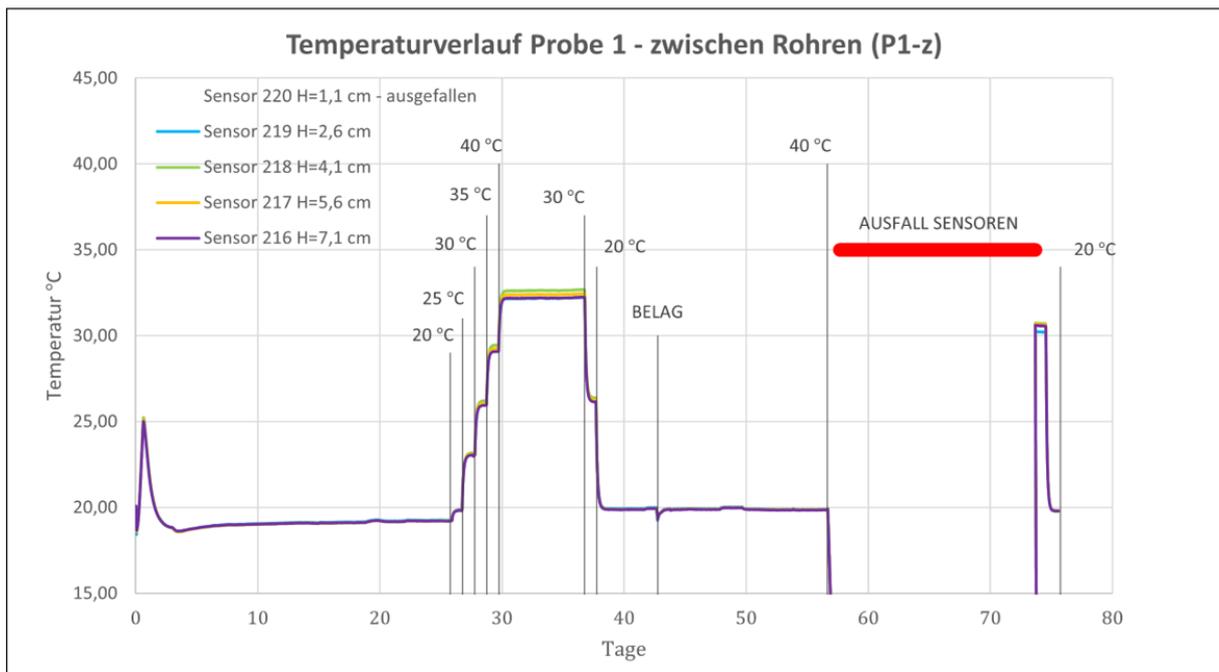
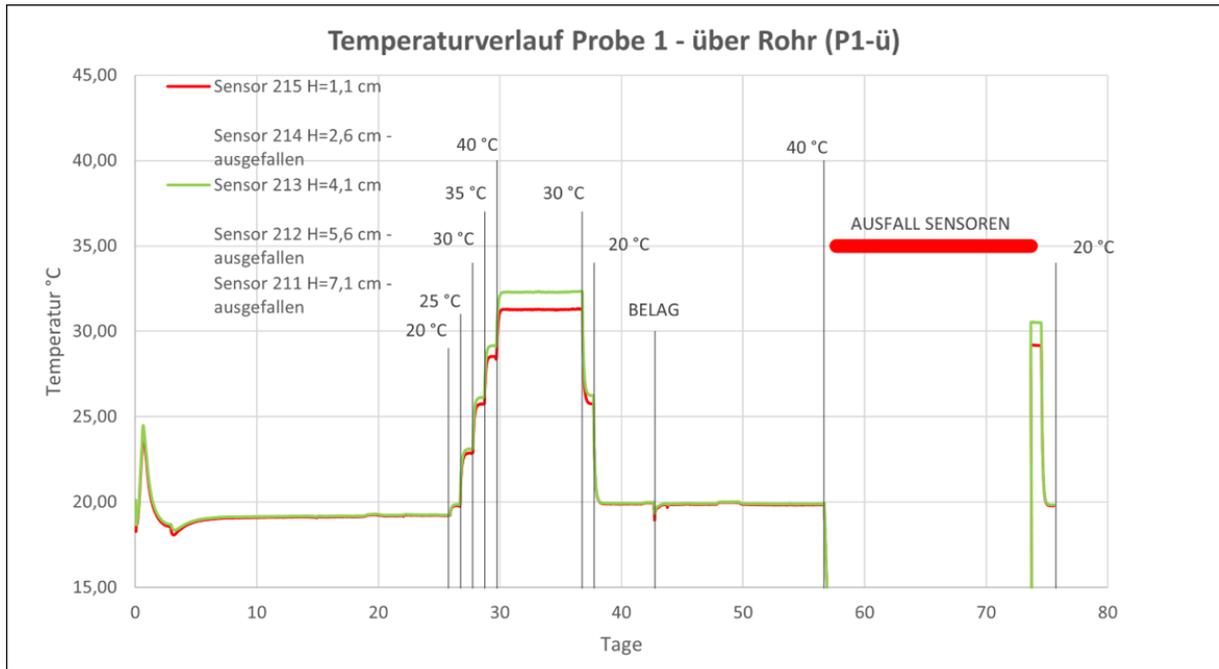
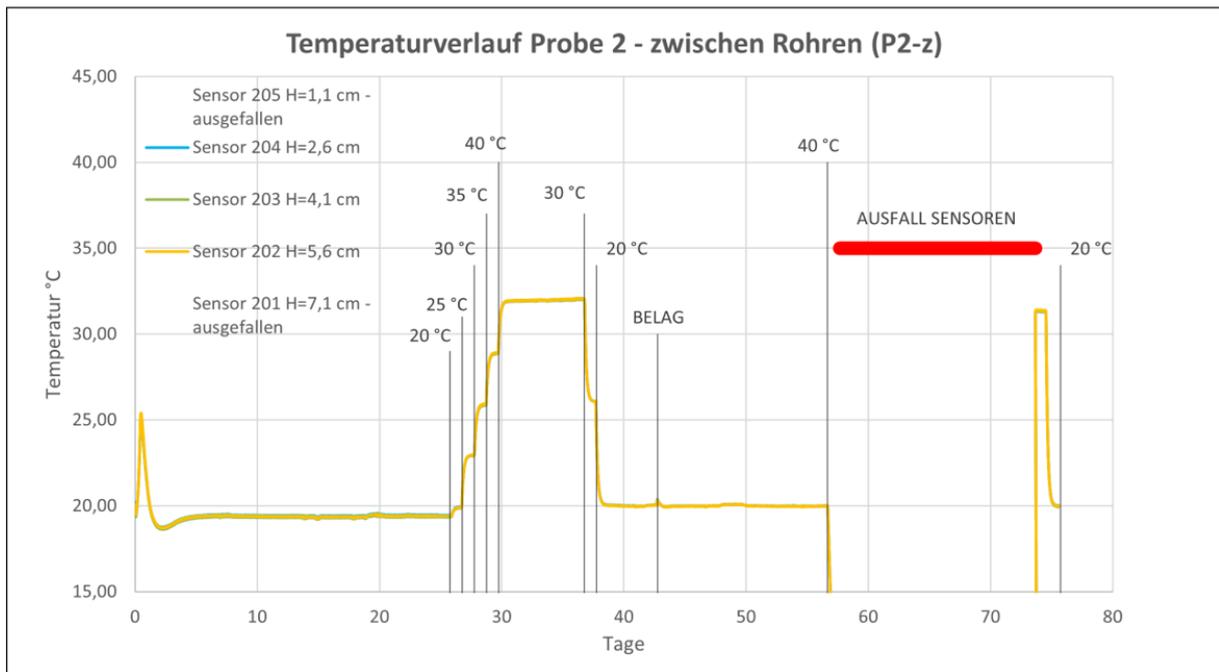
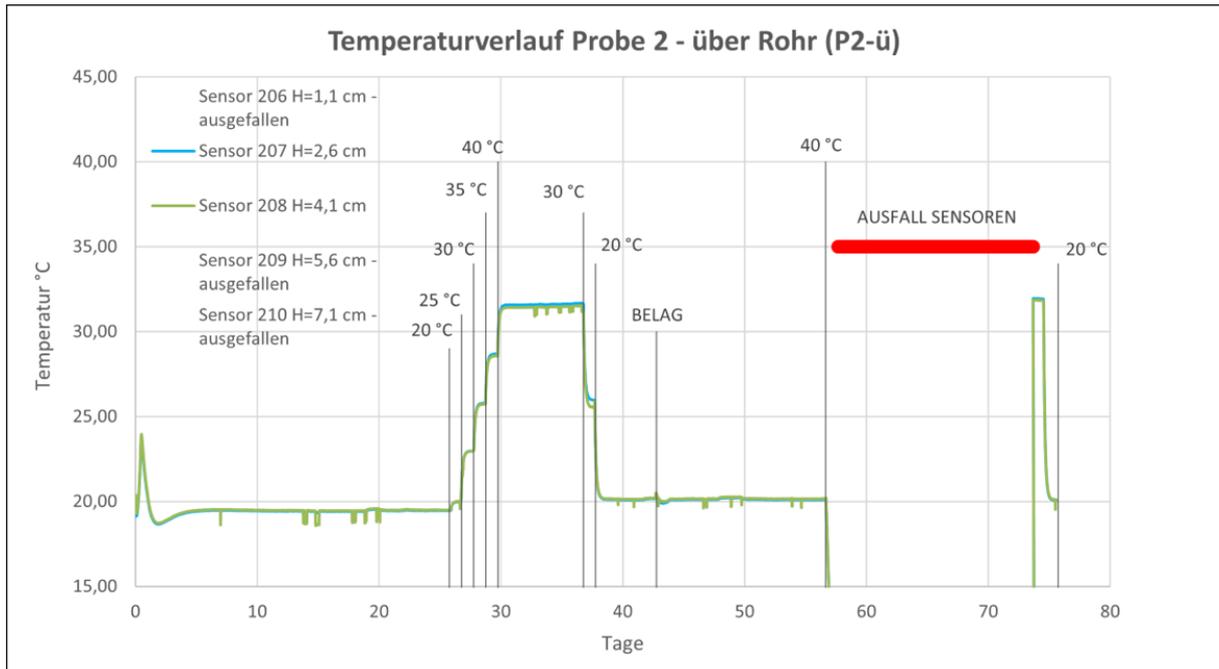


Diagramm 8: Temperaturverlauf Probe 2



3.4.2 Trocknungsverhalten der Heizstrichproben

Der Trocknungsverlauf innerhalb der beiden Estrichproben wurde auf fünf Höhen im Aufbau mit den Luftfeuchtigkeitssensoren gemessen und in den nachfolgenden Diagrammen über die gesamte Versuchsdauer dargestellt. Zum leichteren Verständnis werden den Sensoren die folgenden Bezeichnungen zugeordnet:

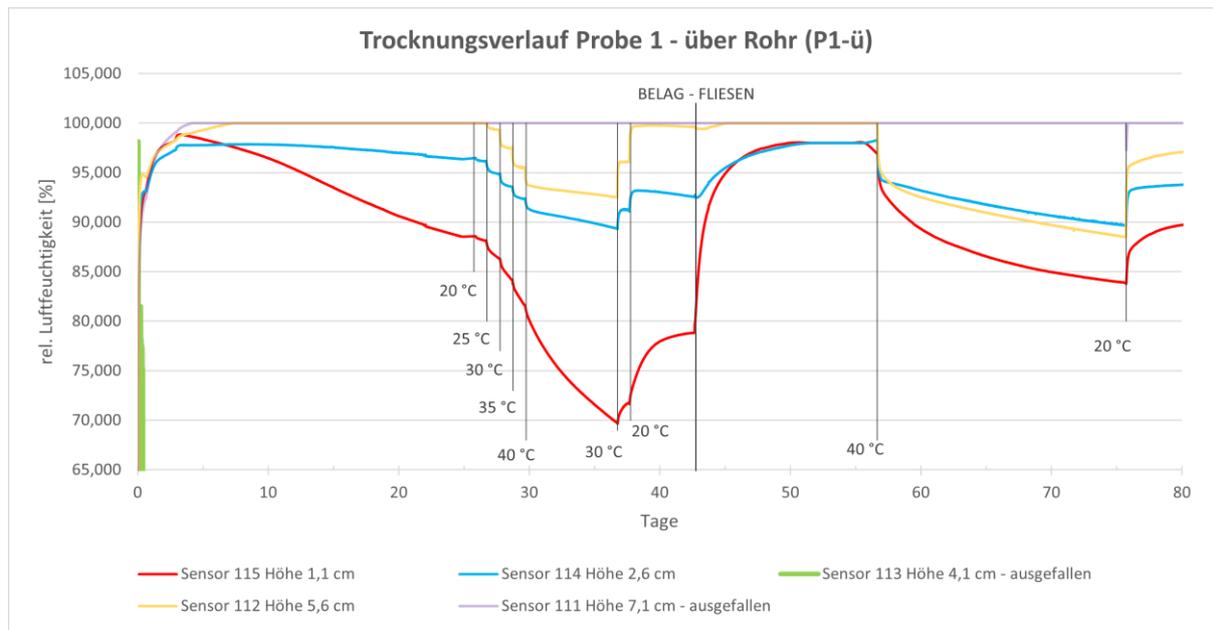
- **Block P1-ü:** Sensor 111 – 115 in der Probe 1 über dem Heizungsrohr (Diagramm 9)
- **Block P1-z:** Sensor 116 – 120 in der Probe 1 zw. den Heizungsrohren (Diagramm 10)
- **Block P2-ü:** Sensor 106 – 110 in der Probe 2 über dem Heizungsrohr (Diagramm 11)
- **Block P2-z:** Sensor 101 – 105 in der Probe 2 zw. den Heizungsrohren (Diagramm 12)

Pro Probekörper wurde jeweils ein Block mit Sensoren über dem Heizungsrohr und ein Block zwischen den Heizungsrohren platziert. Jeder Block enthielt fünf Sensoren, wie in Abbildung 12 und Abbildung 13 beschrieben. Während der Versuchsdauer von 80 Tagen sind wenige Sensoren ausgefallen. Der Vollständigkeit halber wurden auch diese Feuchtigkeitsfühler in den Diagrammen dargestellt und in der Legende als solche gekennzeichnet.

Diagramm 9 zeigt den Trocknungsverlauf der Probe 1 über dem Heizungsrohr. Es ist erkennbar, dass die Probe erwartungsgemäß von oben nach unten getrocknet ist. Der Sensor 115, welcher 1,1 cm unter der Estrichoberfläche lag, wies eine niedrigere Feuchtigkeit und eine steilere Abnahme im Vergleich zu tiefer angeordneten Sensoren auf. Man erkennt, dass der Trocknungsverlauf vor der 1. Ausheizperiode relativ langsam verlief. Nach Aktivierung der Fußbodenheizung am Tag 26 auf die Vorlauftemperatur von 25 °C wurde auch die Steigung der Funktion deutlich erhöht. Zu beobachten ist, dass durch die Erwärmung der Luft während der Heizphase die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft stieg und somit der Estrich trockener erschien auf den ersten Blick als es im Diagramm, dass die relative Luftfeuchtigkeit zeigt, dargestellt ist. Es ist jeder Temperaturanstieg von 5 °C aufgrund des stufenförmigen Abfalls der relativen Luftfeuchtigkeit erkennbar. In den 11 Tagen der 1. Ausheizphase verlor der Estrich mehr Feuchtigkeit als in den ersten 26. Tagen ohne Beheizung.

Nachdem die 1. Ausheizperiode zu Ende ging, wurde die Vorlauftemperatur der Raumtemperatur von 20 °C angepasst, was einen Feuchtigkeitsanstieg im Estrich auslöste.

Diagramm 9: Trocknungsverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr



Am Tag 42 wurde ohne vorherige CM-Messung der Belag auf beide Proben aufgebracht. Auf Probe 1 brachte man Fliesen und auf Probe 2 einen Parkettbelag auf. Im Diagramm 9 zeichnet sich daraufhin eine sofortige Zunahme der Restfeuchtigkeit im Aufbau ab. Vor allem die Sensoren, die sich näher zur Oberfläche befanden, registrierten eine Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit von bis zu 20 % und erkannten Werte wie zu Beginn der 1. Ausheizphase oder sogar höher. Diese Erkenntnis bestätigt den bereits im Kapitel 2.4.1 beschriebenen Sachverhalt, dass der Diffusionsstrom beim austrocknenden Estrich in Richtung der Oberfläche geht und sich unter dem Belag bei zu nassem Estrich eine Tauebene bildet. Die Schwankungen der Restfeuchtigkeit wirken sich besonders im oberen Bereich der Probenhöhe aus, da dort die Feuchtigkeit schneller aus der Probe entweicht und dafür auch schneller wieder von der Probe aufgenommen wird. Da im Block P1-ü der unterste Sensor 111 ausgefallen ist, können wir auch anhand von Sensor 112 auf der Höhe von 5,6 cm erkennen, dass die Feuchtigkeit im unteren Probedrittel nur durch die Ausheizperiode verändert wurde. Nach der 1. Ausheizung hat sich der Feuchtigkeitsgehalt, unabhängig von der Belagsverlegung, wieder auf 100 % eingestellt und blieb bis zur 2. Ausheizphase unverändert hoch. Im letzten Drittel der Versuchsdauer zeigte sich erneut, dass durch eine 2. Heizphase die Restfeuchtigkeit in allen Aufbauhöhen reduziert wurde und die Funktionen sich einander annäherten. Das bedeutet, dass über die Zeit gesehen, der untere Estrichbereich immer nasser ist als der obere, jedoch wird die Differenz der Restfeuchtigkeit über die Probenhöhe betrachtet geringer. Nach dem Ende der 2. Heizphase stellte sich erneut eine höhere Feuchtigkeit ein.

Diagramm 10: Trocknungsverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren

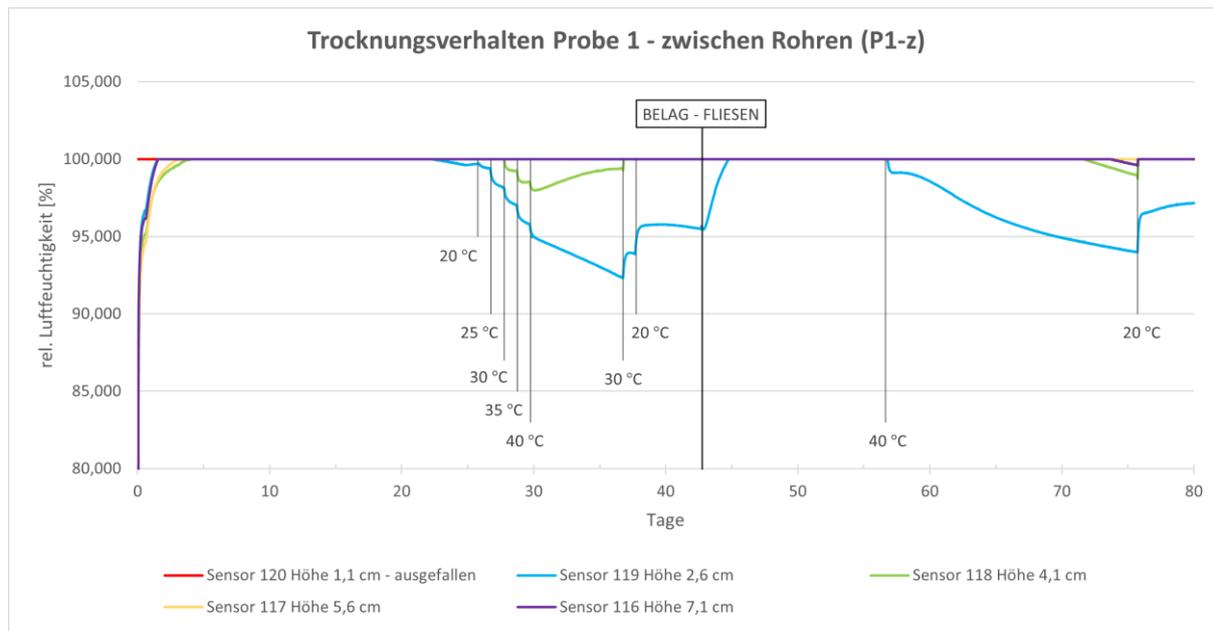


Diagramm 10 zeigt den Trocknungsverlauf in der Probe 1 zwischen den Heizungsrohren. Der Block P1-z hatte die meisten Sensorenausfälle. Lediglich auf der Höhe 2,6 cm und 4,1 cm wurden Werte aufgezeichnet. Sensor 116 und 117 zeichneten konstant einen Wert von 100 % auf. Man kann nun nicht mit Sicherheit sagen, ob das den tatsächlichen Gegebenheiten entsprach oder eine Fehlaufzeichnung war. Diese zwei Feuchtfühler sind die untersten Sensoren im Aufbau, somit ist es einerseits realistisch, dass dort die Feuchtigkeit sehr hohe Werte erreichte, andererseits ist es merkwürdig, dass erst am Ende der 2. Ausheizphase eine geringfügige Schwankung auftrat.

Diagramm 11 veranschaulicht die Feuchtigkeitswerte der mit Parkett belegten Probe 2 über dem Heizungsrohr. Im Block P2-ü ergab sich die Problematik, dass zeitlich benachbarte Feuchtigkeitswerte eine sehr große Streuung aufwiesen und sich auf den ersten Blick eine unregelmäßige Funktion darstellte. Aus diesem Anlass wurde für alle Funktionen im Block P2-ü ein gleitender Durchschnitt über 255 Werte gebildet, wodurch sich eine glattere Kurve ergab. Trotz dieser Schwierigkeiten konnte man ähnliche Informationen wie aus Diagramm 9 ablesen. In diesem Block veränderte sich der Feuchtigkeitsgehalt am stärksten während der 1. Ausheizphase, nach dem Aufbringen des Belags und zum Schluss erneut durch die 2. Ausheizphase. Der obere Bereich des Prüfkörpers erfuhr größere Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Probekörper als die Unterseite. Es zeigte sich, dass durch das Aufbringen des Belags die Feuchtigkeit eindeutig zunahm. Diese Erkenntnis ist für die Praxis ausschlaggebend. Sie beweist, dass die Belagsverlegung ein massiver Eingriff in den Feuchtigkeitshaushalt des Estrichs ist und deutlich den Feuchtestrom verändert. Obwohl der Estrich nach dem Ausheizen deutlich trockener erscheint als davor, kann der Belag den Feuchtigkeitsgrad bzw. dessen Verteilung über den Querschnitt deutlich verschlechtern.

Diagramm 11: Trocknungsverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr

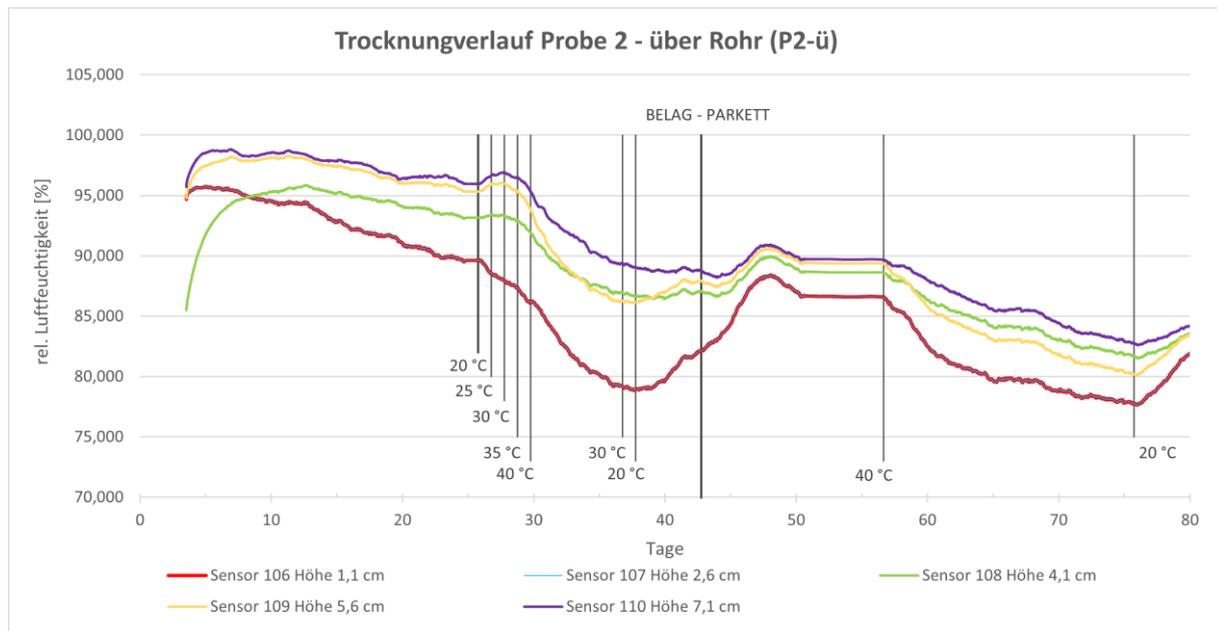
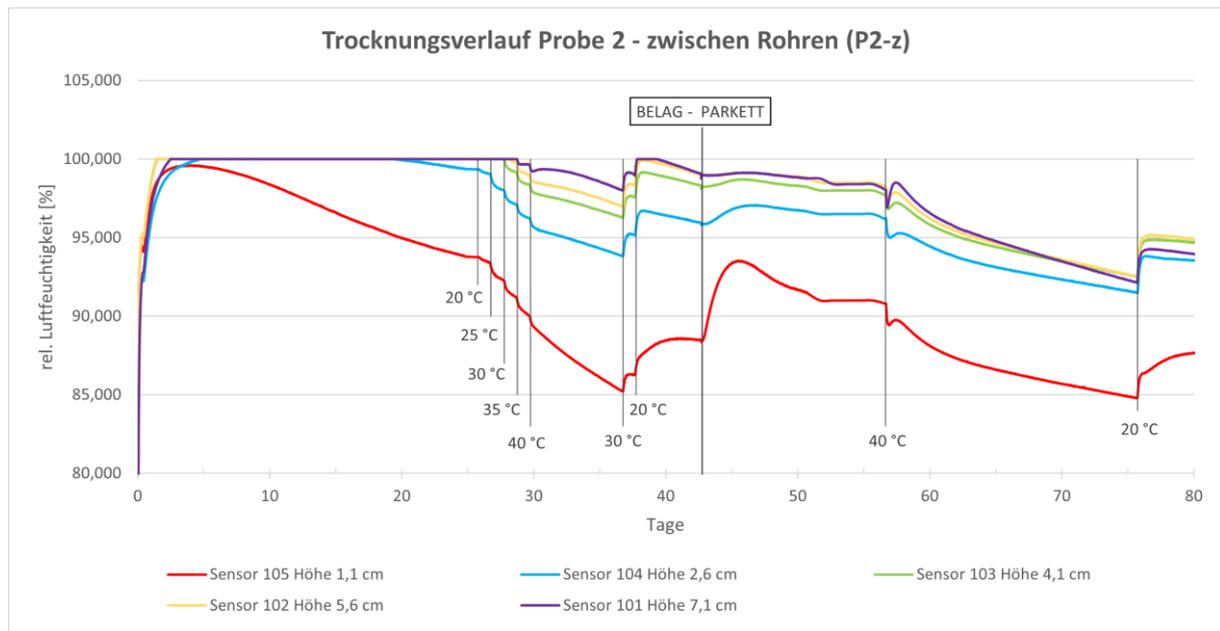


Diagramm 12 zeigt den Trocknungsverlauf der Probe 2 zwischen den Rohren. Die bisher beschriebenen Effekte zeigten sich auf gleiche Art und Weise auch bei den Aufzeichnungen des Blocks P2-z. Ein interessanter Vergleich lässt sich zwischen der Entwicklung der Feuchtigkeitswerte beim Fliesen- und Parkettbelag machen. Es scheint, als ob nach dem Aufbringen der Fliesen die Feuchtigkeit deutlich höher anstieg als beim Aufbringen des Parketts. Die Erklärung liegt bei der Dampfdichtheit der beiden Materialien. Der Fliesenbelag stellt eine dampfdichtere Ausführung dar und sperrt den Diffusionsstrom zum größeren Teil in der Konstruktion ein im Vergleich zum Parkett. Signifikant zeigt sich hier die rund 7 % trockenere Oberfläche gegen Ende des Versuchs im Bezug zu den darunter liegenden Schichten, welche alle relativ ähnliche Feuchtigkeitswerte aufzeigten.

Diagramm 12: Trocknungsverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren

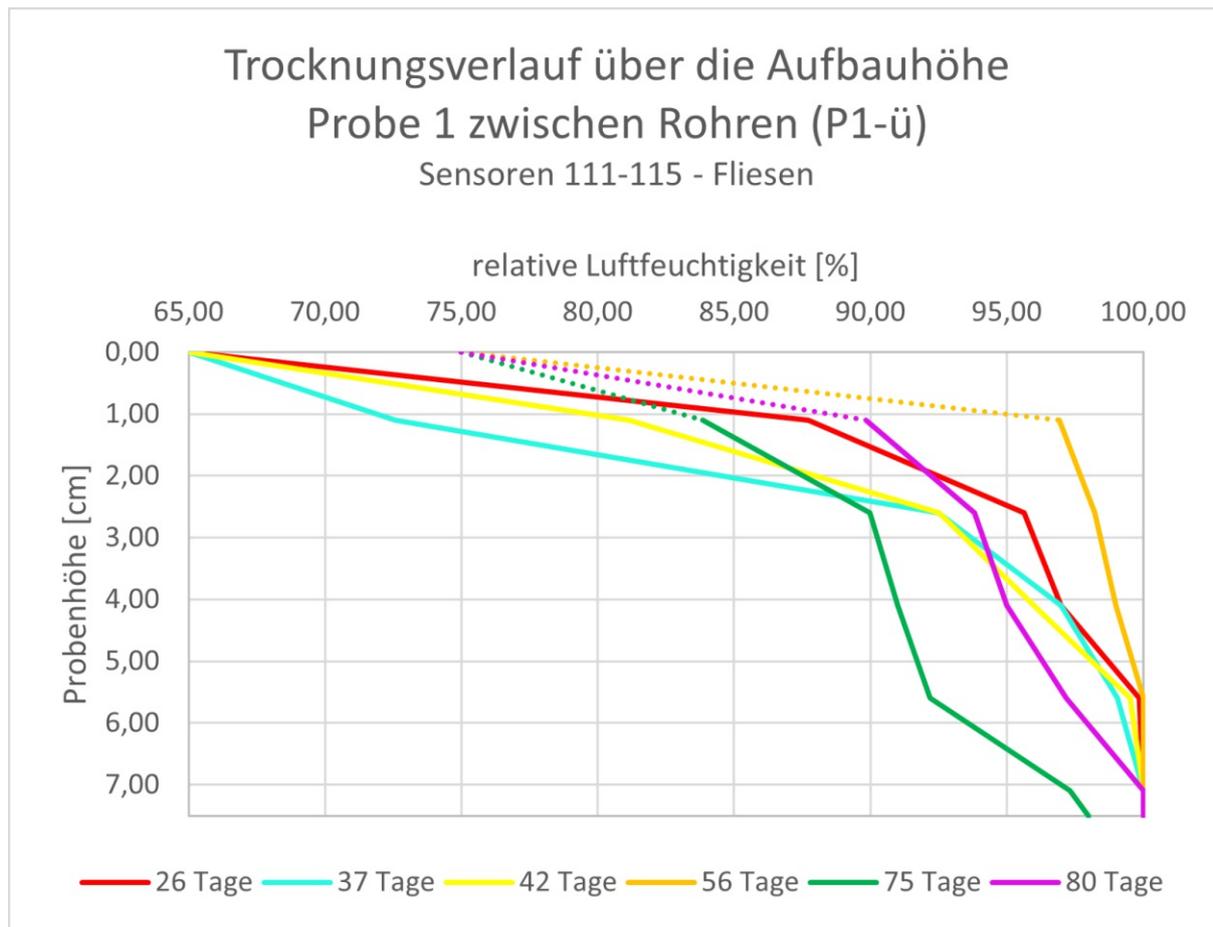


Zur besseren Veranschaulichung der Erkenntnisse aus dem Hauptversuch wurden die Ergebnisse in den Diagrammen 13 - 15 dargestellt. Die Darstellungen zeigen die Feuchtigkeitsverteilungen der Blöcke P1-ü, P2-ü und P2-z über die Probenhöhe an verschiedenen Tagen. Auf der X-Achse wurde die von den Sensoren aufgezeichnete relative Luftfeuchtigkeit in % aufgetragen und auf der Y-Achse die Höhenlage des jeweiligen Sensors.

Der Raum, in welchem die Proben verwahrt wurden, hatte konstant eine Temperatur von 20 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 65 %. Daher hat der Y-Wert = 0,00 bis zur Belagsverlegung die relative Luftfeuchtigkeit von 65 % zugeteilt bekommen. Wie bereits erwähnt, wurde im Zuge der Untersuchungen an den Höhen 1,1 cm, 2,6 cm, 4,1 cm, 5,6 cm und bei 7,1 cm die relative Feuchtigkeit im Estrich gemessen. Da die Stärke der Estrichproben 7,5 cm betrug, mussten die Feuchtigkeitswerte unter 7,1 cm extrapoliert werden. Die einzelnen gemessenen Feuchten wurden miteinander verbunden, um den Verlauf über die Aufbauhöhe zu erhalten.

Der Block P1-z wurde grafisch nicht dargestellt, weil zu viele Sensoren ausgefallen waren, um ein schlüssiges und aussagekräftiges Bild zu erhalten.

Diagramm 13: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P1-ü



Der Block P2-ü hat die größte Aussagekraft über das Trocknungsverhalten der Estrichprobe vor und nach der Belagsverlegung. Deshalb wird das Ergebnis anhand Diagramm 14 im Detail erläutert.

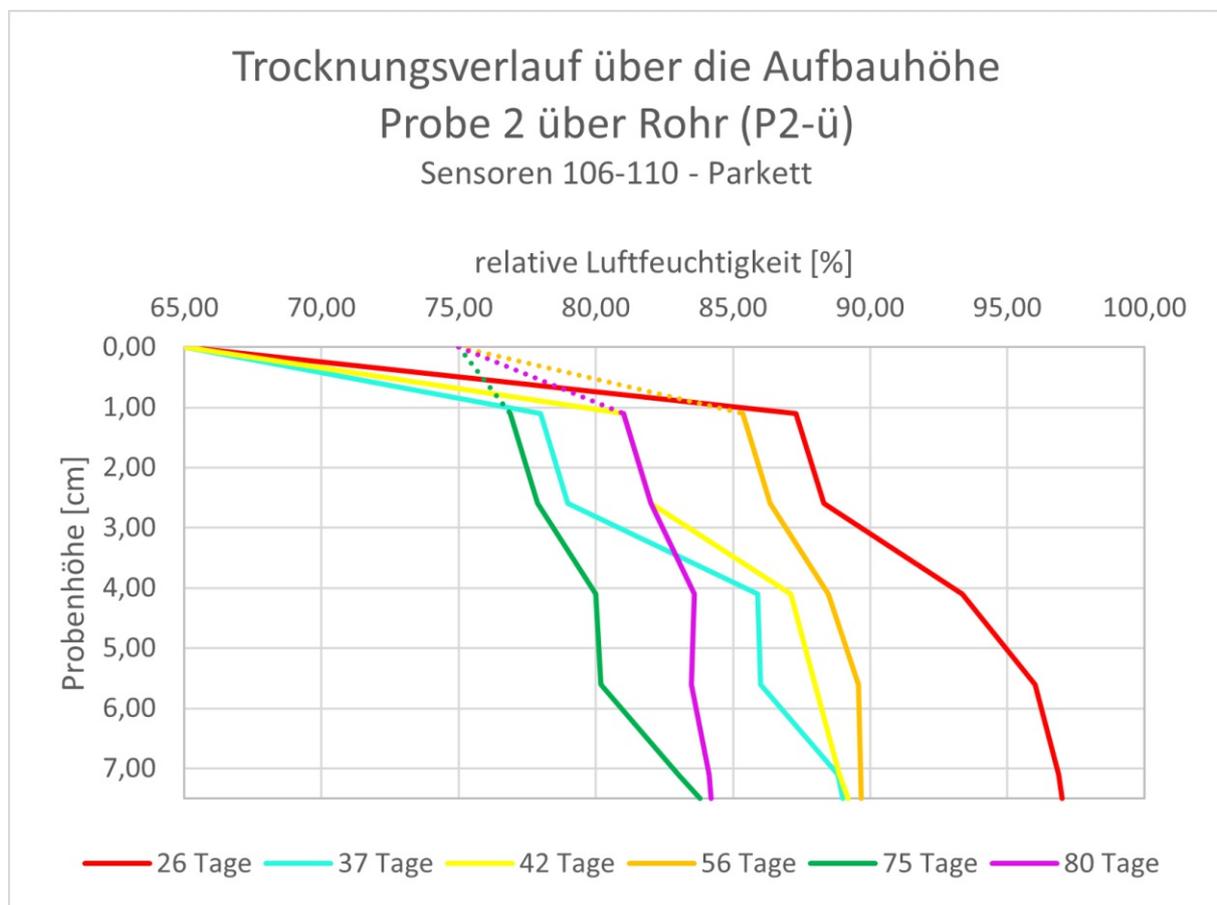
Bis zum 26. Tag konnten die Estrichproben in der Klimakammer 20/65 langsam trocknen. In der Darstellung zeigt sich der vorherrschende Feuchtigkeitsgehalt über die Probenhöhe anhand der roten Linie. Im Block P2-ü stellt dieser Zustand den nassesten Zustand des Estrichs dar in Bezug auf die darauffolgenden. Nun wurde mit der 1. Ausheizphase begonnen und der Estrich trocknete zu einem gewissen Grad aus. Am 37. Tag, zugleich auch das Ende der 1. Ausheizphase, sieht man anhand der türkisen Linie, dass diese weiter links im Diagramm 14 liegt im Vergleich zur Linie vom 26. Tag. Das zeigt, dass der Estrich durch das Heizen an Feuchtigkeit verloren hatte.

Am 42. Tag erfolgte die Belagsverlegung, jedoch wurde vom 37. Tag an nicht mehr geheizt und der Feuchtigkeitsverlauf über die Probenhöhe nahm wieder zu. Das zeigt sich dadurch, dass die gelbe Linie im Vergleich zur türkisen Linie nach rechts verlegt wurde und somit einen nasserem Estrich bedeutet. Die orange Linie für den 56. Tag wanderte in der Zwischenzeit noch weiter nach rechts. Diese negative Auswirkung auf den Trocknungsverlauf resultierte aus der Belagsverlegung auf dem nicht belegreifen Estrich. Am 56. Tag wurde mit der 2. Ausheizphase begonnen mit einer

Vorlaufemperatur von 40 °C, was wiederum eine günstige Auswirkung auf den Trocknungsverlauf des Heizestrichs nach der Belagsverlegung hatte. Der resultierende Zustand zeigt sich anhand der grünen Linien. Am 75. Tag war die 2. Ausheizphase zu Ende. Dadurch zeichneten die Sensoren einen Anstieg der Feuchtigkeit am 80. Tag in der Estrichprobe auf. Der 80. Tag stellt sich durch die lila Linie im Diagramm 14 dar. Wie bereits zuvor beschrieben ist ein Teil der geringen relativen Luftfeuchtigkeit während der Heizphase auf die größere Wasseraufnahmefähigkeit der Luft zurückzuführen.

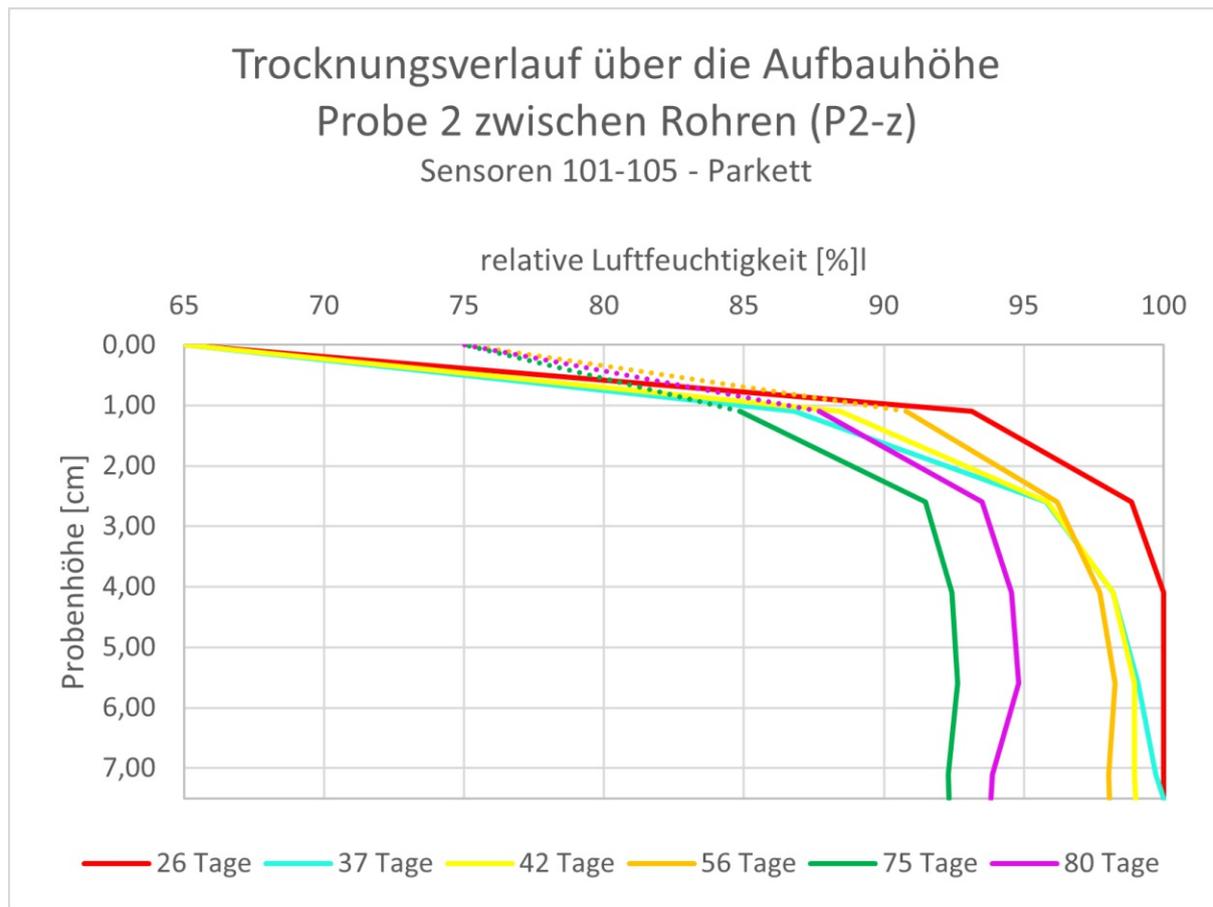
Die beschriebenen Effekte durch die Ausheizung und durch den Belag spiegeln sich auch in den Blöcken P1-ü und P2-ü wider. Die Tatsache, dass der Estrich von oben nach unten austrocknet, hat sich auch in dieser Darstellung der Ergebnisse abgezeichnet.

Diagramm 14: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P2-ü



Durch das Bilden des gleitenden Durchschnittes bei den Ergebnissen der Sensoren 106 – 110, wie vorhin beschrieben, liegen die einzelnen Linien im Diagramm 14 etwas weiter auseinander als bei dem Diagramm 13 und Diagramm 15.

Diagramm 15: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P2-z



Wie man aus allen Diagrammen in diesem Kapitel erkennen kann, war der Estrich am 42. Tag bei beiden Proben nicht belegereif, da die relative Luftfeuchtigkeit bei allen Proben teils weit über 80 % lag. Nachdem der Versuch beendet war, konnte man deutliche Schäden in Form von Ablösen des Belags erkennen.

Die Fliesen auf der Probe 1 und das Parkett auf der Probe 2 hatten sich aufgewölbt. Durch Klopfen auf der Belagsoberfläche war aufgrund des Geräusches erkennbar, dass sich unter dem Belag Hohlräume gebildet haben, durch das Lösen des Verbundes von Belag und Estrich. Anhand Abbildung 31 sieht man, dass sich die Fliesen etwa 0,5 cm vom Estrich abgehoben haben. Das Parkett hat sogar einen größeren Spalt gebildet. Die Latte auf der Probe 2 demonstriert die konvexe Verwölbung vom Parkett. Die Schadensbilder sollen zum Abschluss dieser Untersuchungen die Essenz des gegenständlichen Untersuchungsthemas verdeutlichen und welche Folgen eine verfrühte Belagsverlegung mit sich ziehen kann.

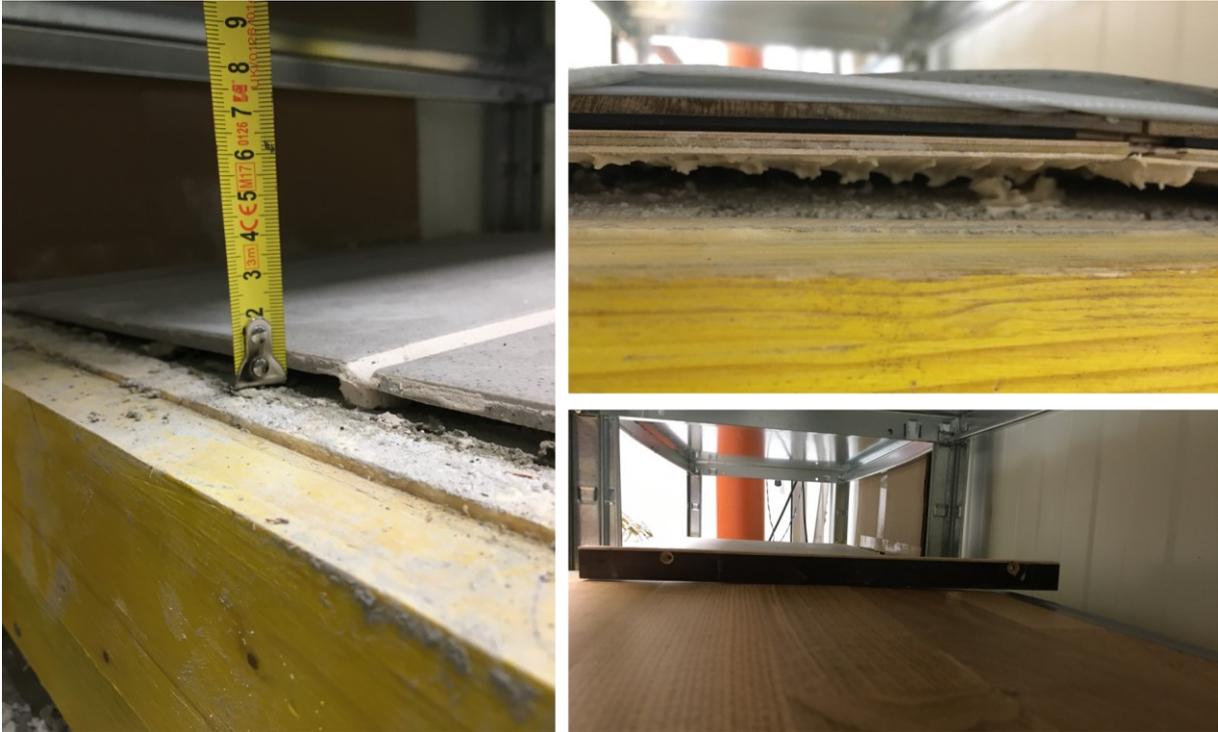


Abbildung 31: Ablösen des Belages bei Probe 1 und 2 durch zu hohe Feuchtigkeit im Estrich

4 Zusammenfassung

4.1 Wichtigste Ergebnisse und Antwort auf die Forschungsfrage

Der Versuch zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Heizestrichen nach Belagsverlegung wurde anhand von zwei Zementestrichproben E225 mit einer Größe von 66,4 x 66,4 cm und einer Stärke von 7,5 cm durchgeführt. Die Proben wurden in einer Klimakammer mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % gelagert. Am Tag 26 wurde die 1. Ausheizphase begonnen und hielt 11 Tage an. Am 42. Tag wurde auf die Probe 1 ein Fliesenbelag und auf die Probe 2 ein Parkettbelag aufgebracht. Zwischen dem 56. und 75. Tag wurde erneut aufgeheizt. Am 80. Tag wurde der Versuch beendet.

Anhand von fünf Messebenen in jeder Probe an zwei Stellen konnten die Prozesse während der Trocknungsphase mit Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensoren erfasst werden.

Vor Belagsverlegung

Es zeigte sich, dass der Estrich generell von oben nach unten austrocknet. Nach 26 Tagen ergaben sich in einer Tiefe von 1,1 cm Werte für die relative Luftfeuchtigkeit von bis zu 90 %, wobei die Sensoren auf 7,1 cm Tiefe noch immer bei 100 % lagen. Nach Beginn der 1. Ausheizphase konnte festgestellt werden, dass der Estrich über alle Höhen an Feuchtigkeit verlor, aber ganz besonders im oberen Probendrittel. Mit dem Ende der Ausheizphase stellte sich über die gesamte Aufbauhöhe erneut höhere Feuchtigkeit ein. Im unteren Bereich der Probe stiegen die Werte teilweise wieder auf 100 % an.

Nach Belagsverlegung

Nach dem Aufbringen des Belags am 42. Tag wurde deutlich erkennbar, dass sich dieser negativ auf den Trocknungsverlauf auswirkte. Die Feuchtigkeit stieg in den Wertebereich zwischen 90 und 100 %, besonders im oberen Probendrittel an. Bei der Probe mit dem Fliesenbelag konnte sogar ein Anstieg um rund 20 % vernommen werden auf einer Messhöhe von 1,1 cm unter der Oberfläche. Der Trocknungsprozess verlief nun deutlich langsamer als in den ersten 26 Tagen ohne Belag. Nach dem Beginn der 2. Heizphase wurde ein Feuchtigkeitsverlust bei allen Sensoren, der zum Teil durch die höhere Wasseraufnahmefähigkeit der wärmeren Luft bedingt war, wahrgenommen. Nach dem Ausheizvorgang stiegen jedoch die Werte erneut an. Am 80. Tag am Ende der Versuchsdurchführung waren auf allen Messebenen über 80% relative Luftfeuchtigkeit gemessen worden. Jedoch war die Differenz der Feuchtigkeit zwischen den obersten und untersten Sensoren geringer geworden als nach der 1. Ausheizphase.

Der Versuch brauchte die Erkenntnis, dass besonders das obere Probendrittel größeren Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt ist. Ohne Belag sind diese Schwankungen betragsmäßig größer, weil sich durch den Belag die Feuchtigkeit im Estrich leichter verteilt.

Aufgrund der Belagsverlegung vor Erreichen der Belegereife wölbten sich sowohl die Fliesen als auch der Parkettbelag auf, bildeten darunter Hohlräume und verloren damit ihren Verbund zum Estrich.

4.2 Ausblick

In der gegenständlichen Diplomarbeit wurden die Untersuchungen an Heizzementestrichplatten durchgeführt. Da in der Praxis auch andere Estricharten wie Calciumsulfatestrich oft eingesetzt werden, wäre es sicherlich interessant die gleichen Untersuchungen auch an diesen vorzunehmen, um einen Vergleich zu den Erkenntnissen auf Grundlage des Zementestrichs ziehen zu können.

Die oben vorgestellten Versuche wurden im Labor unter geregelten klimatischen Bedingungen durchgeführt und stellten natürlich ideale Verhältnisse für die Estrichtrocknung dar. In der zukünftigen Nachforschung wäre es denkbar, die Untersuchungen auf einer Baustelle zu machen. Damit könnte die Auswirkung sämtlicher Umwelteinflüsse erkannt werden, welche im Labor nicht gegeben sind.

Weiters wäre es sinnvoll, die hygro-thermischen Vorgänge mittels eines Computerprogrammes zu simulieren, was derzeit aufgrund teilweise fehlender Kennzahlen sowie Softwareeigenschaften, welche Hydratation des Zementes berücksichtigen, schwierig ist. Diese Arbeit stellt die versuchsmäßig ermittelten Werte für einen Vergleich mit einer Simulation zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

1. **Kolbitsch, Andreas.** *Hochbaukonstruktionen I - Teil B.* [Hrsg.] Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung. 2018.
2. **Arbeitsgemeinschaft Estrich.** Planungs- und Ausführungsrichtlinie für Fliessestriche. 04 2017, 5.
3. **Schnell, Werner.** Das Trocknungsverhalten von Estrichen - Beurteilung und Schlussfolgerung für die Praxis. 1994.
4. **Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.** *Luft.* [Online] 15. 04 2021. [Zitat vom: 19. 04 2021.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Luft#Wasserdampf>.
5. **Riccabona, Christof und Bednar, Thomas.** *Baukonstruktionslehre 4, Bauphysik.* Wien : Manz Verlag Schulbuch, 2008.
6. **Grimm, Roland.** *Baustoff Wissen.* [Online] 16. 10 2014. [Zitat vom: 20. 04 2021.] <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/bauphysik/wassergehalt-baustoff-wasserdampfdiffusion-feuchtegehalt/>.
7. **Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.** *Baufeuchte.* [Online] 07. 11 2020. [Zitat vom: 20. 04 2021.] <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Baufeuchte&oldid=205273651> .
8. **Rieche, Günther.** Bewertung der Belegreife von Estrichen mit hygrometrischen Verfahren. *Estrich Technik & Fußbodenbau 24.* 2008, 143, S. 10-15.
9. **Vittek, Hannes.** Richtlinie zur Bestimmung der Feuchtigkeit von Estrich nach der Calciumcarbid-Methode (CM-Methode). [Hrsg.] Bundesinnung der Bauhilfsgewerbe Bundesberufsgruppe der Bodenleger. Wien : s.n., 2019.
10. **Technische Kommission Bauklebstoffe.** *TKB-Bericht 2: Belegreife und Feuchte - Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen.* s.l. : Industrieverband Klebstoffe e.V., 2013.
11. **ÖNORM B 5236.** *Planung und Ausführung von Bodenbelags- und Holzfußbodenarbeiten.* 2019.
12. **ÖNORM B 3407.** *Planung und Ausführung von Fliesen-, Platten- und Mosaiklegearbeiten.* 2019.
13. **Schnell, Werner.** Randverformungen bei schwimmenden Zementestrichen - Analyse und Bewertung. *Boden, Wand, Decke.* 1990.
14. **Willems, Wolfgang, et al.** *Lehrbuch der Bauphysik - Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima.* Wiesbaden : Wolfgang Willems, 2013.

15. **Unger, A.** <http://dr-estrich.info/>. [Online] 27. 02 2013. [Zitat vom: 10. 05 2021.] <http://dr-estrich.info/auszug-aus-dem-fussboden-atlas-www-fussbodenatlas-de-abrisse-bei-elastischen-fugenextreme-randabsenkungen/>.
16. **ÖNORM EN 1097-5.** *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 5: Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung.* 2008.
17. **BauNetz Wissen.** [Online] 2021. [Zitat vom: 10. 04 2021.] <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/eigenschaften/konsistenz-150936>.
18. **ÖNORM EN 1015-3.** *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).* 2007.
19. **ÖNORM EN 13892-1.** *Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 1: Probenahme, Herstellung und Lagerung der Prüfkörper.* 2003.
20. **ÖNORM EN 13892-2.** *Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen - Teil 2: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit.* 2003.
21. **ÖNORM B 3732.** *Estriche - Planung, Ausführung, Produkte und deren Anforderungen.* 2016.
22. **ÖNORM EN 12086.** *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.* 2013.
23. **ÖNORM B 8110-7.** *Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte.* 2013.
24. **Technische Kommission Bauklebstoffe und Brokamp, Thomas.** *TKB-Bericht 1: Belegreife und Feuchte - Versuche zur Trocknung von Estrichen.* s.l. : Industrieverband Klebstoffe e.V., 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Römische Fußbodenheizung in der Ausgrabungsstätte Carnuntum	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Estrichs auf Trennlage (2)	4
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Verbundestrichs (2)	4
Abbildung 4: Schematische Darstellung des schwimmenden Estrichs (2).....	5
Abbildung 5: Sorptionsisotherme für Zementestriche (8)	10
Abbildung 6: CM-Messgerät und Manometer.....	13
Abbildung 7: Darrvorgang im Zuge der Feuchtigkeitsmessung an der Probe Nr. 3	14
Abbildung 8: KRL Messung in einem Plastikbehälter an der Probe Nr. 3	15
Abbildung 9: Richtung des Diffusionsstromes bei austrocknenden Heizestrichen (14)	18
Abbildung 10: Vom Einbauzustand über Schwinden zu Schüsseln nach Belagsverlegung (15) ...	18
Abbildung 11: Schalungsherstellung für Hauptversuch	20
Abbildung 12: Systemskizze Probe 1.....	21
Abbildung 13: Systemskizze Probe 2.....	22
Abbildung 14: Sensorenanordnung in Probe 1 (links) und Probe 2 (rechts).....	22
Abbildung 15: Klimakammer, Aufbauhöhe 7,5 cm, Feuchtigkeitssensor	22
Abbildung 16: Versuch zur Bestimmung des Ausbreitmaßes.....	26
Abbildung 17: Prüfkörper im frischen und erhärteten Zustand für Nebenversuche	27
Abbildung 18: oben: Prismen vor Biegezugfestigkeitsprüfung, unten: Prismen nach Druckfestigkeitsprüfung	29
Abbildung 19: links: Biegezugfestigkeitsprüfung, rechts: Druckfestigkeitsprüfung	30
Abbildung 20: Schwimmende Estriche und Estriche auf Trennlage - Mindestfestigkeiten laut ÖNORM B 3732 (21)	32
Abbildung 21: Probenherstellung zur Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes	33
Abbildung 22: Fertige Proben zur Ermittlung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes	34

Abbildungsverzeichnis	64
Abbildung 23: Beschichtete Prismen für den Saugversuch.....	36
Abbildung 24: Benennung von Baustoffschichten nach der Größe ihrer Wasseraufnahmekoeffizienten W_w (14).....	37
Abbildung 25: Prismen in einer wassergefüllten Schale	38
Abbildung 26: Probe für die Durchführung der CM-, Darr- und KRL-Messung.....	39
Abbildung 27: Zeitlicher Ablauf der Versuchsdurchführungen	43
Abbildung 28: links: Probe 1 mit Fliesenbelag, rechts: Probe 2 mit Parkettbelag.....	44
Abbildung 29: Ausgleichsgerade aus der Kalibrierung für die Sensoren 101 und 102.....	45
Abbildung 30: Wärmebild-Estrichtemperatur 27,3 °C bei 35 °C Vorlauftemperatur	47
Abbildung 31: Ablösen des Belages bei Probe 1 und 2 durch zu hohe Feuchtigkeit im Estrich	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Umrechnungstabelle CM-Messung.....	12
Tabelle 2: Zulässige Restfeuchtigkeitswerte für Zementestriche nach der CM-Messmethode.....	16
Tabelle 3: Sensorenanordnung	21
Tabelle 4: Mischverhältnis	24
Tabelle 5: Wassergehalt im Sand bei Proben Nr. 1 und 2	25
Tabelle 6: Versuchsergebnisse Konsistenz	25
Tabelle 7: Masse und Dichte der Prüfprismen.....	30
Tabelle 8: Ergebnisse Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten.....	31
Tabelle 9: Massenzu- bzw. abnahme in mg/h.....	33
Tabelle 10: Berechnung Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl (μ) und Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d).....	34
Tabelle 11: Feuchtigkeitswerte von Probe Nr. 3 mittels verschiedener Messmethoden	40
Tabelle 12: Kalibrierung der Luftfeuchtigkeitssensoren.....	45

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Massenänderung durch Diffusion	35
Diagramm 2: Ergebnisse Saugversuch.....	37
Diagramm 3: Gegenüberstellung CM-% und relative Luftfeuchtigkeit nach KRL.....	40
Diagramm 4: Gegenüberstellung Darr-Massen% und relative Luftfeuchtigkeit nach KRL.....	41
Diagramm 5: Gegenüberstellung CM-% und Darr-Massen%	42
Diagramm 6: Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung über die Versuchsdauer	46
Diagramm 7: Temperaturverlauf Probe 1	48
Diagramm 8: Temperaturverlauf Probe 2	49
Diagramm 9: Trocknungsverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr	51
Diagramm 10: Trocknungsverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren.....	52
Diagramm 11: Trocknungsverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr.....	53
Diagramm 12: Trocknungsverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren.....	54
Diagramm 13: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P1-ü	55
Diagramm 14: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P2-ü	56
Diagramm 15: Trocknungsverlauf über die Aufbauhöhe - P2-z.....	57

Anhang

Im Anhang befinden sich

- einige Diagramme, welche zur Auswertung beigetragen haben und der Vollständigkeit halber angeführt werden. Diese stellen den Feuchtigkeitswert an gewissen Tagen bei den einzelnen Feuchtesensoren dar.
- Datenblatt BAUMIT Estrichzement
- Datenblatt KELOX FB Klettplattensystem (Dämmung unter Estrichplatte)

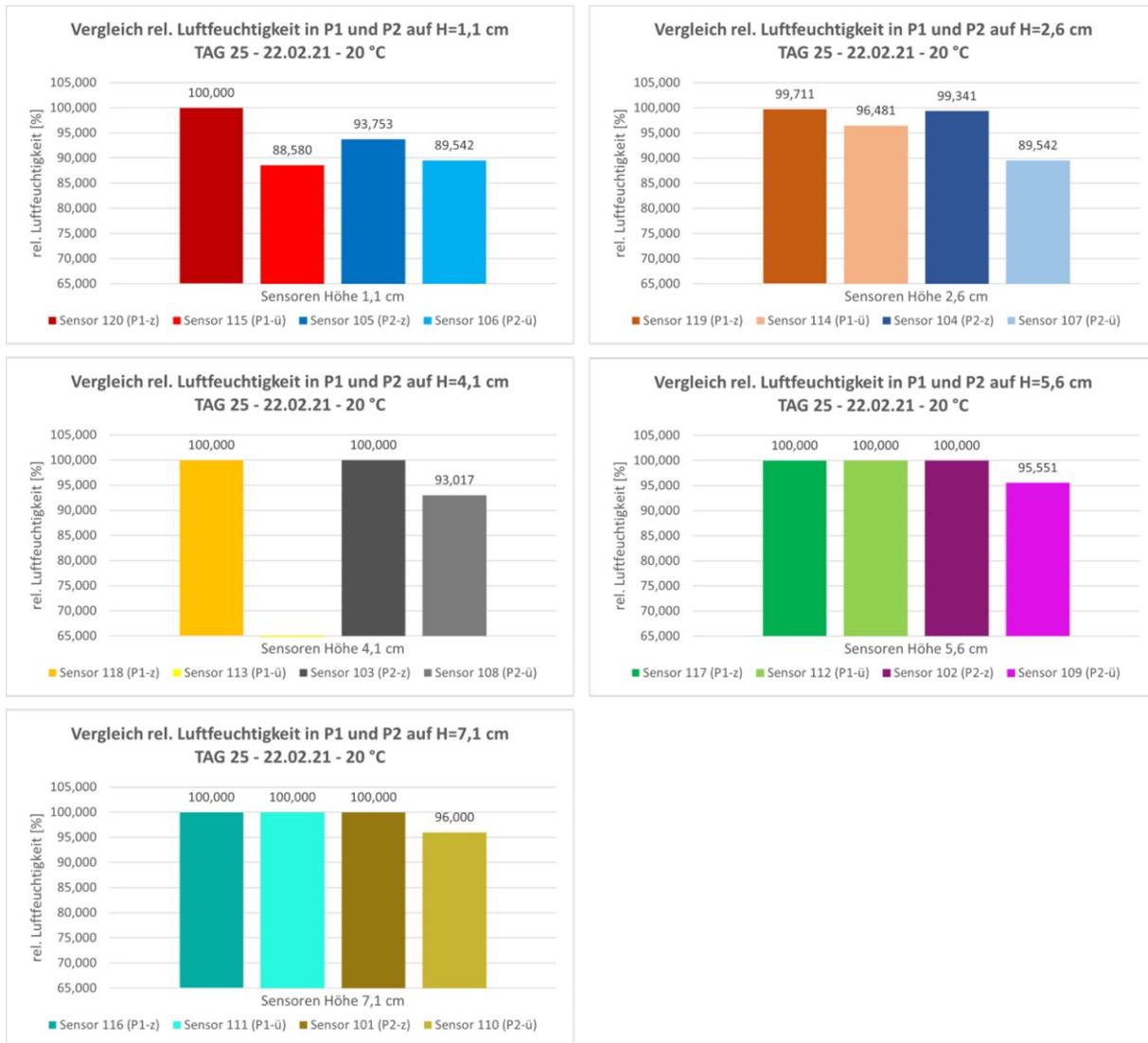


Abb 1: Feuchtigkeitswerte Tag 25

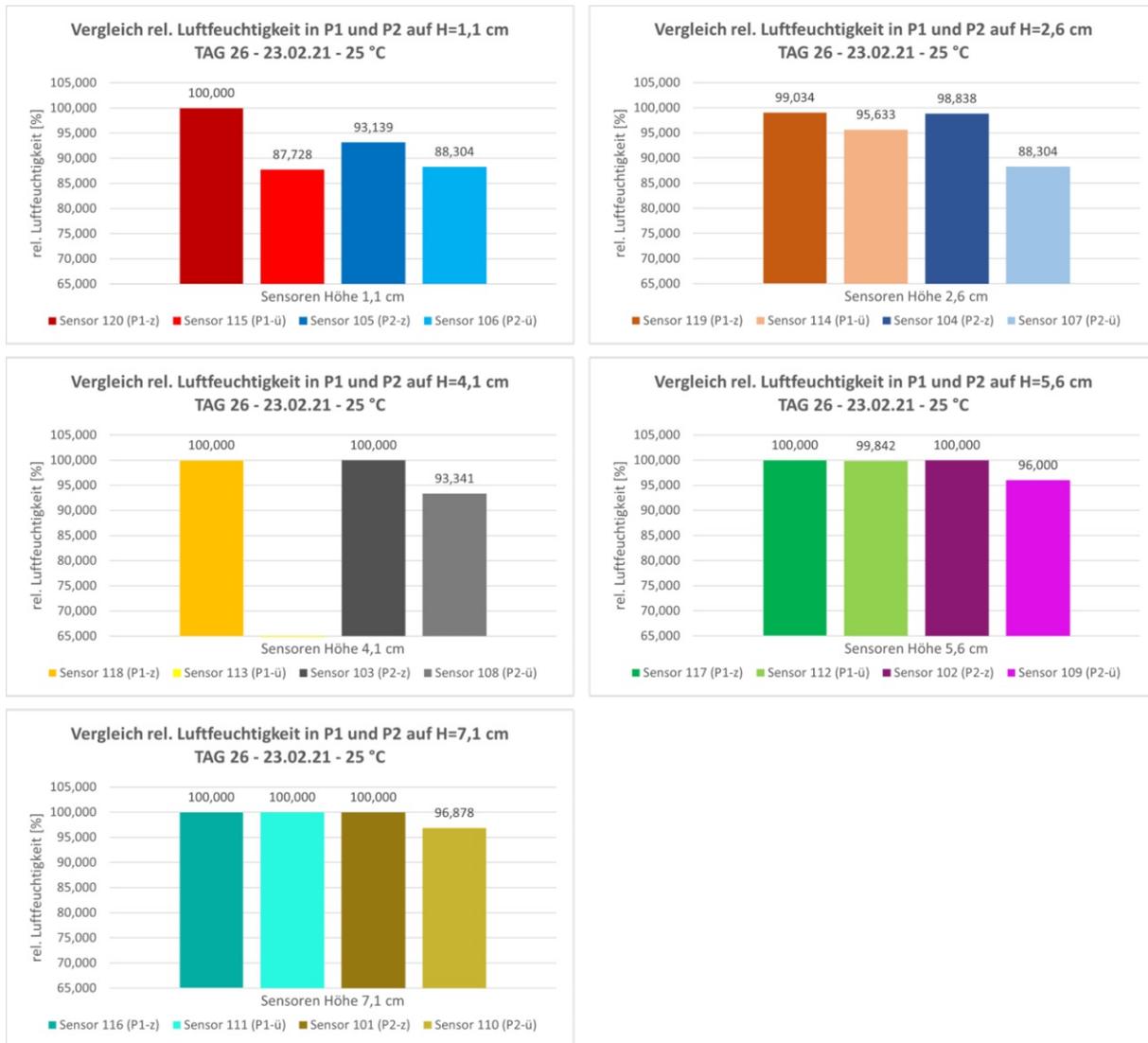


Abb 2: Feuchtigkeitswerte Tag 26

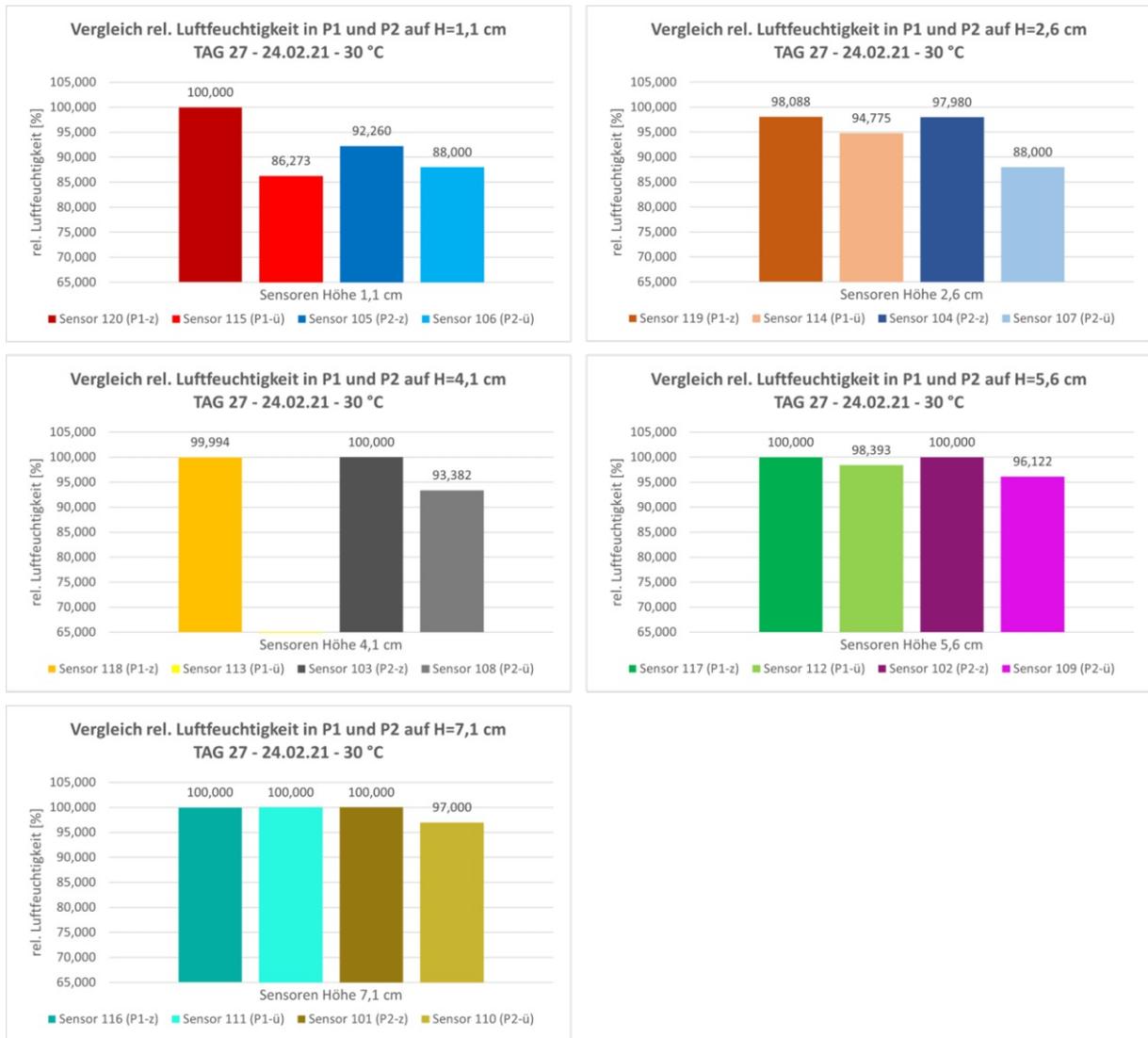


Abb 3: Feuchtigkeitswerte Tag 27

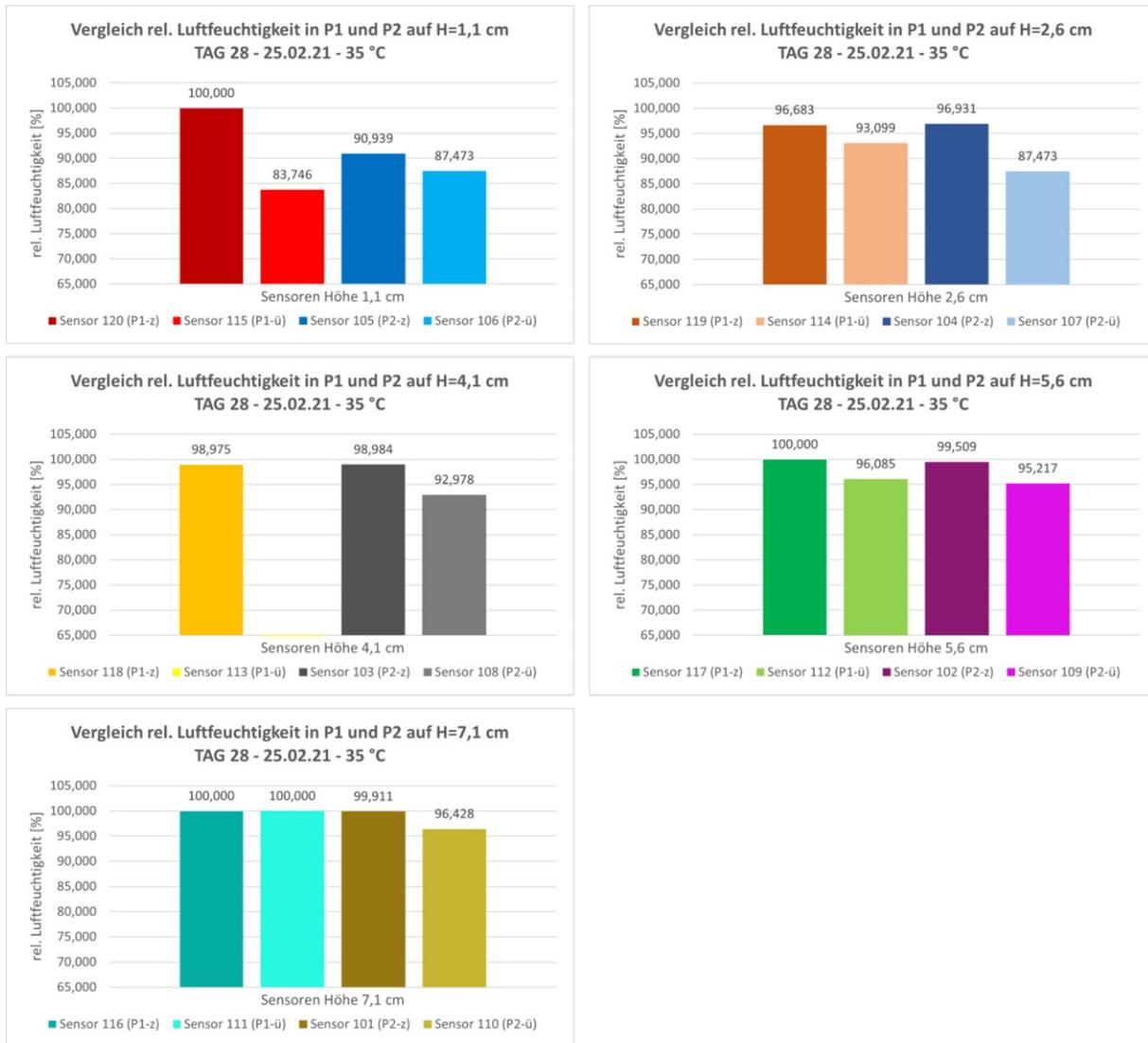


Abb 4: Feuchtigkeitswerte Tag 28

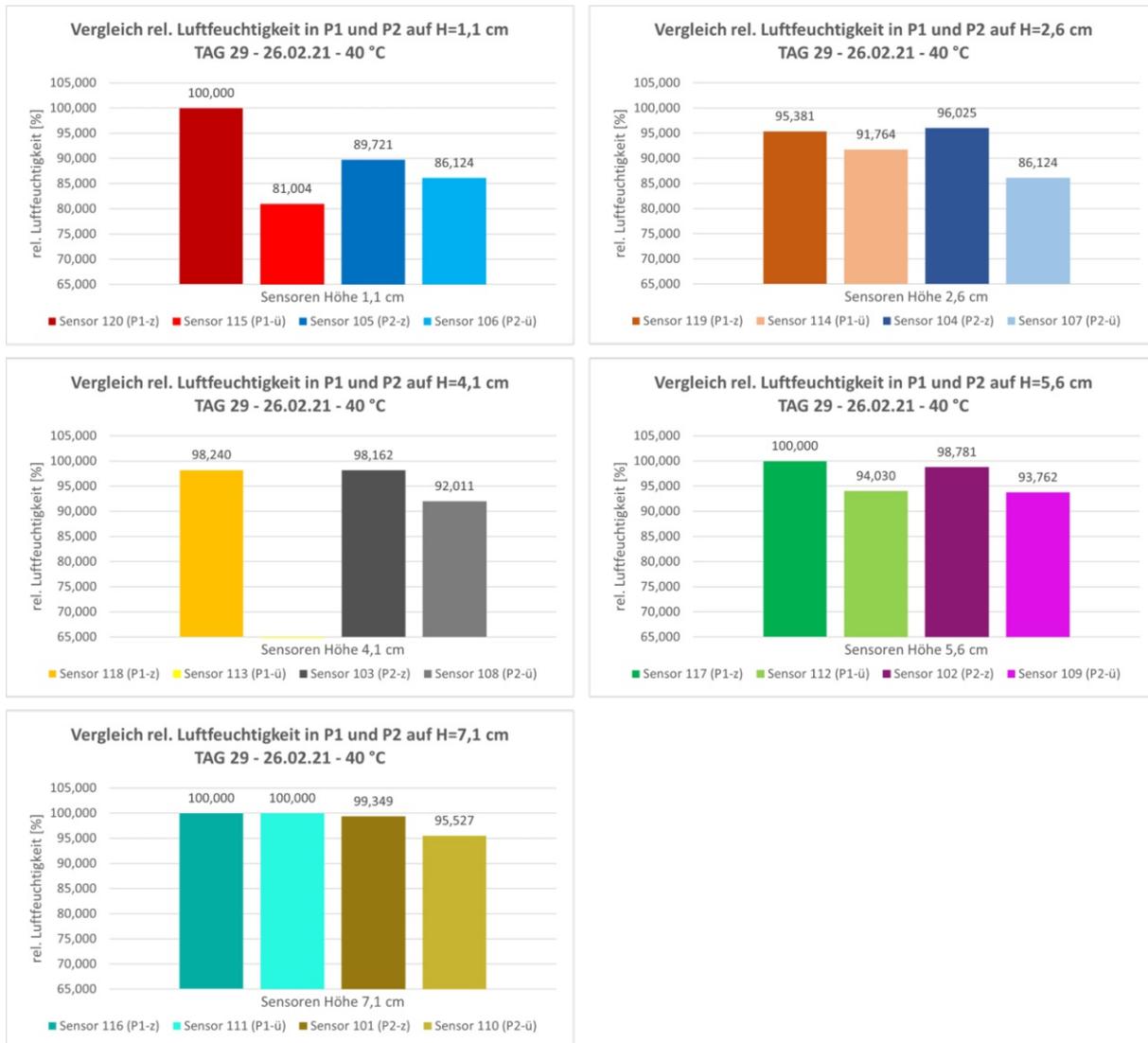


Abb 5: Feuchtigkeitswerte Tag 29

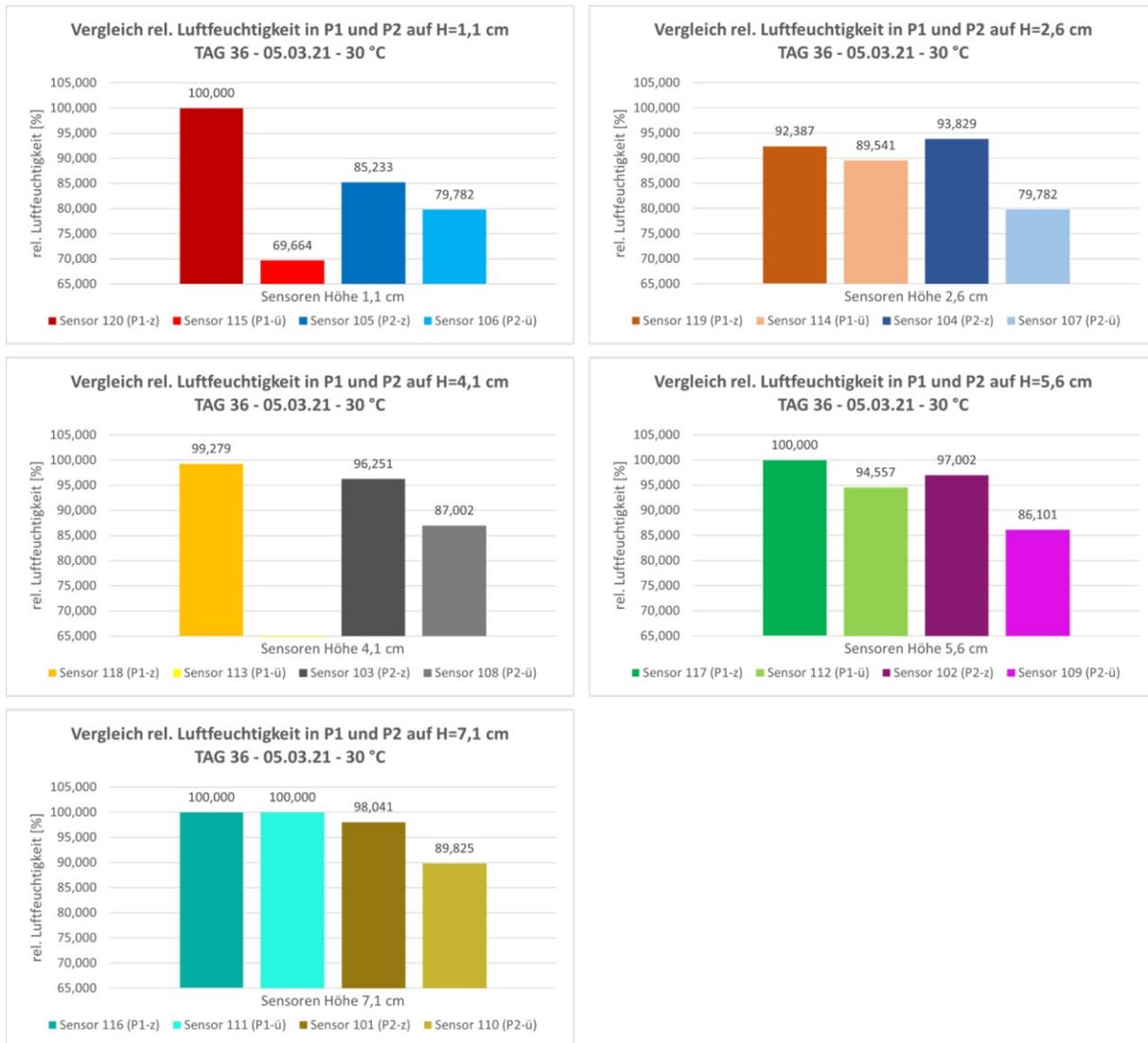


Abb 6: Feuchtigkeitswerte Tag 36

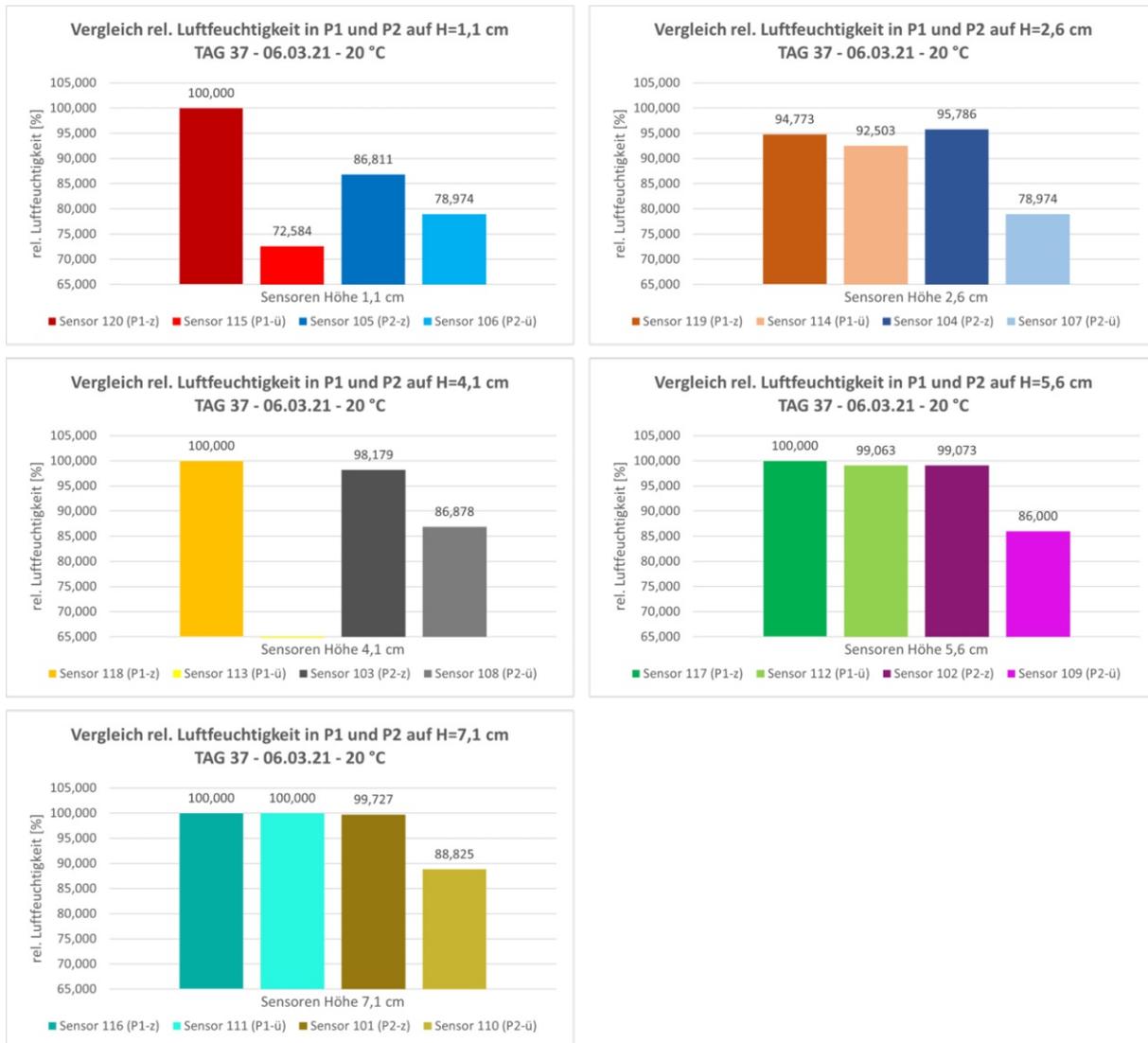


Abb 7: Feuchtigkeitswerte Tag 37

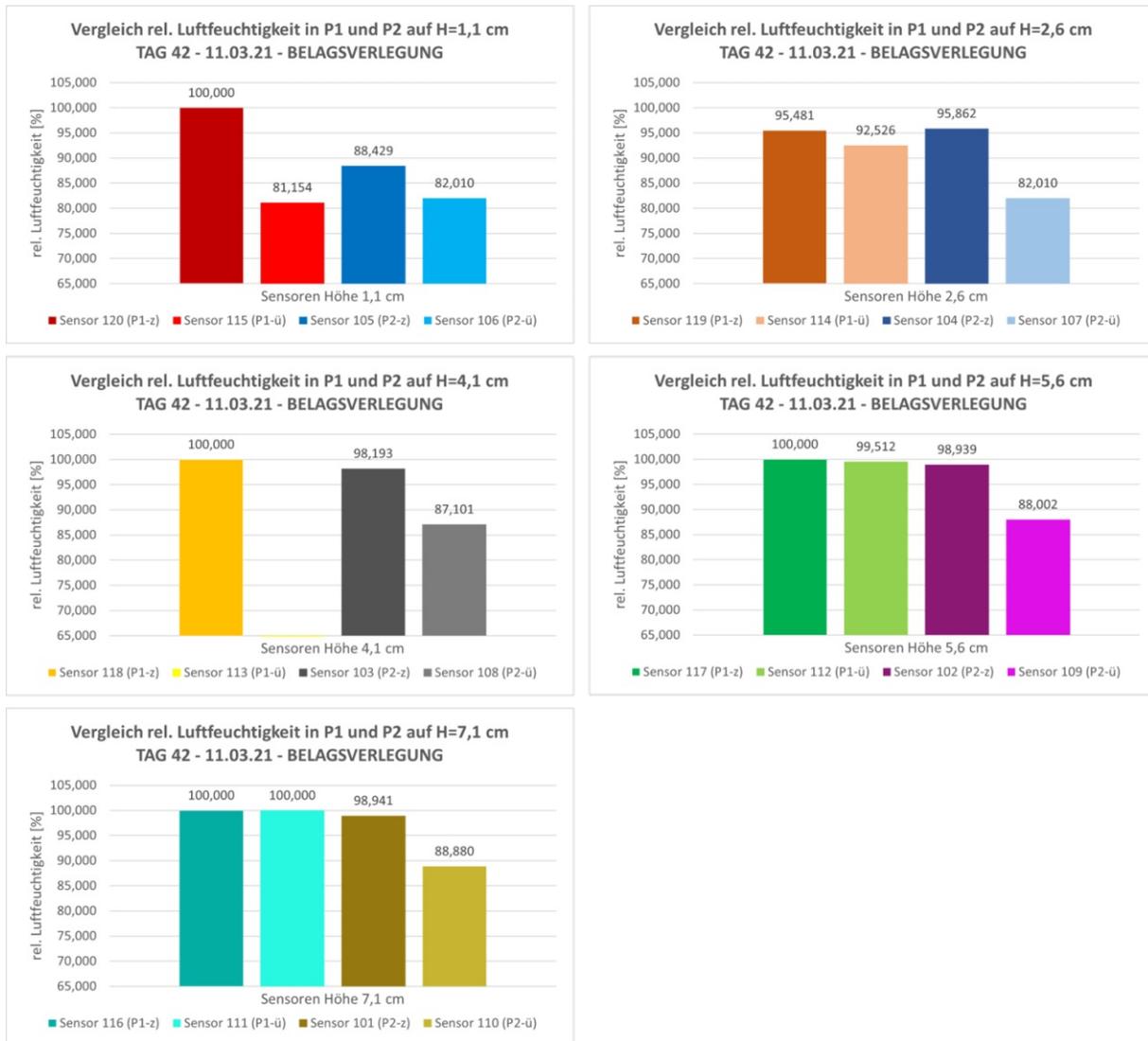


Abb 8: Feuchtigkeitswerte Tag 42

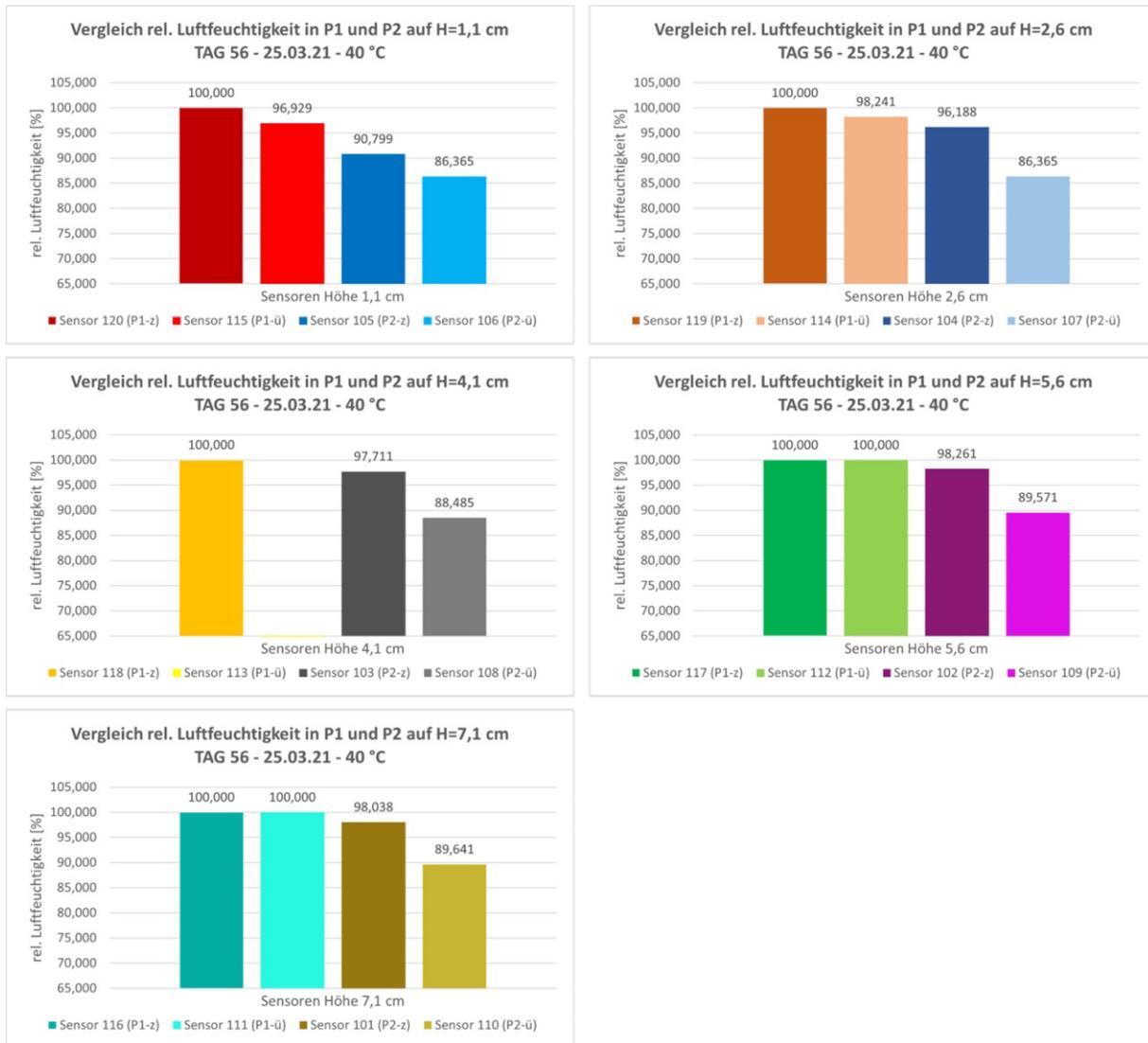


Abb 9: Feuchtigkeitswerte Tag 56

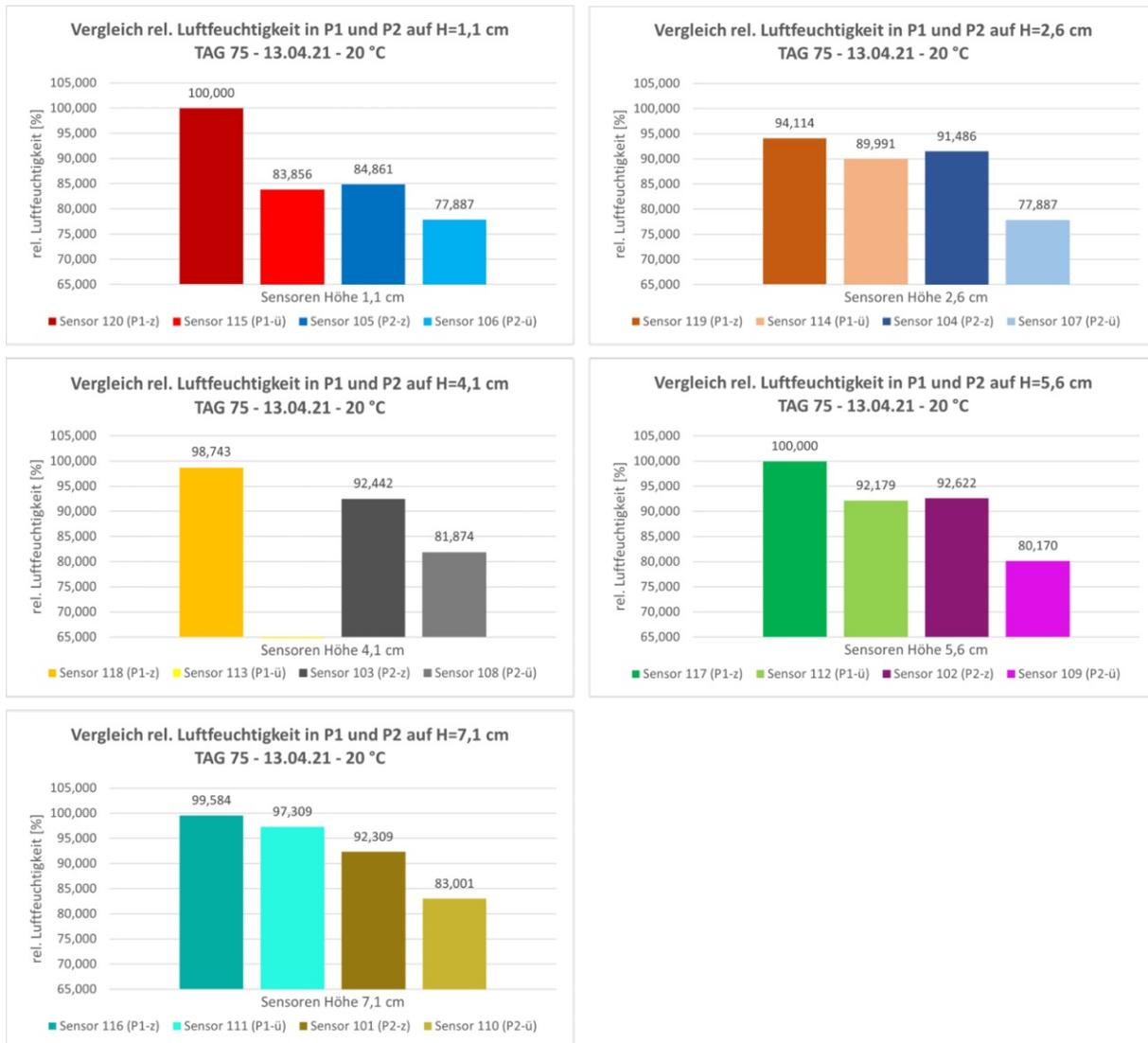
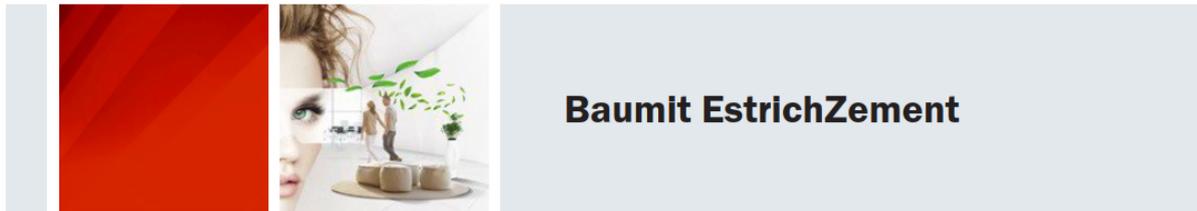


Abb 10: Feuchtigkeitswerte Tag 75



Baunit EstrichZement



- **Bindemittel für Estriche**
- **gleichbleibende Qualität**
- **universell einsetzbar**

Produkt	Portlandzement mit speziell auf die Estrichherstellung abgestimmten optimierten Eigenschaften. Baunit EstrichZement ist für alle üblichen Estrich- und Betonanwendungen (außer bei treibenden Angriff durch Sulfate) und als hydraulisches Bindemittel besonders zur Herstellung von schwimmenden-, gleitenden- und Verbundestrichen geeignet.
Zusammensetzung	Portlandkalksteinzement der Festigkeitsklasse CEM II/A-L 42,5 N gemäß ÖNORM EN 197-1. (Portlandzementklinker mit Kalkstein als Zumahlstoff, Gips.)
Eigenschaften	Mit Baunit EstrichZement hergestellte Estriche sind gut förderbar, bleiben über einen längeren Zeitraum gut verarbeitungsfähig sowie verdichtungswillig. Für eine optimale Estrichqualität sind eine gute Verdichtung und Nachbehandlung besonders zu beachten.
Anwendung	Als Zement für übliche Estrichanwendungen und zur Herstellung von gebundenen Beschüttungen (Splitt, EPS), Mauer- und Putzmörtel geeignet. Baunit EstrichZement ist ohne Zusätze auch zur Herstellung von beheiz- und kühlbaren Estrichen und als Unterlags-estrich für die Anwendung im Freien verwendbar.

Technische Daten	Erstarrungsbeginn:	ca. 160 min
	Druckfestigkeit:	ca. 23 N/mm ² (nach 2d)
	Druckfestigkeit nach 28 Tagen:	ca. 50 N/mm ²

	Sack 25 kg
Verbrauch	ca. 230 kg/m ³ Splitt, ca. 100 l Wasser Estrich E 225
Normeinstufung	CEM II/A-L 42,5 N

Lieferform	1 Pal. = 56 Sack = 1.400 kg
Lagerung	Trocken auf Holzrost 3 Monate foliiert lagerfähig.
Qualitätssicherung	Eigenüberwachung durch unsere Werkslabors. Fremdüberwachung gemäß ÖNORM EN 197-1.
Einstufung lt. Chemikaliengesetz	Die detaillierte Einstufung gemäß ChemG entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt (gemäß Artikel 31 und Anhang II der Verordnung Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und Rates vom 18.12.2006) unter www.baunit.com oder fordern das Sicherheitsdatenblatt beim jeweiligen Herstellerwerk an.
Untergrund	Vor Arbeitsbeginn Prüfung des Untergrundes auf Festigkeit, Ebenföchigkeit und Feuchtigkeitsgehalt.

Verarbeitung	Baunit EstrichZement wird mit der empfohlenen Wassermenge im Mischer vorgelegt danach mit Zuschlagsstoff bis zur richtigen Verarbeitungskonsistenz aufgefüllt. Es soll eine homogene und gut zu verarbeitende Mischung erreicht werden. Die Zugabe Mengen und die Mischdauer sind an die Größe und Art des Mixers anzupassen. Die Mischzeit ist so zu wählen, dass eine homogene Mischung entstehen kann. Freifall-, Zwangsmischer oder Estrichmischpumpen sind dafür ideal geeignet.
	Zement ist ein hydraulisches Bindemittel. Es erhärtet sich an der Luft und auch unter Wasser. Für die jeweiligen Eigenschaften ist das richtige Mischungsverhältnis der Masseanteile Wasser zum Bindemittel EstrichZement (W/B-Wert) maßgebend.

Empfohlene Mischungsverhältnisse*:

Estrich E225: 100 l Wasser / 230 kg EstrichZement / 1 m³ Sand
 Estrich E300: 120 l Wasser / 290 kg EstrichZement / 1 m³ Sand
 EPS gebunden: 100 l Wasser / 180 kg EstrichZement / 1 m³ EPS
 Splitt gebunden: 55 l Wasser / 80 kg EstrichZement / 1 m³ Splitt

*) Die Mengenangaben sind nur Richtwerte, der Wassergehalt muss an die Eigenfeuchte der jeweiligen Zuschlagsstoffe angepasst werden bzw. es können sich dadurch unterschiedliche Festigkeitswerte ergeben.

Bei der Verarbeitung als Estrich und danach sind die aktuell gültigen Richtlinien und ÖNORMEN zu berücksichtigen, insbesondere die ÖNORM B 3732.

Für die Verarbeitung als Zement ist die ÖNORM B 4710, für die Verarbeitung baustellengemischter Mauer- und Putzmörtel sind die ÖNORMEN B 3344, B 2204 und B 3346 zu beachten.

Die Mengenanteile hängen sehr vom Anwendungsbereich ab und sind durch Eignungsprüfungen festzulegen bzw. aus den Tabellen der ÖNORM B 3344 zu ersehen. Optimale Eigenschaften können nur erreicht werden, wenn die Rezepturen beachtet werden. Auf eine ordnungsgemäße Nachbehandlung ist unbedingt zu achten.

Allgemeines und Hinweise

Die Luft-, Material- und Untergrundtemperatur muss während der Verarbeitung und des Abbindevorganges über +5 °C liegen.

Bei hohen Temperaturen können kürzere Abbinde- und Erhärungszeiten auftreten.

Baumit EstrichZement ist ein chromatarmer Zement gemäß EU-Richtlinie 2003/53/EG.

Hautkontakt mit Zement kann in jedem Fall zu dauerhaften Schädigungen der Haut, einschließlich Hautkrankheiten führen, deshalb Hautkontakt mit Zement unbedingt vermeiden.

Dieser Zement enthält Reduktionsmittel, das den Gehalt an löslichem Chrom VI auf 0,0002% oder weniger reduziert. Das Reduktionsmittel ist – Lagerung in unbeschädigter Originalpackung und unter trockenen Bedingungen vorausgesetzt – für eine Dauer von drei Monaten (siehe Datum an der Sacklängsseite) wirksam. Nach Ablauf dieser Frist lässt die Wirkung des Reduktionsmittel so weit nach, dass der Gehalt an löslichem Chrom VI den Grenzwert von 0,0002% der Trockenmasse des Zements überschreiten kann. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Zements.

Zementhaltige Waschwasser können als Anmachwasser bei der Betonherstellung eingesetzt werden. Bei der Einleitung von zementhaltigen Waschwassern in ein Fließ- oder Grundwasser oder in die öffentliche Kanalisation sind insbesondere die rechtlichen Bestimmungen über den Gewässerschutz und über die hierfür erforderlichen Bestimmungen zu beachten.

Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtungen aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck selbst zu prüfen.

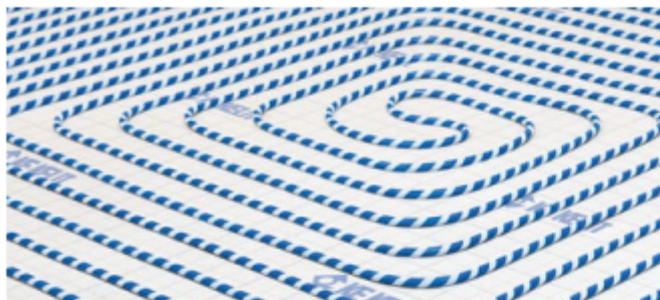
Produktdatenblatt
(12/2020)

Baumit GmbH

Wopfing 156 - A-2754 Waldegg - www.baumit.at - office@baumit.com



KELOX FB Klettplattensystem



KMU121K KELOX-ULTRAX FB Klettrohre (blau) sind durch die typischen Moduleigenschaften und umwickelten Klettstreifen geradezu ideal geeignet zur Verlegung und Fixierung auf der KELOX FB Klettplatte ohne zusätzlicher Befestigung.

KU101K ULTRA PE-RT FB Klettrohre (rot) ist eine Kunststoffrohr-Alternative aus PE-RT, sauerstoff- und wasserdampfdiffusionsdicht mit umwickeltem Klettstreifen.

KM636 KELOX FB Klettplatten

Die FB Klettplatten sind in Rollen erhältlich. Weiters sind die Rollen an der Längsseite und einer Breitseite mit einem Überlappungsrand inkl. eines Klebestreifens versehen.

Durch den verbesserten Lambda-Wert entspricht die KM636 FB Klettplatte mit 28/25mm Stärke (6,5kN) den gleichen Isolations- und Festigkeitswerten wie eine herkömmliche PS-Platte mit 33/30mm Stärke.

KM636K KELOX FB Klebe-Klett-Folie

Die KELOX FB Klebe-Klett-Folie ist eine selbstklebende Trittschalldämmung und ist in Rollenware erhältlich. Durch die geringe Höhe von 6mm und der Möglichkeit zum Dünnbettaufbau sowie herkömmlicher und flüssig- Estriche ist ein vielseitiger Einsatz möglich.

Trittschallverbesserungsmaß ca. 13dB

Zusammendrückbarkeit \leq 2mm

Dampfdiffusionswiderstand Sd: ca. 60m

Montage

Die Verlegung der KELOX FB Klettrohre erfolgt individuell, in Spiral- oder Mäanderform, OHNE zusätzliche Befestigung auf der FB Klettplatte. Dadurch ist eine schnellere und effizientere Montage möglich.

Leistungen

Die Wärmeleistungen der FB Klett-Systeme sind ident mit den Leistungen der FB Klemmschienensysteme und können je nach Verlegeabstand, Fußbodenbelag, bzw. Raum- und Heizwassertemperaturen diesen Leistungstabellen entnommen werden.

ACHTUNG FB Klettplatten vor direkter Sonneneinstrahlung schützen, nicht im Freien lagern!

KM636 KELOX FB Klettplatte

Material

aus Lambdapor (expandiertes Polystyrol) EPS-T plus gemäß ÖNORM B 6000, frei von HFKW und FCKW, Kaschierung mit Velourgewebe und PE-Beschichtung, inkl. Überlappungsrand mit Klebestreifen und Rastereinteilung.

Stärke

28/25mm (6,5kN)

28/26mm (10kN)

Toleranz gemäß

ÖNORM EN 13163+3mm

Größe

Rollenware: 10 x 1m

Wärmeleitfähigkeit

Lambda-Wert: 0,032 W/mK

Dynamische Steifigkeit

Gemäß ÖNORM EN 29052-1

$< 20\text{MN/m}^3$ (6,5kN)

$< 30\text{MN/m}^3$ (10kN)

Trittschallverbesserungsmaß

6,5 kN = ca. 30 dB

10 kN = ca. 27 dB

Belastbarkeit

Gesamtlast max. 6,5 kN/m²

Gesamtlast max. 10 kN/m²

Biegefestigkeit

Gemäß ÖNORM EN 12089

≥ 50 kPa ($\geq 0,05$ N/mm²)

Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl

Sd: ca. 35m – gilt als Dampfbremse keine FB Rasterfolie notwendig

Temperaturbeständigkeit

80 bis 85°C – kurzfristig bis 95°C

Brandverhalten

Gemäß ÖNORM EN 13501-1 „E“

Maximale Rohrlänge:

120m/Heizkreis (leistungsabhängig)

KELOX Flächenheizung

