

DIPLOMA THESIS

# Moisture and temperature distribution in cement screeds

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

---

DIPLOMARBEIT

# Feuchte - und Temperaturverteilung in Zementestrichen

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

von

**Khaled Mansour, BSc**

Matr.Nr.: 01425638

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dr.techn. **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 November 2022

---

## 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, November 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mansour'.

Unterschrift

## Danksagung

Zuallererst möchte ich mich mal bei allen Menschen bedanken, die mich während meines gesamten Studiums und bei der Erstellung der Diplomarbeit motiviert, begleitet und tatkräftig unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Herrn Dipl.-Ing Dr. techn. Karl Deix für die ausgezeichnete Betreuung bei der Durchführung der gesamten Diplomarbeit. Er unterstützte mich bei jeder Phase meiner Arbeit, vor allem im praktischen Teil der Arbeit. Er zeigte sehr großes Verständnis für meine Fragestellungen und leitete mich immer mit der richtigen Hilfestellung auf den richtigen Weg. Vielen Dank nochmal für ihre Geduld, Zeit, Mühe und außerordentliches Engagement während der Betreuung.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie danken, die mir immer wieder Zuversicht gegeben hat, auch in schwierigeren Phasen nicht aufzugeben und dranzubleiben. Durch ihren großen Support und Vertrauen in mich konnte ich mein Ziel erreichen und das Studium erfolgreich abschließen. Besonders möchte ich meiner Frau danken, dass sie immer hinter mir stand, mich motiviert hat und in jeder Hinsicht vor allem mental gestärkt hat, dieses Studium erfolgreich abzuschließen.

## Kurzfassung

Das Trocknungs- und Feuchteverhalten von Zementestrichen spielt auf der Baustelle eine sehr bedeutsame Rolle. Eine Reihe von Faktoren beeinflussen das Feuchteverhalten des Estrichs in der Ausbauphase. Um spätere Schäden durch Feuchte zu vermeiden, gibt es einige Faktoren, welche vor und nach der Belagsverlegung beachtet werden müssen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Feuchte- und Temperaturverhalten von Zementestrichen im Detail im Labor untersucht. Es werden Messmethoden gewählt, welche speziell auf das Temperatur- und Feuchteverhalten bezogen sind. Die Sensoren sind so positioniert, dass sie über den gesamten Querschnitt, Auskünfte über das Feuchte- und Temperaturverhalten geben. Es wurde ein klassischer Zementestrich E225 mit eingebauter Fußbodenheizung gewählt.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zum Estrich wie z.B. die Verlegearten oder die Estricharten erläutert. Anschließend werden die verschiedenen hygri-schen Größen wie Feuchtetransportmechanismen oder Sorptionsisotherme diskutiert. Danach wird auf die Austrocknung von Bauteilen und der Belegreife eingegangen. Letztendlich werden die verschiedenen Feuchtemessungen an Estrichen präsentiert.

Der zweite Teil der Arbeit, der eigentliche Hauptteil befasst sich mit der labortechnischen Untersuchung. Hier wird nach kurzer Beschreibung der Versuchsvorbereitung und der verwendeten Estrichmischung sowie sämtlichen Nebenversuchen auf den Hauptversuch eingegangen. Im Hauptversuch wurden zwei Fußbodenaufbauten im Labor unter bestimmten klimatischen Bedingungen betoniert und anschließend auf das Feuchte- und Temperaturverhalten untersucht.

Das Ziel dieser Arbeit war es anhand von Messergebnissen, Veränderungen der Feuchtigkeit und Temperatur auf 5 Messebenen, (die sich auf unterschiedlichen Höhen befinden), über einen längeren Zeitraum zu erfassen und somit Rückschlüsse auf das Feuchte- sowie Temperaturverhalten vor und nach Belagsverlegung zu ziehen.

Das Ergebnis zeigte, dass der Estrich besonders während der ersten Ausheizphase auf allen Messebenen an Feuchtigkeit verlor. Die zweite und dritte Heizphase hatte geringe Auswirkungen auf das Feuchteverhalten der Probe. Mit der Belagsverlegung stellten sich erneut hohe Feuchtigkeit-werte um die 80 – 90% ein. Am Ende des Versuches stand fest, dass der Estrich in der oberen Hälfte trocknete, während die untere Hälfte teils Feuchtigkeit-werte von über 80% annahm und somit feucht war.

## Abstract

The drying and humidity behavior of cement screeds plays a very significant role on the construction site. Several factors influence the humidity behavior of the screed in the finishing phase. In order to avoid later damage due to humidity, there are a number of factors which must be taken into account before and after laying the covering.

In this paper, the humidity and temperature behavior of classical cement screeds (E225) with built-in underfloor heating is investigated in detail in the laboratory. The measurement methods chosen are specifically related to the temperature and humidity behavior. The sensors are positioned in such a way that they provide information about the humidity and temperature behavior over the entire cross-section.

In the first part of this paper, the theoretical basics of screed are explained, such as the laying methods and the types of screeds. Subsequently, the various hygric quantities such as humidity transport mechanisms or the sorption isotherm are discussed. After that, the drying of building components and the readiness for covering are analyzed. At the end of the fundamentals chapter, the various humidity measurements on screeds are presented.

The second and main part of the thesis, deals with the laboratory investigation. After a short description of the test preparation and the screed mixture used, as well as all secondary tests, the main test is discussed. In the main test, two floor structures were concreted in the laboratory under specific climatic conditions and then examined for humidity and temperature behavior.

The aim of this work is to record changes in humidity and temperature on 5 measuring levels (which are located at different heights) over a longer period based on measurement results and thus to draw conclusions on the humidity and temperature behavior before and after laying the floor covering.

The result showed that the screed lost moisture at all measurement levels, especially during the first heating phase. The second and third heating phase had little effect on the moisture behavior of the specimen. With the laying of the covering, high moisture values around 80 - 90% were again reached. At the end of the experiment, it was found that the screed dried in the upper half, while the lower half partly assumed moisture values of over 80% and was thus damp.

## Schlüsselbegriffe

Belegreife	Dryness/readiness for laying
CM-Messung	CM measuring
KRL-Messung	Corresponding relative air humidity measuring
Heizestrich	heating screed
Feuchtegehalt	humidity content
Restfeuchte	residual humidity
Feuchtemessung	Humidity measurement
Estrichzement	screed cement
Darr-Methode	drying method

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
%	Prozent
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
N	Newton
p <sub>s</sub> (T)	Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur [Pa]
R <sub>f</sub>	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
u <sub>f</sub>	freier Wassergehalt
u <sub>m</sub>	massenbezogener Wassergehalt [%]
u <sub>v</sub>	volumenbezogener Wassergehalt [%]
φ	relative Luftfeuchtigkeit [%]
κ <sub>0</sub>	Minimalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m <sup>2</sup> /h]
κ <sub>F</sub>	Maximalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient [m <sup>2</sup> /h]
ρ <sub>w</sub>	Dichte des Wassers [ρ <sub>w</sub> = 1000 kg/m <sup>3</sup> ]
CM	Calciumcarbid-Messung
k	Steigung einer Geraden
d	Verschiebung einer Geraden
kg	Kilogramm
W/B-Wert	Wasserzementwert
z.B.	zum Beispiel
p	Partialdruck des Wassers [Pa]
RH20	Gaskonstante für Wasser
g	Gramm
V	Spannung
c	Wasserdampfkonzentration [g/m <sup>3</sup> ]
KRL	Korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit
sec	Sekunde
h <sup>0,5</sup>	Wurzel aus der Zeiteinheit
R <sub>c</sub>	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
R <sub>f</sub>	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
F <sub>c</sub>	Bruchlast [N]
A	mit den Auflagerplatten in Berührung stehende Fläche des Probekörpers [mm <sup>2</sup> ]
F	Bruchlast bei Biegezugfestigkeitsversuch [N]

$W_w$	Wasseraufnahmekoeffizient [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ]
$c_s$	Wasserdampfkonzentration im Sättigungszustand [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
$\mu\text{m}$	Mikrometer
l	Liter
$d_1$	die größte Ausbreitung des Betons parallel zur Kante des Ausbreittisches [mm]
$d_2$	die größte Ausbreitung des Betons parallel zur anderen Kante des Ausbreittisches [mm]
l	Achsabstand der Auflagerrollen beim Biegezugfestigkeitsversuch [mm]
b	Probenbreite [mm]
d	Probenhöhe [mm]
z.	zwischen
ü.	über
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle



# Inhaltsverzeichnis

<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>II</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>KURZFASSUNG.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>SCHLÜSSELBEGRIFFE .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VII</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVATION .....	1
1.2    ZIELSETZUNG .....	1
1.3    GLIEDERUNG .....	1
<b>2 GRUNDLAGEN .....</b>	<b>2</b>
2.1    ESTRICHE .....	2
2.1.1    Allgemeines .....	2
2.1.2    Nutzungsart.....	2
2.1.3    Verlegearten.....	2
2.1.4    Estricharten .....	3
2.1.5    Estrichfugen.....	5
2.1.6    Estrichschäden.....	5
2.2    HYGRISCHE GRÖßEN UND KENNWERTE .....	9
2.2.1    Wasserdampf .....	9
2.2.2    Wassergehalt von Baustoffen .....	10
2.2.3    Sorptionsisotherme .....	10
2.2.4    Feuchtetransportmechanismen.....	11
2.2.5    Ausgleichsfeuchte bei Estrichen .....	13
2.3    AUSTROCKNUNG VON BAUTEILEN .....	13
2.4    BELEGREIFE .....	15
2.5    FEUCHTMESSUNGEN .....	16
2.5.1    Feuchtemessungen an Estrichen .....	16
2.5.2    CM-Messung .....	16
2.5.3    Darr-Methode.....	18
2.5.4    KRL-Methode.....	19

<b>3</b>	<b>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG</b>	<b>20</b>
3.1	VERSUCHSVORBEREITUNG	20
3.2	ERSTELLEN DER ESTRICHMISCHUNG	26
3.2.1	<i>Verwendete Zementart, Zuschlagsstoffe und Fließmittel</i>	27
3.2.2	<i>Ausbreitmaß</i>	28
3.3	BELAGSVERLEGUNG	29
3.3.1	<i>Parkettbelag</i>	29
3.3.2	<i>Fliesenbelag</i>	30
3.4	NEBENVERSUCHE	31
3.4.1	<i>Biegezug- und Druckfestigkeiten</i>	32
3.4.2	<i>Saugversuch</i>	38
3.4.3	<i>Feuchtigkeitsmessung an einer Probe</i>	41
<b>4</b>	<b>HAUPTVERSUCH</b>	<b>42</b>
4.1	KALIBRIERUNG DER FEUCHTIGKEITSENSOREN	44
4.2	TEMPERATURVERLAUF INNERHALB DER ESTRICHPROBEN	46
4.3	FEUCHTEVERHALTEN INNERHALB DER ESTRICHPROBEN	50
4.3.1	<i>Feuchteverhalten über die Aufbauhöhe</i>	56
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>61</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>62</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>64</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>66</b>
	<b>DIAGRAMMVERZEICHNIS</b>	<b>67</b>
	<b>FORMELVERZEICHNIS</b>	<b>68</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Heutzutage kommen Zementestriche bei fast allen Bauvorhaben zum Einsatz. Dabei ist es wichtig, nicht nur das richtige Mischungsverhältnis einzuhalten, sondern auch das Trocknungs- sowie das Feuchteverhalten von Estrichen zu kennen, um spätere Feuchteschäden zu vermeiden. Um die Bauzeitplanung zu erfüllen, ist es wichtig, den Estrich vor Belagsverlegung auf das Feuchte- und Temperaturverhalten zu untersuchen. Aus diesem Grund habe ich mich entschlossen diese Untersuchung im Labor vorzunehmen, um detaillierte Rückschlüsse auf das Trocknungs- und Feuchteverhalten zu ziehen.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der gegenständlichen Diplomarbeit ist es, die Temperatur- und Feuchteverteilung in Zementestrichen anhand von labortechnischen Untersuchungen unter festgesetzten klimatischen Bedingungen zu untersuchen. Grundsätzlich besteht dieser Versuch aus zwei Fußbodenaufbauten, bei denen die gesamte Estrichdicke die Feuchtigkeits- und Temperaturverteilung während der Austrocknungsphase und nach Belagsverlegung aufgezeichnet werden. Die Werte wurden tabellarisch erfasst und grafisch mithilfe von Diagrammen dargestellt.

## 1.3 Gliederung

Im ersten Teil der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zum Estrich erläutert sowie die hygri-schen Größen diskutiert. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der im Bauwesen verwendeten Messmethoden für die Feuchtigkeitsbestimmung.

Der zweite Teil der Arbeit, der eigentliche Hauptteil, befasst sich mit der labortechnischen Untersuchung der zwei Fußbodenaufbauten. In diesem Teil der Arbeit werden nach kurzer Beschreibung des Versuchsaufbaues auch einige Nebenversuche durchgeführt und anschließend grafisch das Temperaturverhalten sowie das Feuchteverhalten dargestellt. Das Verhalten wird anhand von zahlreichen eingebauten Sensoren erfasst und ausgewertet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Estriche

#### 2.1.1 Allgemeines

Als Estrich werden Fußbodenschichten bezeichnet, welche direkt auf einem Untergrund oder auf zwischenliegenden Trenn- oder Dämmschichten verlegt werden [1]. Grundsätzlich kann ein Estrich vielfältige Anforderungen erfüllen, wie z.B. Tragfähigkeit, Trittschallschutz und Ebenflächigkeit. Estriche müssen gewöhnliche Nutzlasten aufnehmen können und diese auf die Unterkonstruktion ableiten [2].

Estriche können nach mehreren Kriterien unterschieden werden. Die Haupteinteilung sind die Verlegearten. Diese sagen aus, ob es sich um einen schwimmenden Estrich, Estrich auf Trennlage oder Verbundestrich handelt. Weiters werden Estriche nach dem verwendeten Bindemittel bzw. Materialien differenziert, wie zum Beispiel, Zementestriche, Gussasphaltestriche oder Calciumsulfatestriche. Eine weitere Unterscheidung ist die Nutzungsart. Hier unterscheidet man zwischen einem Unterlagestrich zur Aufnahme eines Belags und einem Nutzestrich, wie zum Beispiel Industrieböden. Weiters gibt es noch die Möglichkeit Estriche beheizt oder unbeheizt auszuführen [2].

#### 2.1.2 Nutzungsart

- **Nutzestriche** kommen hauptsächlich im Industrie- und Gewerbebereich zum Einsatz, da darauf kein Belag verlegt wird [3].
- **Unterlageestriche** dienen, wie der Name schon sagt, als Unterlage für den Belag, welcher nach Erhärtung und Trocknung aufgebracht wird. Dabei ist es wichtig, vor dem Einbau des Belags den Feuchtegehalt des Estrichs zu untersuchen, um zukünftige Schäden zu vermeiden [3].

#### 2.1.3 Verlegearten

- **Estrich auf Trennschicht (Trennlage):** Estriche mit Trennlage bezeichnen einen Estrich, der, meistens mit einer PE-Folie oder Vlies, die eine direkte Verbindung zwischen den Bauteilen nicht zulässt eingebaut wird. Die Ausführung erfolgt meistens zweilagig. Häufig wird diese Estrichart in Gebieten eingesetzt, wo keine Trittschalldämmung notwendig ist. Vorteilhaft ist die freie Verformung des Estrichs, unabhängig von der Rohdecke [4].

## Grundlagen

- **Verbundestriche:** Das entscheidende Merkmal von Verbundestrichen ist eine vollflächige und feste Verbindung mit dem Untergrund. Solche Estriche werden oft ohne zusätzlichen Belag genutzt, in diesem Fall spricht man von Nutzestrichen. Weiters bietet diese Art von Estrich eine hohe erwartende mechanische Belastung. Allerdings erfüllt diese Estrich-Verlegeart nur bedingte Anforderungen an den Schall- und Wärmeschutz. Vorteilhaft ist die direkte Anbindung auf den Rohbeton, dadurch ist diese Verlegeart die belastbarste Ausführungsform [4].
- **Estrich auf Dämmschicht (schwimmender Estrich):** Hier wird der Estrich auf eine Dämmung verlegt. Dadurch kann der Wärmeschutz sowie Schallschutz gewährleistet werden. Damit keine Feuchtigkeit vom Estrich in die Dämmschicht gelangen kann, ist es sehr wichtig, die Dämmung mit einer Folie dicht abzudecken. Weiters ist zu beachten, dass keine mechanische Beanspruchung von angrenzenden Bauteilen auf dem schwimmenden Estrich entsteht, da keine Verbindung mit der tragenden Unterschicht besteht [6].

### 2.1.4 Estricharten

Es werden je nach Zusammensetzung des Estrichs folgende verschiedenen Estricharten unterschieden.

- **Zementestriche:** Zementestriche bestehen aus Zement, Wasser, Zuschlagsstoffen, ebenfalls können Zusatzmittel beigegeben werden. Zementestriche sind die am meisten gebräuchlichsten Estricharten, da sie nach ihrer Austrocknung eine hohe Festigkeit aufweisen. Sie sind sehr feuchtigkeits- und brandbeständig und eignen sich daher für die Verlegung in Nassbereichen, Wohnbau, Gewerbe sowie Industriebau. Je nachdem wo der Einsatzort des Estrichs ist, ist zu beachten, dass die Zuschlagsstoffe frostbeständig sind. Ein großer Nachteil dieser Estrichart ist ein langsames Trocknen während des Erhärtungsvorganges und auftretendes Schwinden, was zu Rissen führen kann. Deshalb sind die herzustellenden Felder zu begrenzen und mit Dehnfugen zu versehen. Zementestriche können für alle zuvor beschriebenen Verlegearten verwendet werden [6].
- **Anhydrit-Calciumsulfatestrich:** Anhydritestrich besteht aus einem Anhydritbinder (Gips), Zuschlagsstoffe, Wasser und Zusatzstoffe. Diese Estrichform ist sehr wasseranziehend und deshalb für Außenbereiche ungeeignet. Es ist wichtig zu beachten, dass bei falscher Konstruktion oder hoher anstehender Luftfeuchte, es zu einer Verpilzung oder Verfärbung kommen kann. Die Trocknungsphase dieses Estrichs ist kürzer und weist ein geringes Quell- und Schwindmaß auf. Meistens werden Calciumsulfatestriche als schwimmende Estriche eingebaut. Vorteile dieser Estrichart ist seine Beständigkeit gegen Hitze, geringe Fugenzahl

## Grundlagen

bei Verlegung sowie eine hohe Ebenflächigkeit und zugleich wenig Verformungen [2]. Die Hauptanwendungsgebiete sind der Wohnbau und das Gewerbe.

- **Magnesiaestriche:** Magnesiaestriche bestehen aus Magnesia, Zuschlag und Magnesiumchlorid und weiteren Zusätzen. Diese Art von Estrich wird heutzutage sehr wenig verwendet bzw. ist in Altbauten stark vertreten. Ein besonderer Vorteil dieser Estrichart ist seine hohe mechanische Festigkeit, insbesondere ist der Oberflächenabrieb gering und die Härte groß [2]. Weiters ist bei dieser Art von Estrich eine große fugenfreie Fläche herzustellen möglich [3]. Nachteilig ist seine hohe Feuchteempfindlichkeit, welche ein Quellen auslöst und auch die Korrosivität gegenüber Metallen. Aus diesem Grund ist der Kontakt zu Stahl zu verhindern [6].
- **Trockenestriche:** Diese Art von Estrich hat durch seine einfache Verarbeitung und schnelle Nutzbarkeit beim Hausbau sehr viel an Bedeutung gewonnen. Bereits 24 Stunden nach Verlegung ist der Trockenestrich belastbar und vermeidet dadurch nicht nur lange Wartezeiten, sondern man erspart sich das lotrechte Abziehen des Estrichs. Leider ist Trockenestrich nicht ganz in Normen erfasst bzw. sind es meistens Sonderkonstruktionen. Weitere Nachteile sind seine geringe Belastbarkeit, sowie die Integration einer Fußbodenheizung, die sehr problembehaftet sein kann [7].
- **Gussasphaltestriche:** Gussasphaltestriche bestehen hauptsächlich aus einer bitumenhaltigen Masse, Splitt, Sand Füller und Bitumen. Diese Art von Estrich wird bei einer durchschnittlichen Temperatur von 200°C eingebracht. Sie gelten als sehr pflegeleicht, säurebeständig, frostbeständig, wärmedämmend, feuerhemmend, sowie geräusche- und schalldämmend [8]. Durch seine Feuchtebeständigkeit ist ein Einbau in frei bewitterte Bereiche problemlos durchführbar. Quell- und Schwindverhalten sind hervorragend, da keine Verformungen auftreten. Anwendungsgebiete sind gewerbliche und öffentliche Objekte sowie Altbauten. Vorteilhaft ist auch die Brillanz, wodurch eine durchgehende, fließende Optik erzeugt wird, und eine rasche Begehbarkeit ermöglicht wird. Der Nachteil von Gussasphaltestrichen liegt in seiner sehr geringen Resistenz gegenüber Ölen, Lösungsmitteln, Benzin und Fetten [3]. Weiters können Eindrückungen bei hohen vertikalen Pressungen entstehen.
- **Kunstharzestriche:** Diese sind Estriche mit Kunstharz als Bindemittel, quarzitisches Gesteinskörnungen und gegebenenfalls Zusatzstoffen. Zu den Bindemitteln gehören Harze wie Epoxidharz, Polyurethan oder Polymethylmethacrylat [5]. Vorteile dieser Form sind seine sehr hohe Druckfestigkeit, Chemikalienbeständigkeit sowie Abriebfestigkeit [9]. Grundsätzlich wird diese Art als Verbundestrich für sehr dünne Estriche, mit einer Schichtstärke von 10-20mm verwendet. Die Hauptanwendungsgebiete sind hochbeanspruchte Industrieflächen [9].

## Grundlagen

### 2.1.5 Estrichfugen

Bei der Herstellung und dem Einbau von Estrichen ist die korrekte Ausführung von Fugen sehr wichtig. Diese Fugen können entweder über den gesamten oder nur über einen Teil des Querschnittes erstellt werden [22].

Grundsätzlich wird hierbei zwischen Arbeits- und Tagesfugen, Rand- bzw. Raumfugen, Scheinfugen sowie Bewegungsfugen unterschieden. Die Position sowie die Art dieser Fugen wird durch einen Fachplaner in einem Fugenplan dargestellt [22].

Die Maße der Estrichplatten sollten 6,00 m im Inneren von Gebäuden und 3,50 m im Freien nicht überschreiten. Das Seitenverhältnis bei rechteckigen Flächen darf 1:2,5 nicht überschreiten. Bei Flächen über 40 m<sup>2</sup> sind Scheinfugen mit einer maximalen Seitenlänge von 8 m notwendig [10].

- **Arbeits- bzw. Tagesfugen:** Diese Art von Fugen ist notwendig, wenn die Arbeiten nicht an einen Tag fertiggestellt werden können und sie am nächsten Tag fortgeführt werden müssen. Als Abschaltung wird eine Holzbohle verwendet, die am nächsten Tag wieder entfernt wird [10]. Um Höhenversätze zu vermeiden, werden Dübelhülsen in den abgeschalteten Estrich eingebracht [10].
- **Scheinfugen:** Zumeist kommen Scheinfugen bei Zementestrichen zum Einsatz. Nach ihrer Einbringung durchlaufen diese einen Schwindprozess, dessen Ziel die Verkürzung der Plattendimension ist [10].
- **Rand bzw. Raumfugen:** Diese Fugenart dient zur Trennung des gesamten Fußbodens von angrenzenden Bauteilen wie Wände oder Stützen. Raumfugen haben die Aufgabe horizontale Längenänderungen der Fußbodenkonstruktionen sowie Wärme- oder Schalleitungsübertragungen zuzulassen [10].

### 2.1.6 Estrichschäden

Die Hauptursachen für Estrichschäden sind Bemessungsfehler, die Belagsverlegung auf einen zu frühen Estrich, die falsche Anordnung von Fugen sowie die mangelhafte Ausführung bei der Herstellung. Der Grundstein für Estrichschäden wird bereits bei der Planung gelegt [16].

Weitere Ursachen für Schäden an Estrichen sind die Nichteinhaltung des zeitlich vorgeschriebenen Bauablaufs sowie die Missachtung der Schutzzeiten und der Belegreife. Wichtig ist es den Estrich in der früheren Phase richtig austrocknen zu lassen. Weiters ist der Austrocknungsverlauf auch von der Schichtdicke und den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängig [16].

## Grundlagen

Zur Vermeidung von Feuchteschäden und weiteren Folgeschäden ist es wichtig vor dem Aufbringen des Oberbelags die Estrichfeuchte zu prüfen und zu überwachen [16].

### 2.1.6.1 Rissbildungen in Estrichplatten

Die Ursachen hierfür sind das Schwinden von Zementstein bei der Trocknung, Konstruktionsfehler in der Planung, Feuchteunterschiede und fehlende Nachbehandlung. Eine weitere Ursache sind Spannungen durch zu hohe Belastungen. Diese Art von Rissbildungen entsteht zumeist bei Unterdimensionierung der Estriche auf Dämmschichten oder bei zu hohen dynamischen und partiellen Belastungen [21].

Grundsätzlich wird bei den Rissen zwischen feinen Netzrissen auf der Oberfläche (Abb.1), Krakelee-Risse (Abb.2) und tiefen Trennrissen (Abb.3) unterschieden. Tiefe Trennrisse trennen den Estrich. Krakelee-Risse und Netzrisse sind feine Risse an der Oberfläche mit geringer Tiefe. Diese Risse entstehen zumeist Stunden nach dem Einbau, treten durch die Benetzung mit Wasser oder Imprägnierung hervor und stellen, wenn die Rissbreiten klein sind, keinen Mangel dar, da sie dann weder die Festigkeit noch die Gebrauchstauglichkeit des Estrichs negativ beeinflussen [21].



Abbildung 1 Netzrisse im Estrich [22]



Abbildung 2 Krakelee-Riss [21]



Abbildung 3 Trennriss über die Estrichdicke [21]



## Grundlagen

### 2.1.6.2 Vorwölbungen und Aufschlüsselungen

Die Ursachen hierfür sind die Missachtung der Belegreife, sowie zu hohe Nutzlasten mit Biegespannungen, welche über der Estrichfestigkeit liegen. Unzureichende Verdichtung und zu geringe Estrichdicken führen ebenfalls zu Vertikalverformungen [22].

Bei zu früh eingebauten Fliesen führen starre Randabschlüsse zum Abriss elastischer Fugen und zum Absenken der Ränder (Abb.4). Das Absenken der Ränder ist häufig auch bei schwimmenden Estrichen, die auf eine zusammendrückbare, weiche Dämmschicht gebettet sind, zu beobachten. Eine konvexe Formänderung mit Randabsenkung liegt vor, wenn der Schwindvorgang im schwimmenden Estrich behindert wurde [23]. Weitere Gründe für eine Absenkung sind hohe punktuelle Auflasten, wie z.B. unter Schrankwände.



Abbildung 4 Randabsenkung mit konvexer Verformung [16]

## Grundlagen

Die Abbildung 5 zeigt den Zementestrich nach dem Einbau bis hin zur Absenkung durch Rückverformung.

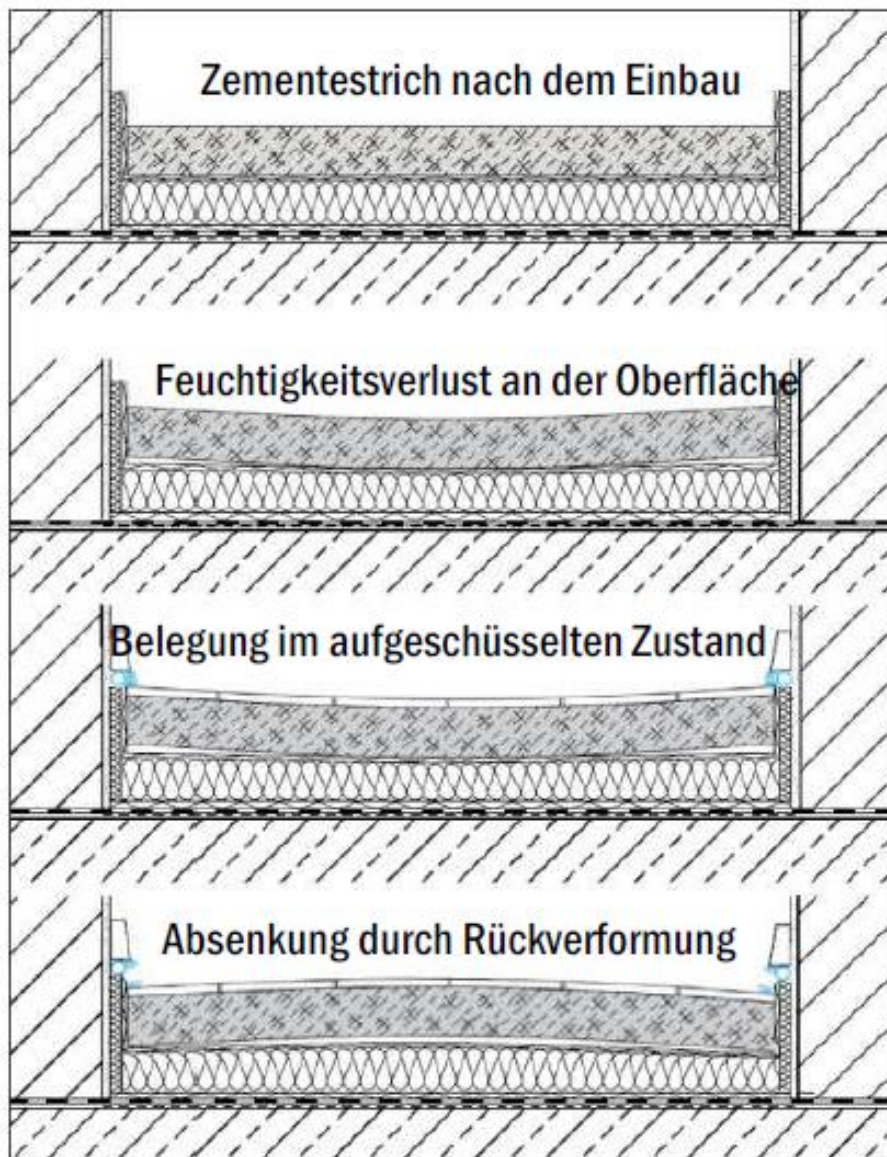


Abbildung 5 Aufschlüsselung von Zementestrichen [16]

### 2.2 Hygrische Größen und Kennwerte

#### 2.2.1 Wasserdampf

Wasserdampf kann von der Luft nur in einer begrenzten Menge aufgenommen werden. Die aufnehmbare Menge ist abhängig von der Temperatur. Je höher die Temperatur desto mehr Wasser kann aufgenommen werden. Die Speicherung dieses Wassers erfolgt gasförmig in Form von Wasserdampf [6].

100 % Luftfeuchtigkeit wird als Sättigungsfeuchtigkeit oder bezogen auf den Druck, Sättigungsdampfdruck bezeichnet. Der Sättigungsdampfdruck beschreibt die maximale Druckmenge als Funktion der Temperatur. Es wird zwischen absoluter und relativer Luftfeuchtigkeit differenziert. Die absolute Luftfeuchtigkeit ist die in einem bestimmten Luftvolumen enthaltene Wasserdampfmasse in  $\text{g}/\text{m}^3$ . Der Beitrag, den der Wasserdampf am Gesamtdruck in der Atmosphäre liefert, wird als Wasserdampfpartialdruck [Pa] bezeichnet. Wenn der vorhandene Wasserdampfdruck kleiner ist, als die Luft zu einer bestimmten Temperatur speichern kann, spricht man von ungesättigter Luft. Dieser Zustand wird als relative Luftfeuchtigkeit bezeichnet, welche das Verhältnis der tatsächlich enthaltenen zur maximal möglichen Masse an Wasserdampf in der Luft in % bezeichnet [6].

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

*Formel 1 relative Luftfeuchtigkeit in % [11]*

- $\phi$  relative Luftfeuchtigkeit [%]
- $p$  Partialdruck des Wasserdampfes [Pa]
- $p_s(T)$  Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur [Pa]
- $c$  Wasserdampfkonzentration [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $c_s$  Wasserdampfkonzentration im Sättigungszustand [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

Bei Überschreitung der Wasserdampfkonzentration im Sättigungszustand kann die Luft die aufgenommene Wasserdampfmenge nicht mehr speichern und die überschüssige Feuchte fällt in Form von Wasser, welche als Dampf oder Nebel wahrgenommen wird, an [6].

## Grundlagen

### 2.2.2 Wassergehalt von Baustoffen

Die Menge an Wasser, die in einem Baustoff enthalten ist, gibt man entweder als massenbezogenen Wassergehalt  $u_m$  oder als volumenbezogenen Wassergehalt  $u_v$  an [11]. Dies ist das Verhältnis der Masse bzw. Volumen des enthaltenen Wassers zur Masse bzw. Volumen des trockenen Baustoffs [11].

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

*Formel 2 massenbezogener und volumenbezogener Wassergehalt in % [11]*

$u_m$  massenbezogener Wassergehalt [%]

$u_v$  volumenbezogener Wassergehalt [%]

Die Angabe beider Wassergehälter erfolgt in dimensionslosen Größen, entweder prozentuell oder als Verhältnisse. Unter der Masse des trockenen Baustoffs ist die Masse des bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Baustoffes gemeint. Bei Stoffen, wie z.B. Gips, welche bei hohen Temperaturen sich komplett umgestalten, werden niedrige Trocknungstemperaturen von 40°C verwendet [11].

Mithilfe der Dichte lassen sich die Wassergehälter von volumenbezogenen auf massenbezogen umrechnen. [11]

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

*Formel 3 Umrechnung von volumenbezogenen auf massenbezogenen Wassergehalt [11]*

### 2.2.3 Sorptionsisotherme

In der Praxis ist ein Baustoff immer von Luft mit relativer Luftfeuchte umhüllt, was zur Folge hat, dass dieser stets eine gewisse Menge an Wasser durch Sorption in sein Inneres aufnehmen oder abgeben wird. Das bedeutet, umso höher die relative Luftfeuchte  $\phi$ , desto höher der Wassergehalt im Baustoff und umgekehrt. Der Wassergehalt, der sich im Gleichgewichtszustand einstellt, wird als Gleichgewichts- oder Ausgleichsfeuchte bezeichnet. Das bedeutet, dass der Baustoff, Wasser, nur bis zu einer bestimmten Sorptionsgrenze aufnehmen kann. Im Gleichgewichtszustand ergibt sich in Abhängigkeit der Temperatur des Baustoffes die sogenannte Sorptionsisotherme. Diese Funktion beschreibt den Wassergehalt des Baustoffes als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit der Luft. Im Gleichgewichtszustand besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der äußeren relativen Luftfeuchte und dem Wassergehalt  $u_m$  der Bemessungen. Bei mineralischen Baustoffen ist zu

## Grundlagen

erwähnen, dass der Einfluss der Temperatur auf den Verlauf der Sorptionsisotherme sehr gering ist, sodass es hauptsächlich von der Porenverteilung abhängt [13]. In der Abbildung 6 ist die Sorptionsisotherme für Zementestriche abgebildet.

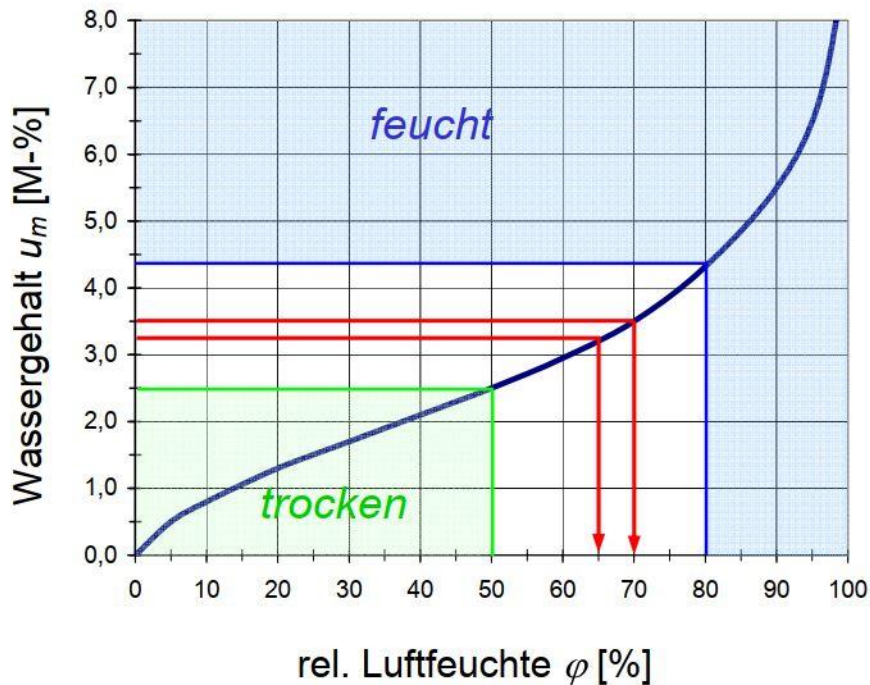


Abbildung 6 Sorptionsisotherme für Zementestriche [13]

### 2.2.4 Feuchtetransportmechanismen

#### 2.2.4.1 Diffusion

Unter einer Diffusion versteht man den Feuchtigkeitsaustausch in Form von Wasserdampf, der durch die Bauteile hindurch erfolgt. Diese findet aufgrund der Druckdifferenz zwischen innen und außen statt. Der Feuchtigkeitsaustausch erfolgt durch eine luftdichte Materialschicht. Diese luftdichte Materialschicht ist meistens eine Dampfbremse oder Dampfsperre, welche als Funktionsschicht zur Begrenzung des Feuchteintrags eingesetzt wird. Im Regelfall richtet sich die Diffusion im Winter von innen nach außen, im Sommer von außen nach innen. Der Feuchteintrag ist vom Diffusionswiderstand des Materials abhängig. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand ist abhängig von der Dicke und Struktur des Materials [14]. Die Abbildung 7 veranschaulicht den Diffusionsvorgang anhand einer Wand mit einem Glaser-Diagramm.

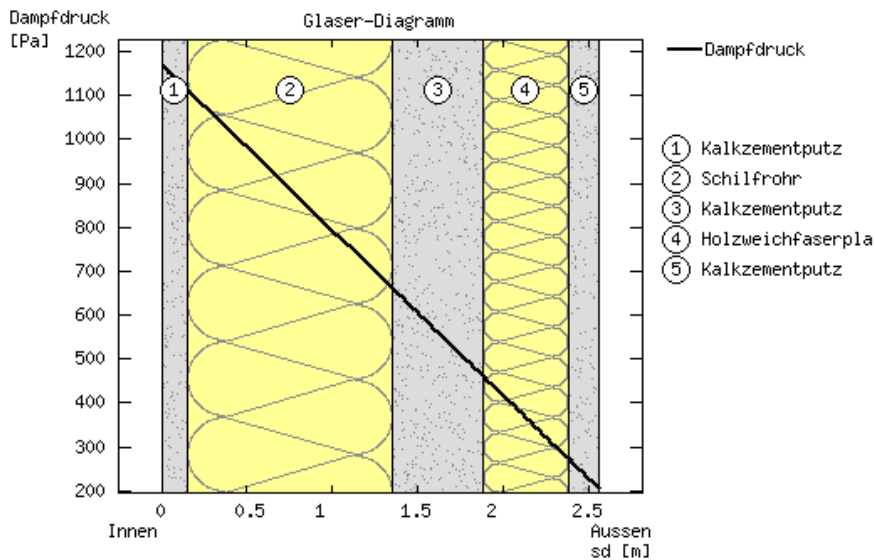


Abbildung 7 Veranschaulichung Diffusion anhand einer Wand mit Glaser-Diagramm [14]

#### 2.2.4.2 Kapillarität

Kapillarität oder kapillarer Wassertransport beschreibt das Verhalten von Flüssigkeiten, welche aufgrund der Wirkung von Kapillarkräften in Kontakt mit z.B. engen Röhren und Kapillaren stehen. In diesem Fall steigt das Wasser durch dessen Oberflächenspannung und der Grenzflächenspannung mit der Oberfläche des Baustoffs gegen die Gravitationskraft nach oben. Baustoffe, die kapillar leitfähig sind, wie z.B. Ziegel können sehr viel Wasser transportieren. Die Kapillarwirkung (Abb.8) ist ein Zusammenspiel aus Adhäsionskraft und Kohäsionskraft. Kapillarer Feuchtetransport findet zwischen Kapillarradien von  $0,1 \mu\text{m}$  bis  $100 \mu\text{m}$  statt. Zu den kapillarleitfähigen Baustoffen zählen sehr dünne, poröse Baustoffe mit Fasern [14].

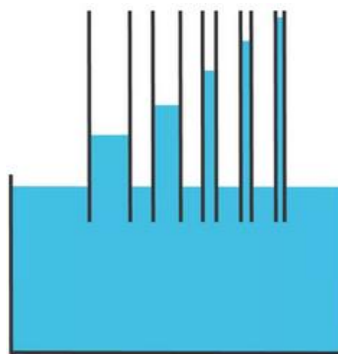


Abbildung 8 Kapillarwirkung [26]



### 2.2.5 Ausgleichsfeuchte bei Estrichen

Grundsätzlich ist die Ausgleichsfeuchte eines Estrichs abhängig von dessen Zusammensetzung und dem Umgebungsklima. Wenn sich nach Einbringung des Estrichs ein Gleichgewichtszustand des Feuchtigkeitsgehalts einstellt, spricht man von einer Ausgleichsfeuchte oder Gleichgewichtsfeuchte. Der Zusammenhang zwischen dem Estrichwassergehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit ist in den Sorptionsisothermen dargestellt [13]. Außerdem sind bei der Ausgleichsfeuchte erhebliche Unterschiede unter dem Einfluss des Baustellenklimas oder Raumklimas zu beachten. Aus diesem Grund werden längere Trocknungszeiten auf der Baustelle erwartet, da die Trocknungszeiten von den klimatischen Bedingungen abhängig ist [16].

### 2.3 Austrocknung von Bauteilen

In der Regel erfolgt die Austrocknung von Bauteilen, welche hygroscopische, kapillarporöse Eigenschaften besitzen in drei Bereichen. Zu Beginn erfolgt der Trocknungsprozess an der Oberfläche, wobei dabei der Feuchteübergang zur Luft von entscheidender Bedeutung ist. Die Verdunstungsstromdichte bleibt dabei konstant, solange der Baustoff an der Oberfläche sehr feucht ist. Im Inneren des Materials gleichen die Kapillaren die Feuchtigkeit aus. Sobald der Feuchtegehalt für den Kapillarwassertransport nicht mehr ausreicht, beginnt eine oberflächliche Trocknung. Bei Erreichung der Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche, wandert die Feuchtefront in das Innere des Bauteils [6]. Der Ablauf der Austrocknung ist in der Abbildung 9 dargestellt.

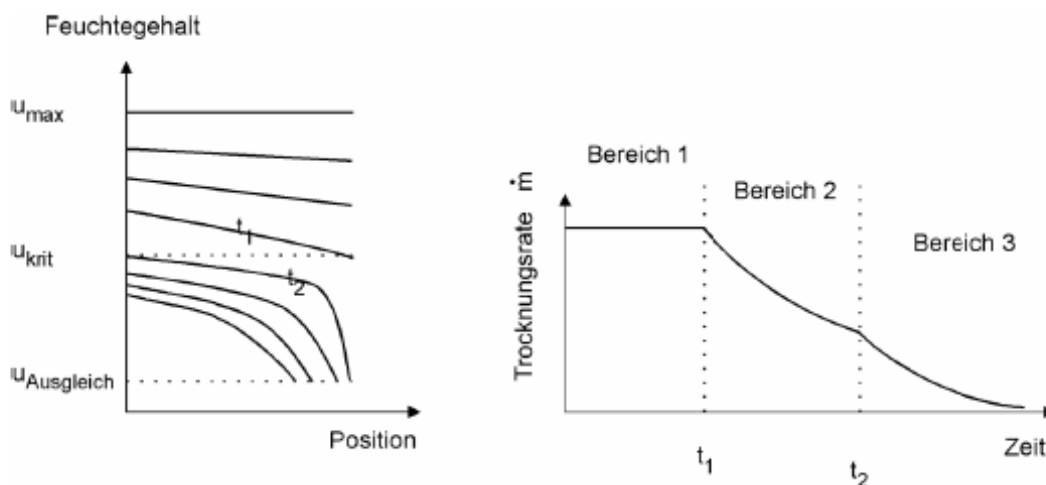


Abbildung 9 Ablauf der Austrocknung von porösen, hygroscopischen Stoffen [6]

## Die 3 Bereiche

### 1. Teilbereich: *Feuchteübergang an der Oberfläche (konstante Verdunstung)*

Die konstante Verdunstung ist auf eine vollkommene Feuchtigkeitsbedeckung der Oberfläche zurückzuführen. In diesem Fall hat die Feststoffmasse keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit, da die Feuchtigkeit sehr schnell an die Oberfläche gelangt. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist in diesem Abschnitt konstant [17].

### 2. Teilbereich: *Kapillartransport und Diffusion*

Der 2. Teilbereich ist durch einen Knick in der Kurve sehr bemerkbar. Es kann nicht genug Feuchte nach außen transportiert werden und die Trocknungsgeschwindigkeit beginnt abzunehmen. Der Grund dafür ist, dass die Verdunstung nicht mehr an der Oberfläche stattfindet. Die Trocknungsrate wird verringert, da der entstehende Dampf durch bereits trockene Schichten diffundieren muss. Es tragen nur mehr die kleinen Kapillaren zum Wassertransport bei [17].

### 3. Teilbereich: *Diffusion*

Der 3. Trocknungsabschnitt ist gekennzeichnet durch einen zweiten Knickpunkt. Der Knickpunkt tritt auf, sobald die maximale hygroskopische Feuchtigkeit erreicht ist. Dies ist der Fall, sobald im gesamten Bauteil die kritische Feuchte unterschritten ist. Die kritische Feuchte ist der ausreichende Feuchtegehalt für Kapillarwassertransport (Übersättigungsbereich). In diesem Fall findet der Feuchtetransport ausschließlich über Diffusion statt. Aufgrund der Hygroskopizität und der weiteren Absenkung des Dampfdruckes an der Verdunstungsfläche und der Zunahme des Diffusionsweges, sinkt die Trocknungsrate asymptotisch auf den Wert Null. In diesem Punkt entspricht die Feuchte der Gleichgewichtsfeuchte oder Ausgleichsfeuchte [17].



## 2.4 Belegreife

Unter der Belegreife wird die Feuchtigkeit verstanden, welche der Estrich erreicht haben muss, um eine schadens- bzw. mangelfreie dauerhafte Aufnahme eines Bodenbelags zu ermöglichen. In der Literatur wird von Verlegreife oder Belegreife gesprochen. Die Restfeuchtigkeit muss unter einem bestimmten Grenzwert liegen, dann spricht man von belegreifem Untergrund [12].

Wenn der Estrich die erforderliche Grenzfeuchte der Belegreife nicht erreicht, kommt es sehr häufig zu Schäden. Ein Beispiel dafür wäre, die Verlegung von dampfdichten Belägen auf einem zu feuchten Estrich. In diesem Fall kommt es häufig zur Erweichung des Klebers, bzw. zu einem blasartigen Aufwölben des Belags aufgrund von Dampfdruckblasen.

Die Verlegung von Parkett auf zu feuchtem Estrich führt meist durch die starke Wasseraufnahme zu starkem Quellen des Holzes, was wieder zu Ablösungen des Parketts oder zum Zerreißen des Estrichs führen kann.

Aus diesem Grund ist es sehr wichtig dem Estrich seine Trocknungszeit zum Erreichen der Belegreife zu geben. Für die Grenzfeuchte des Zementestrichs gibt es in Normen feste Werte, welche vor Belagsverlegung überprüft werden sollten. Diese Werte werden normgemäß tabellarisch erfasst (Abb.10) [6].

	Zulässige Feuchtwerte	Regelwerke
<b>Zementestriche</b>	$\leq 2,0 \text{ CM } \%$	ÖNORM B 2236: 2009, Werkvertragsnorm Verlegung von Bodenbelägen
	$\leq 2,5 \text{ CM } \%$	ÖNORM EN B 2207:2007, Werkvertragsnorm Fliesen-, Platten- und Mosaiklegearbeiten
<b>Heizestriche</b>	$\leq 1,8 \text{ CM } \%$	ÖNORM B 2218:2009, Werkvertragsnorm Verlegung von Holzfußböden
	$\leq 1,8 \text{ CM } \%$	ÖNORM B 2242-6: 2007, <sup>89</sup> Werkvertragsnorm Textile und elastische Beläge

Abbildung 10 Zulässige Restfeuchtwerte für Zementestriche nach der CM-Messmethode [12]

## Grundlagen

### 2.5 Feuchtmessungen

#### 2.5.1 Feuchtemessungen an Estrichen

Um einen Fußbodenbelag ordnungsgemäß einzubauen, ist es zwingend erforderlich den Feuchtigkeitsgehalt des Estrichs zu bestimmen. Dieser Feuchtegehalt wird anhand verschiedener Methoden ermittelt. Es wird zwischen zerstörungsfreien und zerstörenden Methoden unterschieden. Zerstörungsfreie Methoden wären z.B. elektrische Geräte wie z.B. Denzel- und der Caisson-Methode. Beispiele für zerstörende Methoden wären die Darr-, die CM- oder die KRL-Methoden. In dieser gegenständlichen Diplomarbeit werden die zerstörenden Methoden angewendet und daher näher erläutert und beschrieben. Es ist festzuhalten, dass vor Belagsverlegung generell eine Feuchtigkeitsmessung durchzuführen ist und die Ergebnisse zu protokollieren sind [18].

#### 2.5.2 CM-Messung

Die Calciumcarbid-Methode (CM-Messung) zur Feuchtebestimmung von Baustoffen ist heutzutage die am meisten verwendete Feuchtigkeitsmethode auf der Baustelle. Ihr großer Vorteil ist die schnelle und unkomplizierte Anwendung vor Ort. Ein Nachteil dieser Methode ist die zum Teil Streuung und Manipulationsanfälligkeit bei unterschiedlichen Estrichen. Es ist daher wichtig, diese Methode sorgfältig und ziemlich genau durchzuführen, um möglichst genaue Messergebnisse zu erhalten [18].

Vor der Durchführung der CM-Messung muss geprüft werden, ob die CM-Druckflasche sauber und trocken und die Flaschendichtung unverletzt ist. Andernfalls muss die Flasche gereinigt und nochmals getrocknet werden. Für die Kontrolldurchführung bzw. Kalibrierung lässt man in die CM-Druckflasche, zuerst die Stahlkugeln dann das Probenmaterial und vorsichtig eine Ampulle mit 1 ml Wasser sowie eine CM-Ampulle hineinrutschen. Nach dem Verschließen und Schütteln und einer Wartezeit von ca. 10min soll das Manometer einen Druck von  $1,00 \pm 0,05$  bar bei einer Temperatur zwischen 18 °C und 20 °C anzeigen. Wenn dies nicht der Fall ist, müssen die Dichtungen oder der Manometer ersetzt und die Funktionskontrolle wiederholt werden [19].



Abbildung 11 CM-Messgeräte und Manometer

Die Probeentnahme erfolgt durch Stemmen, wobei die Probe aus der unteren Estrichhälfte zu entnehmen ist. Nach Entnahme der Probe aus dem Estrich wird diese mit einem Meißel zerkleinert (Abb.12) und entsprechend dem zu erwartenden Feuchtegehalt eingewogen. In unserem Fall wurden 20g Estrich entnommen und in einer Schüssel zerkleinert. Gemeinsam mit 4 unterschiedlich großen Stahlkugeln (Abb.12) und einer Glasampulle mit Calciumcarbid wird die zerkleinerte Estrichprobe in die druckdichte CM-Flasche eingebracht. Durch kräftiges Schütteln wird die Glasampulle zerschlagen und eine chemische Reaktion zwischen der Restfeuchtigkeit im Estrich und dem Calciumcarbid wird ausgelöst. Bei dieser chemischen Reaktion entsteht Azetylen, was zu einer Drucksteigerung in der Stahlflasche führt. Nach zehn Minuten kann man den entstandenen Gasdruck in der Flasche am Manometer ablesen. Manche Geräte erlauben den Feuchtegehalt auch direkt abzulesen. Falls man den Gasdruck am Manometer ablesen kann, was bei uns der Fall war, gibt es vom Gerätehersteller eine Umrechnungstabelle, über der man anhand der Einwaage den Druck und den Feuchtegehalt bestimmen kann. Als Ergebnis dieser Messung erhält man die sogenannte CM- Feuchte in Masse -% [6]. Die Abbildung 11 zeigt das CM-Messgerät und das Manometer.

Wie erwähnt gibt es bei dieser Messmethode einige Fehlerquellen, z.B. ist es möglich, dass unterschiedliche Prüfer das Prüfgerät unterschiedlich zermalmten. Aus diesem Grund sind auch mit Fehlern bei unsorgfältiger Durchführung zu rechnen. Weiters können sich auch die Mengen und die Körnung des Carbids, unterschiedlich auf das Ergebnis auswirken [6].



Abbildung 12 Zerkleinerung des Estrichs und Stahlkugeln

### 2.5.3 Darr-Methode

Die Darr-Methode ist die genaueste Methode zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts des Estrichs. Sie gehört ebenfalls zu den zerstörenden Messverfahren. Bei dieser Methode wird die Probe direkt nach der Entnahme in luftdichte Behälter gegeben und im Labor in einem Trocknungs-ofen bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Bei der Darrmethode wird nicht nur das freie Wasser, sondern auch das Kapillarwasser entfernt. Aus diesem Grund ist der gemessene Feuchtegehalt genauer als bei der CM-Methode [6].

Für die Durchführung dieses Versuches wird die Estrichprobe ebenfalls aus der unteren Hälfte des Estrichs entnommen. Es wird empfohlen, wie auch bei der CM-Messung, das Probegut mit Hammer und Meißel zu entnehmen, da durch die Wärmeentwicklung beim Herausbohren, Feuchtigkeit entweichen kann. Auf der Baustelle ist es üblich die entnommene Estrichproben sofort luftdicht zu verpacken, damit es zu keiner Verfälschung der Ergebnisse kommt [12].

Nach der Entnahme sowie Einwaage der Probe des Estrichs erfolgt eine Trocknung im Trockenofen bei 105°C. Es wird über die Gewichts-differenz (trocken zu feucht) der Restfeuchtegehalt rechnerisch ermittelt. Generell ist festzuhalten, dass die Darr-Methode um ca. 1,5% höhere Ergebnisse als die CM-Methode liefert [12].

$$\text{Feuchtegehalt}_{\text{Darr}} = \text{Feuchtegehalt}_{\text{CM-Methode}} + 1-1,7\%$$

## Grundlagen

### 2.5.4 KRL-Methode

Die Buchstaben KRL stehen für korrespondierende relative Luftfeuchte. Diese Methode erlaubt den Feuchtezustand des Estrichs anhand der relativen Luftfeuchte an einer entnommenen Materialprobe zu ermitteln. Die KRL-Messung beruht darauf, dass die unmittelbare Umgebungsluft mit dem Probekörper ein Gleichgewichtszustand anstrebt. Es wird so lange die Feuchtigkeit des Probekörpers an die Umgebung abgegeben bzw. aus der Umgebungsluft aufgenommen, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Es handelt sich um ein indirektes Verfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit [19].

Für die Versuchsdurchführung ist es wiederum erforderlich, den Estrich aus der unteren Hälfte des Untergrundes zu entnehmen. Danach wird die entnommene Estrichprobe mit einem Temperatur- und Feuchtesensor in einem Behälter gegeben und luftdicht verschlossen. Nach einer Wartezeit von ca. 30 Minuten, in der sich die Probe und die Luft im Behälter an die Raumlufttemperatur angepasst haben, kann der Wert abgelesen werden. Es ist von großer Bedeutung, den Messwert ca. 3min lang zu beobachten, um abrupte Änderungen beim Feuchtigkeitswert zu dokumentieren. In der Regel sind Änderungen beim Messwert von  $\pm 1$  % normal [20].

Es ist auch möglich Sensoren auf die fertige Estrichfläche zu positionieren und diese mit einer Folie luftdicht abzuschließen. Nachdem sich die Feuchtigkeit ausgeglichen hat, kann die relative Luftfeuchtigkeit abgelesen werden. Diese Variante zählt zu den zerstörungsfreien Varianten.

Ein Grund für die immer größere Bedeutung der KRL-Methode liegt an der großen Fehleranfälligkeit und Ungenauigkeit der CM-Methode. Ein großer Kritikpunkt bei 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 [19].



### 3 Versuchsdurchführung

Der labortechnische Teil dieser Diplomarbeit setzt sich aus einem Hauptversuch und den Nebenversuchen zusammen, welche in den nachfolgenden Kapiteln unterteilt werden. Die Nebenversuche umfassen die klassischen Voruntersuchungen von Estrichmörtel. Zu denen zählen die Frischbetonuntersuchung anhand welcher das Ausbreitmaß des Estrichs festgestellt wird, bis hin zur CM-Messung an der erhärteten Estrichprobe sowie Druck und Biegezugversuche am erhärteten Estrich. Die Vorgehensweise zu den Versuchen wird in chronologischer Reihenfolge beschrieben, beginnend bei den Versuchsvorbereitungsarbeiten über die Belagsverlegung bis hin zur Auswertung der Versuche. Die Auswertung des Hauptversuches stellt den Hauptteil der gegenständlichen Diplomarbeit dar. In diesem Versuch wird die Feuchte- und Temperaturverteilung anhand von zwei Fußbodenplatten untersucht und ausgewertet.

#### 3.1 Versuchsvorbereitung

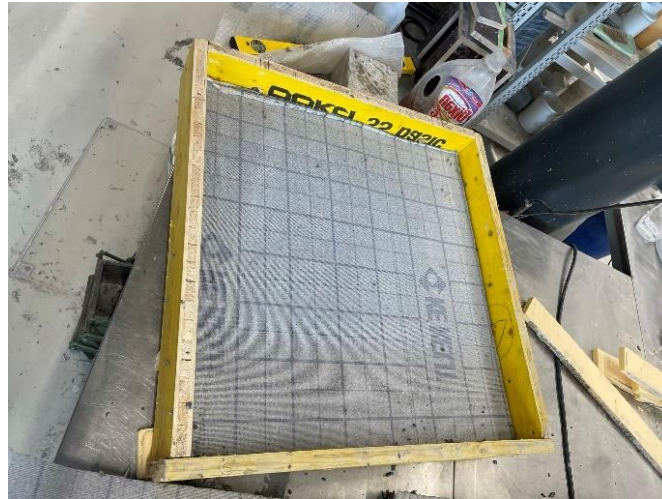
Die gesamten Versuche wurden im Labor OC des Institutes für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie der Technischen Universität Wien durchgeführt. Die Schalungen wurden aus DOKA-Schalttafeln im Labor hergestellt. Die Größe der zwei Schalungsplatten beträgt 70x70x10cm (LxBxH). An den Seitenwänden der Schalung wurde eine 1,8cm dicke Dämmung angebracht. Die Eckverbindungen der Schalung wurden mit Silikon abgedichtet, um einen Feuchtigkeitsaustritt zu verhindern. In der Abbildung 13 sind die DOKA-Schalungselemente vor dem Plattenaufbau und nach dem Aufbau ersichtlich.



Abbildung 13 DOKA- Schalungselemente und fertige Schalung

## Versuchsdurchführung

Im nächsten Schritt wurde eine Trittschalldämmplatte der Fa. KE Kelit, (EPS-T 650) mit einer Stärke von 25mm verlegt. Es handelt sich hierbei um ein Klettplattensystem. Dieses Klettplattensystem erlaubt die direkte Anbindung der Fußbodenheizungsrohre an die Dämmung, da es mit einer Klebe-Klettfolie angebracht ist. In der Abbildung 14 ist die Schalung mit eingelegter Dämmung und der Klettplatte zu sehen.



*Abbildung 14 Schalung mit eingelegter Dämmung*

Im Anschluss wurden die Schalungen für das Anbringen der Fußbodenheizung vorbereitet. Es wurden je zwei Bohrungen in die Seitenwand der Schalung durchgeführt, um die Heizungsrohre an das Heizgerät anschließen zu können. Die Verlegung der Heizungsrohre erfolgte wellenförmig im Abstand von ca.15cm. Bei den verlegten Heizungsrohren handelte es sich um KMU 121K KELOX-ULTRAX Klettrohre. In der Abbildung 15 ist die Schalung mit den eingelegten Heizungsrohren zu sehen.



*Abbildung 15 Schalung mit eingelegten Heizungsrohren*

## Versuchsdurchführung

Nach Fertigstellung der beiden Schalungen für den Hauptversuch, wurden die Messsensoren vorbereitet. Es wurden je Estrichplatte jeweils zehn Feuchtigkeits- und zehn Temperatursensoren vorbereitet. Die Sensoren wurden vor der Anbringung an die Drähte, welche zur Messeinrichtung gehören, gelötet, nummeriert und auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. In Abbildung 16 und 17 sind das Lötgerät sowie der LötKolben ersichtlich.



Abbildung 17 Lötgerät

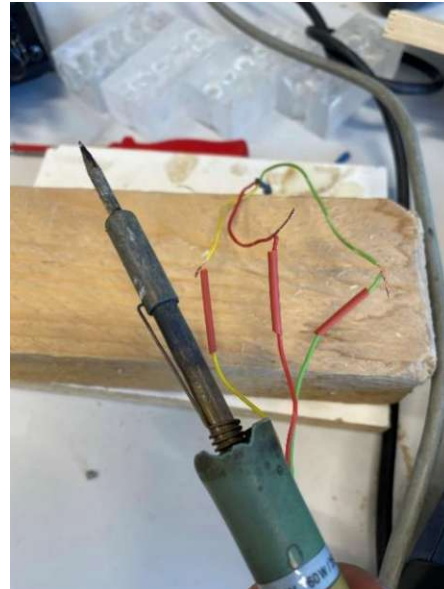


Abbildung 16 LötKolben und die Drähte

Die Sensoren wurden jeweils einmal zwischen den Heizungsrohren und über den Heizrohren angebracht. Das Ziel dieser Verteilung ist das Feuchteverhalten über mehrere Höhen zu bestimmen, sowohl direkt über dem Rohr als auch zwischen den Heizungsrohren. Zu jedem Feuchtigkeitssensor wurde an derselben Stelle ein Temperaturfühler montiert. Es wurde, in die händisch hergestellte Haltevorrichtung für die Messsensoren, je Öffnung immer ein Feuchtefühler und Temperaturfühler installiert. Jede Haltevorrichtung war mit 5 Öffnungen versehen, für 5 Sensoren. Die Einkapselung jedes Feuchte- und Temperaturfühlers erfolgte mittels Rundrohre aus Kunststoff, die in den Enden perforiert waren. Die vorbereiteten Sensorenblöcke sind in der Abbildung 18 dargestellt.



## Versuchsdurchführung

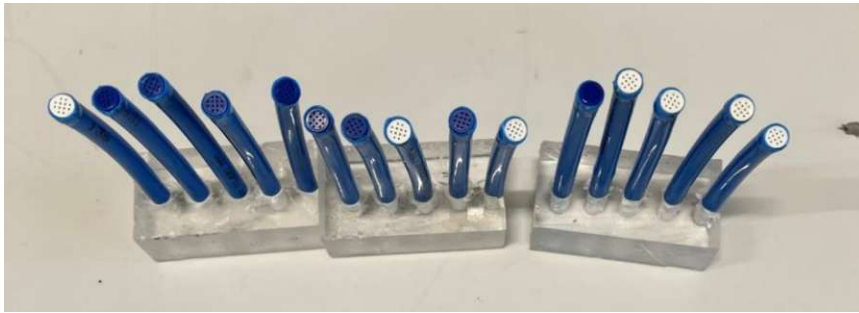


Abbildung 18 vorbereitete Sensorenblöcke

Es wurden pro Probe jeweils zwei Sensorenblöcke zu je 5 Sensoren verwendet. Folgende Feuchtigkeitssensoren und Temperatursensoren wurden herangezogen:

- Temperaturfühler: Thermoelement Typ K
- Luftfeuchtigkeitssensoren: Fa. Honeywell Typ HIH-4031

Die Anordnung der Sensoren wurde in der nachfolgenden Tabelle 1 erfasst:

# Versuchsdurchführung

Tabelle 1 Sensorenanordnung

Position der Sensorenblöcke	Ausrichtung	Probe 1 - Parkett	Probe 2-Fliesen	Position
Estrichdicke 75mm		Nummerierung		
Zwischen den Heizungsrohren	1,1 cm	5	15	Estrichoberkante
	2,6 cm	4	14	
	4,1 cm	3	13	
	5,6 cm	2	12	
	7,1 cm	1	11	Estrichunterkante
Position der Sensorenblöcke	Ausrichtung	Probe 1 - Parkett	Probe 2-Fliesen	Position
Estrichdicke 75mm		Nummerierung		
Über dem Heizungsrohr  (Seitlich in ca. 2cm vom Heizungsrohr)	1,1 cm	10	20	Estrichoberkante
	2,6 cm	9	19	
	4,1 cm	8	18	
	5,6 cm	7	17	
	7,1 cm	6	16	Estrichunterkante

## Versuchsdurchführung

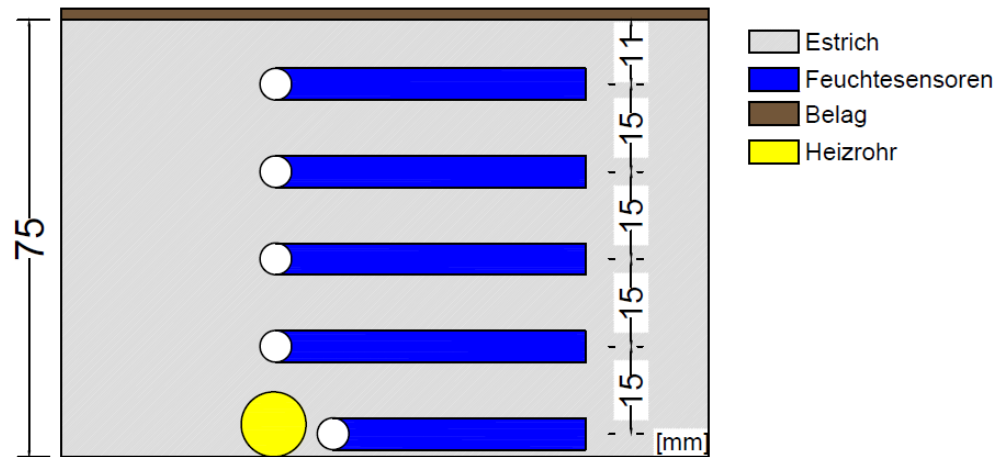


Abbildung 19 Position der Sensorenblöcke im Fall über den Heizungsrohren



Abbildung 20 Sensorenblöcke in Probe 1 und Probe 2

Abbildung 19 zeigt einen Schnitt über die Positionierung der Sensorenblöcke, in diesem Fall über den Heizungsrohren. In der Abbildung 20 sind alle Sensorenblöcke dargestellt.

Die gesamte Messung und Lagerung der Estrichproben fanden in einer Klimakammer (Abb. 21) mit einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% statt. Zur Messung der elektrischen Spannung der Feuchtefühler sowie der Temperatur in beiden Proben standen zwei Rechner durchgehend in der Klimakammer, die mittels Excel-Sheet alle 10 Minuten die Messungswerte aufnahmen.

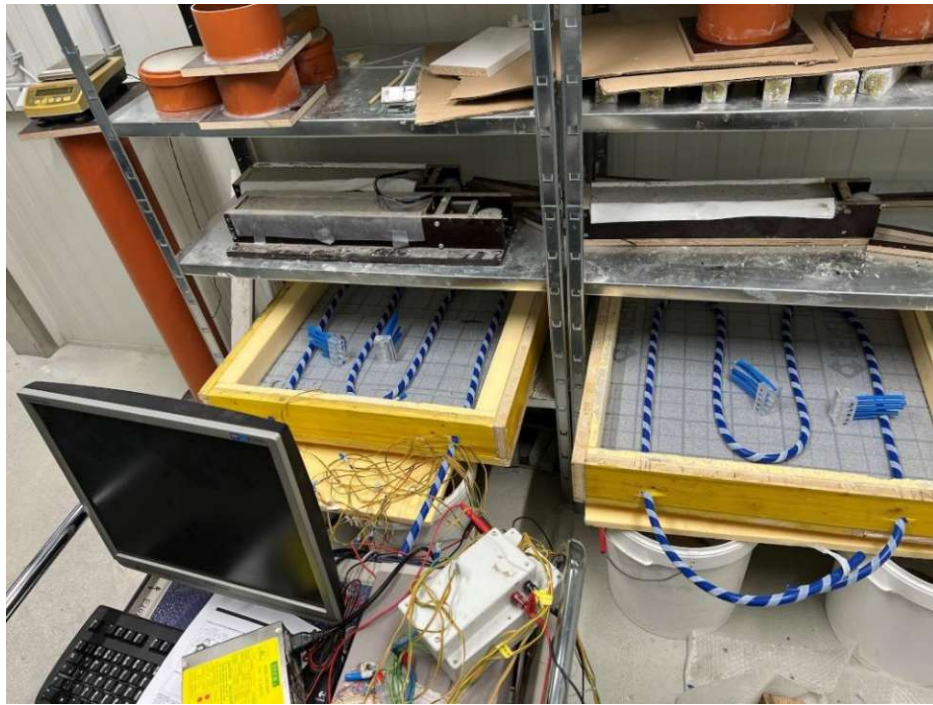


Abbildung 21 Klimakammer

### 3.2 Erstellen der Estrichmischung

Für das Erstellen der Estrichmischung wurde Wasser, Zement, Fließmittel und Zuschlagsstoffe verwendet. In der Tabelle 2 sind die einzelnen Mischverhältnisse sowohl für den Haupt- als auch für den Nebenversuch ersichtlich. Das Mischen erfolgte nach genauer Einwaage im Estrichmischer (Abb. 22). Die Schubkarre in Abbildung 23 diente als Transport für die fertige Estrichmischung.

Tabelle 2 Mischverhältnis

	Datum	Sand	Zement	Wasser	Fließmittel	W/B-Wert
Hauptversuch						
		[kg]	[kg]	[l]	[g]	[-]
Probe 1	15.02.2022	80	13,3	8	44	0,6
Probe 2	15.02.2022	80	13,3	8	44	0,6
Nebenversuch						
Probe 3	15.02.2022	10	1,67	1	5,5	0,6





Abbildung 22 Estrichmischer



Abbildung 23 Schubkarre

### 3.2.1 Verwendete Zementart, Zuschlagsstoffe und Fließmittel

Die gesamte Estrichmischung sowohl für den Hauptversuch als auch für alle Nebenversuche wurde mit dem Estrichzement E225 der Firma BAUMIT erstellt (Abb.26).

- CEM II/A-L 42,5 N Portlandzement mit Kalkstein als Zumahlstoff der Fa. BAUMIT

Als Zuschlagsstoff wurde Estrichsand mit der Korngruppe 0/4 von der Firma Schilowsky (Abb.25) verwendet. Der Sand wurde ca. 1 Monat vor dem Mischprozess in Kübeln aufgeteilt und bei Raumtemperatur zum Trocknen gelagert.

Als Fließmittel kam der MasterGlenium ACE 430 (Abb.24) von der Firma Masters Builders zum Einsatz.



Abbildung 26 Estrichzement



Abbildung 24 Fließmittel



Abbildung 25 Sandkübel

## Versuchsdurchführung

### 3.2.2 Ausbreitmaß

Der Versuch wurde nach ÖNORM EN 1015-3 durchgeführt. Um die Fließfähigkeit des Estrichzements zu überprüfen, wurde eine kegelförmige stumpfe Form auf die feuchte Glasplatte des Schlagtisches gestellt (Abb.27), mit Estrichzement verfüllt und mit einem runden Holzstampfer verdichtet. Nach der Verdichtung wurde der Trichter weggezogen und die Fließfähigkeit der Estrichprobe nach 15 Stößen bestimmt. Nach Abschließen des Vorganges, wurde der Durchmesser des ausgebreiteten Frischestrichs zweimal abgemessen und der Mittelwert gebildet [22].

Das Ausbreitmaß wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$f = \frac{d_1 + d_2}{2} [\text{mm}]$$

*Formel 4 Ermittlung Ausbreitmaß [25]*

- d<sub>1</sub> die größte Ausbreitung des Betons parallel zur Kante des Ausbreittisches
- d<sub>2</sub> die größte Ausbreitung des Betons parallel zur anderen Kante des Ausbreittisches



*Abbildung 27 Versuch für Bestimmung des Ausbreitmaßes*

Für die Untersuchung der Konsistenz wurden in den Vorversuchen verschiedene Estrichzusammensetzungen herangezogen. Als Kriterium wurde die in der Praxis übliche Estrichkonsistenz herangezogen. Es waren sechs Anläufe notwendig, um diese Konsistenz mit dem geplanten W/B-Wert und dem Fließmittel zu erreichen. Das Ausbreitmaß sowohl für den Haupt- als auch für den Nebenversuch ergab sich zu 105mm.

Versuchsdurchführung

### 3.3 Belagsverlegung

Nach dem Betonieren des Estrichs und einer Trocknungszeit von 28 Tagen wurde der Belag verlegt. Bevor der Belag verlegt wurde, war es notwendig den Feuchtegehalt des Estrichs zu bestimmen. Dieses wurde, wie schon erwähnt mittels der CM-Methode untersucht. Die genaue Vorgehensweise ist im Kapitel 2.5.2 erklärt.

Es wurden zwei verschiedene Beläge verlegt. Die erste Estrichplatte wurde mit einem Parkettbelag versehen. Auf der zweiten Estrichplatte wurde ein Fliesenbelag aufgebracht. Die genaue Vorgehensweise der Belagsverlegung wird im Zuge dieses Kapitels erläutert.

#### 3.3.1 Parkettbelag

Um das Parkett verlegen zu können, war es notwendig auf dem Estrich eine Spachtelmasse aufzutragen, um eine Ebenheit zu garantieren (Abb. 28).



*Abbildung 28 Estrichplatte mit aufgetragener Spachtelmasse*

Nach der Trocknung der Ausgleichmasse, wurde der Fußbodenaufbau mit einer Klebemasse versehen. Die Klebemasse wurde vollflächig aufgetragen, um eine garantierte Klebekraft des Parketts zu gewährleisten. Es wurde der Rohparkettkleber der Firma Pattex verwendet. Die Abbildung 29 zeigt den verwendeten Klebestoff sowie der Zahnspachtel.



## Versuchsdurchführung



Abbildung 29 Klebstoff Parkett und Zahnspachtel



Abbildung 30 Estrichplatte mit vollflächiger Klebemasse und nach Parkettverlegung

Nach dem Aufbringen des vollflächigen Klebestoffs, wurde das Parkett genau auf die Estrichfläche zugeschnitten und verlegt (Abb.30). Die Ränder der Platte wurden mit Klebeband abgeklebt, um einen Feuchtigkeitseintritt sowie Austritt über die Ränder zu vermeiden.

### 3.3.2 Fliesenbelag

Die zweite Estrichplatte wurde ebenso mit einer Spachtelmasse als Ausgleichsschicht versehen. Zum Kleben der Fliesen wurde der Fliesenkleber von der Firma Bauhaus verwendet. Der Fliesendünnbettkleber hat die Eigenschaft, dass er sehr hochflexibel ist und sowohl in den Innen- sowie in den Außenbereichen verwendet werden kann. In Abbildung 31 ist ein Foto des verwendeten Fliesenklebers ersichtlich.



## Versuchsdurchführung



Abbildung 31 Fliesenkleber



Abbildung 32 Fugenfüller



Abbildung 33 Estrichplatte mit vollflächiger Fliesenkleber und nach Verlegung der Fliesen

Nach Anbringen des Fliesenklebers wurden die Fliesen auf die Estrichfläche zugeschnitten und verklebt (Abb.33). Anschließend wurden die Fugen aufgefüllt. Für das Ausfugen der Fliesen wurde der Fugenfüller der Firma Keracolor FF Flexfuge (Abb.32) verwendet.

### 3.4 Nebenversuche

Um die verwendete Rezeptur des Estrichs zu überprüfen, war es notwendig einige Untersuchungen am erhärteten Estrich zu führen. Es wurden neben mechanischen Versuchen zur Überprüfung der Festigkeitseigenschaften auch Saugversuche zur Überprüfung des Wasseraufnahmekoeffizienten durchgeführt. Weiters wurden auch, wie in Kapitel 1 beschrieben, Versuche durchgeführt, welche Auskunft über die Kennwerte des Feuchtigkeitsverhaltens sowie der hygrischen Größen geben.

Folgende Versuche, deren Ergebnisse Gegenstand dieses Kapitels sind, wurden durchgeführt:

## Versuchsdurchführung

- Druckfestigkeitsversuch
- Biegezugfestigkeitsversuch
- Saugversuch
- CM-Messung

### 3.4.1 Biegezug- und Druckfestigkeiten

Für die Durchführung der Festigkeitsversuche wurden insgesamt 6 Prismen nach ÖNORM EN 13892-1 mit den Abmessungen 160x40x40mm (LxBxH) hergestellt (Abb.36). Die Schalung der Prismen bestand aus Stahlplatten, welche durch eine Verschraubung angezogen bzw. gelockert wurden. Vor dem Einfüllen des Estrichs wurde ein Schalöl aufgetragen, dessen Aufgabe es ist, das Ausschalen zu erleichtern. Die Verdichtung erfolgte lagenweise auf einen Rütteltisch. Um die Ebenheit lt. ÖNORM EN 13892-1 zu garantieren, war es nachdem Einfüllen des Estrichs notwendig, die Oberfläche mit der Schalungsoberkante abzuziehen. Anschließend wurden die Probekörper mit einer PE-Folie, um Oberflächenrisse zu vermeiden, zum Trocknen gelagert. Die Prüfung der Probekörper erfolgte nach 30 Tagen Erhärtungszeit. Abb.34 zeigt den Vorgang der Rüttelverdichtung. In der Abb. 35 sind die Prüfkörper im frischen Zustand nach der Herstellung erkennbar.



Abbildung 34 Rüttelverdichtung der Probekörper



Abbildung 35 Prüfkörper im frischen Zustand



Abbildung 36 Prüfkörper im erhärteten Zustand

Mit den hergestellten Estrichprismen (Abb.36) wurde nun die Biegezugfestigkeit nach der ÖNORM EN 13892-2 bestimmt. Das verwendete Prüfgerät war die Universalprüfmaschine Typ Zwick 250. Es wurde jene Last bestimmt, welche notwendig ist, um den Prüfkörper in Feldmitte zu Bruch zu bringen. Der Prüfkörper wurde zwischen den zwei Stahlauflegerollen mit einem Abstand von 100mm (Achsabstand) positioniert und mittig von einer Stahllastrolle, welche etwa 50mm lang ist, belastet. Die Lastaufbringung erfolgte durch das Absenken der Stahllastrolle in Richtung der Auflagerrollen. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug  $50 \pm \text{N/sec}$ . Die Last zum Zeitpunkt des Lasteintrittes, wurde auf dem Messgerät gespeichert und als  $F_f$  bezeichnet.

Abbildung 37 zeigt die Prismen nach dem Biegezugfestigkeitsversuch.

Die Biegezugfestigkeit  $R_f$  wurde mit folgender Formel berechnet:

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

Formel 5 Biegezugfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 [3]

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



## Versuchsdurchführung



Abbildung 37 Prismen nach Biegezugfestigkeitsversuch

Nach den Biegezugfestigkeitsversuchen (Abb.38) erfolgte im Anschluss die Druckfestigkeitsversuche (Abb.39). Es wurden dabei, die nun in der Hälfte geteilten Prüfkörper des Biegezugversuches verwendet. Die Versuchsdurchführung wurde ebenfalls mit der Prüfmaschine der Firma Zwick durchgeführt. Die Belastungsanordnung der Prüfmaschine bestand aus zwei Platten mit einer Fläche von 40x40mm und einer Plattenstärke von 10 mm. Dieser Versuch wurde ebenfalls stoßfrei durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgte, indem die obere Platte an die untere Platte gedrückt wurde. Es ergaben sich im Zuge der Biegezugfestigkeitsversuche 12 Hälften, welche zu untersuchen waren. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug in etwa 500N/sec. Die Bruchlast der Probe wurde mit  $F_c$  bezeichnet.

Die Druckfestigkeit  $R_c$  ist mit folgender Formel lt. ÖNORM zu berechnen:

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

Formel 6: Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 [3]

$R_c$  Druckfestigkeit [ $N/mm^2$ ]

$F_c$  Bruchlast [N]

A mit den Auflagerplatten in Berührung stehende Fläche des Probekörpers [ $mm^2$ ]

## Versuchsdurchführung



Abbildung 38 Biegezugfestigkeitsversuch



Abbildung 39 Druckfestigkeitsversuch

Vor der Untersuchung wurde im Zuge der Feststellung der Druck- und Biegezugfestigkeiten die Rohdichte der Prüfkörper ermittelt. Die Prüfkörper wurden mit einer Schublehre auf 0,1mm vermessen und auf 0,01 g gewogen. Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte nach folgender Formel:

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} \text{ [in g/cm}^3\text{]}$$

Formel 7: Ermittlung der Rohdichte

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in folgender Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3 Masse und Dichte der Prüfprismen

	Volumen=256cm <sup>3</sup>	
Probnummer	Masse[g]	Dichte[g/cm <sup>3</sup> ]
1	530,21	2,07
2	489,54	1,91
3	540,97	2,11
4	515,97	2,02
5	507,67	1,98
6	520,48	2,03

## Versuchsdurchführung

Die Güteanforderungen nach **ÖNORM B 3732** ist in den untenstehenden Tabellen (4-6) ersichtlich.

Tabelle 4 Mindestfestigkeiten Estriche und Estriche auf Trennlagen nach ÖNORM B 3732 [10]

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

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

Tabelle 5 Druckfestigkeitsklasse für Estrichmörtel nach DIN EN 13813 [24]

Klasse	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80

Tabelle 6 Biegezugfestigkeitsklassen für Estrichmörtel nach DIN EN 13813 [24]

Klasse	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F10	F15	F20	F30	F40	F50
Biegezugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30	40	50

## Versuchsdurchführung

Die Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Festigkeiten aller Prüfkörper erfüllen die Anforderungen der ÖNORMEN und der EN 13813.

Tabelle 7 Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsversuche

	Biegezugfestigkeiten				Druckfestigkeiten			
	Belastungsgeschwindigkeit = 50N/sec				Belastungsgeschwindigkeit = 500N/sec			
	Prüfkörperlänge= 160mm				Fläche A = 1600mm <sup>2</sup>			
	Anforderung der Norm mind. 4N/mm <sup>2</sup>				Anforderung der Norm mind. 20 N/mm <sup>2</sup>			
					Links		Rechts	
Probenummer	d[mm]	b [mm]	F <sub>f</sub> [N]	R <sub>f</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> [N]	R <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> [N]	R <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
1	40,05	40,6	1379,6	5,08	32300	20,19	32900	20,56
2	40,3	40,02	1630,6	6,02	36300	22,69	32823	20,51
3	40,22	41,5	2511,4	8,79	38700	24,18	34300	21,43
4	40,30	39,5	2100,8	7,86	35900	22,43	36400	22,75
5	40,19	39,7	2239,3	8,38	34700	21,68	33600	21
6	40,20	40,8	1825,4	6,65	35400	22,13	34300	21,44



## Versuchsdurchführung

### 3.4.2 Saugversuch

Als Grundlage für diesen Versuch wurde die DIN EN ISO 15148 herangezogen. Dieser Versuch dient zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten, welcher die Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte beschreibt. Im Zuge dieser Untersuchung wurden insgesamt 6 Prüfprismen überprüft. Ziel dieses Versuches ist es, dass im Falle des Estrichs, den Flüssigkeitskoeffizienten zu berechnen.

Bevor mit dem Versuch begonnen wurde, wurden die 6 erhärteten Prüfprismen auf allen vier Längsseiten mit einem Kunstharzlack angestrichen und zum Trocknen zurückgelegt. Die Aufgabe der Beschichtung ist es, die Wasserabgabe durch Verdunstung über allen Längsseiten zu verhindern. Somit ist die Wasseraufnahme nur über die im Wasser eingetauchte Stirnseite möglich. Auf der unten dargestellten Abbildung 40 sind die beschichteten 6 Prüfkörper zu sehen.



Abbildung 40 Beschichtete Prismen für den Saugversuch



## Versuchsdurchführung

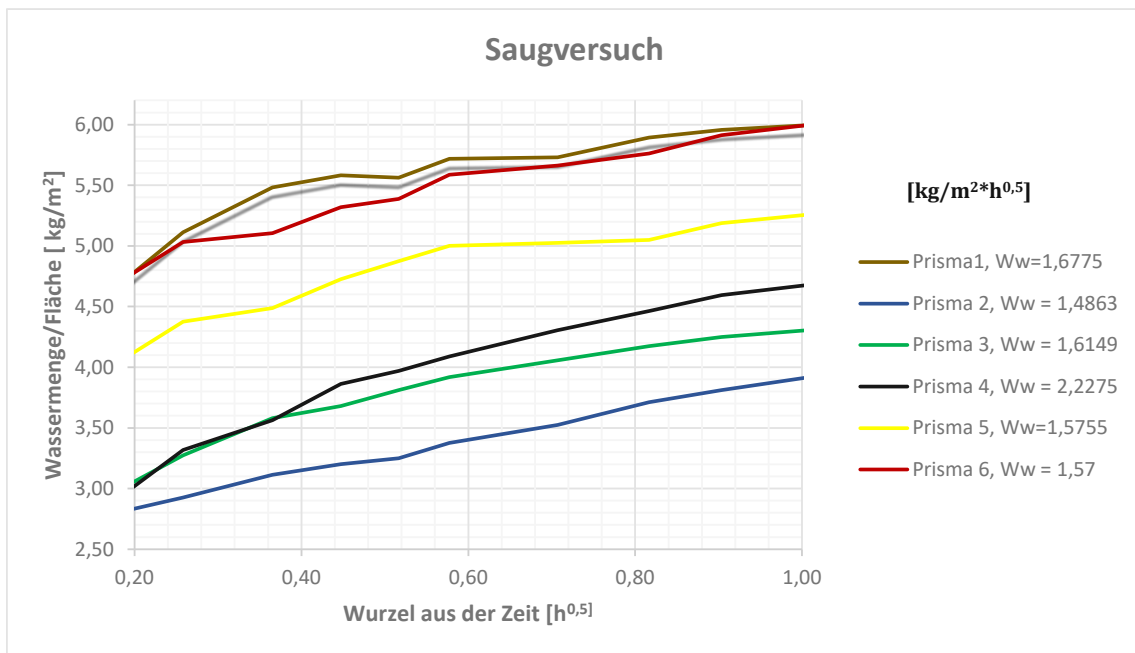
Vor dem Beginn des Versuches sind alle Prüfkörper abgewogen und danach in einem Behälter mit einer 1,5 cm hohen Wasserschicht aufgestellt worden. Die Prüfkörper wurden im Wasser auf Holzleisten platziert, um sicherzustellen, dass die Proben nicht auf dem Boden stehen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Stirnseite einer vollflächigen Wasseraufnahme ausgesetzt ist. Mit dem Eintauchen des Probekörpers (Abb.41) wurde auch die Stoppuhr gestartet. Es wurden insgesamt 10 Gewichtsmessungen durchgeführt. Die zeitlichen Abstände sind mit **1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 12 min, 16 min, 20 min, 30 min, 40 min, 64 min** gewählt worden.



*Abbildung 41 Prüfkörper in einem wassergefüllten Behälter*

Die Ergebnisse dieses Versuches wurden im nachfolgenden Diagramm 1 aufgetragen. Es wurde auf der X-Achse die Wurzel der Zeit und auf der Y-Achse der Gewichtszuwachs pro Aufnahme­fläche, bezogen auf das Anfangsgewicht, aufgetragen. Die Steigung jener Gerade, welche im Diagramm dargestellt ist, entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten des jeweiligen Probekörpers. In der Legende des Diagramms sind die Werte dargestellt.

Diagramm 1 Saugversuch



Der Mittelwert der 6 Wasseraufnahmekoeffizienten beträgt  $1,69 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ .

Die Berechnung des Flüssigkeitsleitkoeffizienten  $\kappa_F$  erfolgt nach der untenstehenden Formel. Für die Berechnung wurde der Mittelwert herangezogen.

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

Formel 8: Berechnung Flüssigkeitsleitkoeffizient  $[\text{m}^2/\text{h}]$  [11]

$W_w$  Wasseraufnahmekoeffizient  $[\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}]$

$\rho_w$  Dichte des Wassers  $[\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3]$

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

$\kappa_F$  Maximalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient  $[\text{m}^2/\text{h}]$

$\kappa_0$  Minimalwert Flüssigkeitsleitkoeffizient  $[\text{m}^2/\text{h}]$

$\kappa_F / \kappa_0 = 400$  [11]

Für den durchgeführten Versuch beträgt der Flüssigkeitskoeffizient  $4,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ .

## Versuchsdurchführung

### 3.4.3 Feuchtigkeitsmessung an einer Probe

Der Feuchtigkeitsgehalt wurde im Zuge dieses Nebenversuches mit der CM-Methode bestimmt. Die CM-Methode ist die bekannteste und am meisten angewendete Methode der Feuchtebestimmung. Sie zählt zu den zerstörenden Methoden. Es wurde ein Probekörper mit demselben Mischverhältnis des Estrichs, wie beim Hauptversuch verwendet, für die CM-Messung, herangezogen. Um den Probekörper leichter auszuschalen, wurde eine Folie an den Rändern der kreisförmigen Estrichform mitbetoniert. In der unteren Abbildung 42 ist der Probekörper für die CM-Messung dargestellt.



Abbildung 42 Probekörper für Durchführung CM-Methode

Der genaue Ablauf der CM-Messung ist in Kapitel 2.5.2 beschrieben. Es wurde im Zuge der Versuchsdurchführung aus der unteren Hälfte des Probeguts, Estrich abgestemmt. Dabei wurden je Probe 20 g Estrich eingewogen und die CM-Messung wurde durchgeführt. Anhand des angezeigten Druckes am Manometer konnte der Wassergehalt bestimmt werden.

Die Ergebnisse der CM-Messung sind in der Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Ergebnisse CM-Messung

CM-Messung				
Probennummer	Einwaage [g]	Druck [bar]	Wassergehalt [CM - %]	Zustand
1	20,00	0,38	1,90	trocken
2	20,00	0,45	2,25	trocken

## 4 Hauptversuch

Der Hauptversuch dieser gegenständlichen Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Temperatur- und Feuchteverteilung in Zementestrichen. Der zeitliche Ablauf des gesamten Versuches wurde in der Abb. 43 zur Veranschaulichung dargestellt.



Abbildung 43 Zeitlicher Ablauf des Versuchsaufbaus

## Hauptversuch

Die Messung der Feuchte und Temperaturverteilung wurde anhand von Feuchtigkeitssensoren und Temperaturfühlern ermittelt. Die Sensoren wurden, wie im Kap. 3.1 erwähnt, in verschiedenen Höhen im Aufbau betoniert. Der Hauptversuch gliedert sich in drei Phasen. Die erste Phase ist die Ausheizphase von der Herstellung des Frischestrichs bis zur Belagsverlegung. Die zweite Phase beginnt nach Belagsverlegung bis zur 2.Ausheizphase. Die dritte und zugleich die letzte Phase beginnt nach dem Ende der 2.Ausheizphase und endet mit dem Versuchsende.



*Abbildung 44 Estrichprobe 1 mit Parkettbelag links und Estrichprobe 2 mit Fliesenbelag rechts*

Die Estrichplatten wurden am 15.02.2022 betoniert und beide Proben wurden in der Klimakammer mit dem Klima 20°C/65% zum Trocknen gelagert. Im Laufe des Versuches, kam es zu technisch bedingten Ausfällen in der Klimakammer, wobei das Wunschklima von 20°C/65% während des gesamten Versuches nicht eingehalten werden konnte. Die Ausheizperiode wurde mittels Fußbodenheizung geführt. Nach erfolgreichem Abschluss der Ausheizperiode, am 49. Tag, wurde auf die erste Estrichplatte ein Parkettboden angebracht und auf die zweite Estrichprobe ein Fliesenbelag aufgebracht. Das Ziel dieser experimentellen Untersuchung war es, das Feuchte- und Temperaturverhalten bei der Austrocknung über die Zeit vor und nach der Belagsverlegung zu beobachten (Abb.44).

## Hauptversuch

### 4.1 Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren

Nach dem Abschluss der experimentellen Untersuchung im Labor wurde mit der Auswertung der aufgezeichneten Werte begonnen. Die aufgezeichneten Werte wurden in Form von elektrischen Spannungen ausgegeben. Es war dafür vor Versuchsbeginn notwendig die Feuchtfühler bei einer Temperatur von 20°C und den relativen Luftfeuchtigkeiten von 50 %, 65 %, 80%, 90% im Klimaschrank zu kalibrieren. Dabei wurden die elektrischen Spannungen in einem zeitlichen Abstand von 20 Minuten gemessen. Es wurden dabei die Gleichspannungen in Volt jedes Feuchtigkeitssensors gemessen. Somit war es möglich einen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und elektrischer Spannung herzustellen. Dieser Zusammenhang ist in den Diagrammen 2 und 3 dargestellt. In der Tab. 9 sind die verschiedenen Gleichspannungswerte bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeitswerten ersichtlich.

Beide Wertepaare wurden in einem Koordinatensystem aufgetragen. Es ergab sich somit eine Ausgleichsgerade mit der Steigung  $k$  und der Verschiebung  $d$ . Für jeden einzelnen Sensor wurde eine Ausgleichsgerade im Zuge der Kalibrierung ermittelt, welche über die Umrechnung der gemessenen elektrischen Spannungen Rückschlüsse über die relative Luftfeuchtigkeit zieht.

*Tabelle 9 Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren*

Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Sensor 101	Sensor 120
°C	[%]	Gleichspannung [Volt]	
20	50	2,62	2,57
20	65	3,09	3,04
20	80	3,57	3,53
20	90	3,9	3,88

Die Kalibrierung der Feuchtemessfühler 1 und 20 ist in den Diagrammen 2 und 3 dargestellt. Die Ausgleichsgeraden wurden zur Veranschaulichung für diese beiden Sensoren angeführt.



Diagramm 2 Kalibrierung Sensor 120

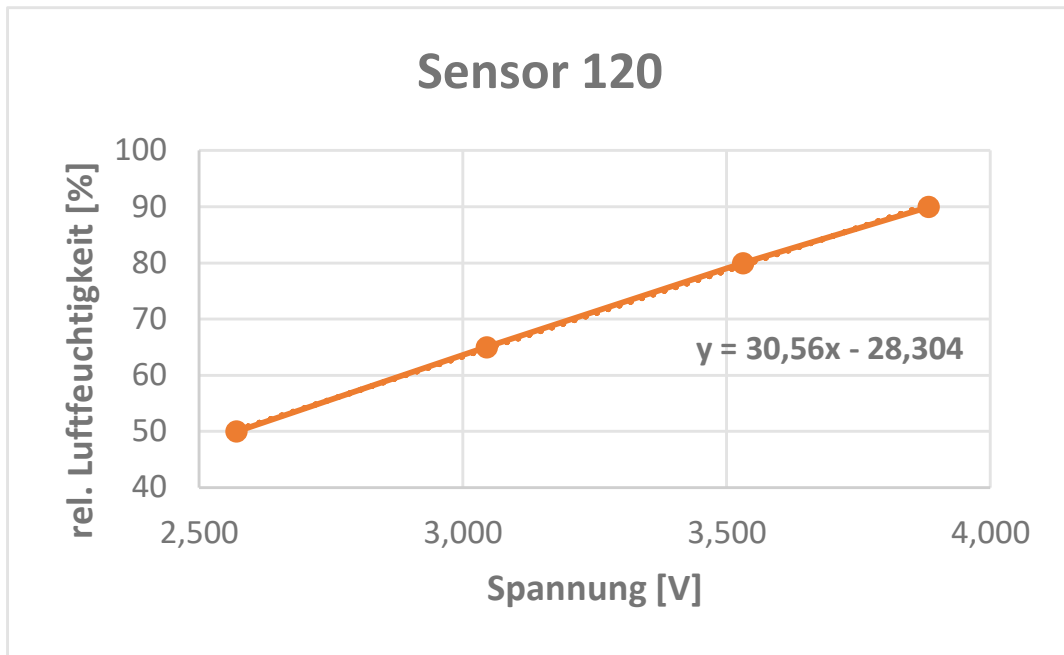
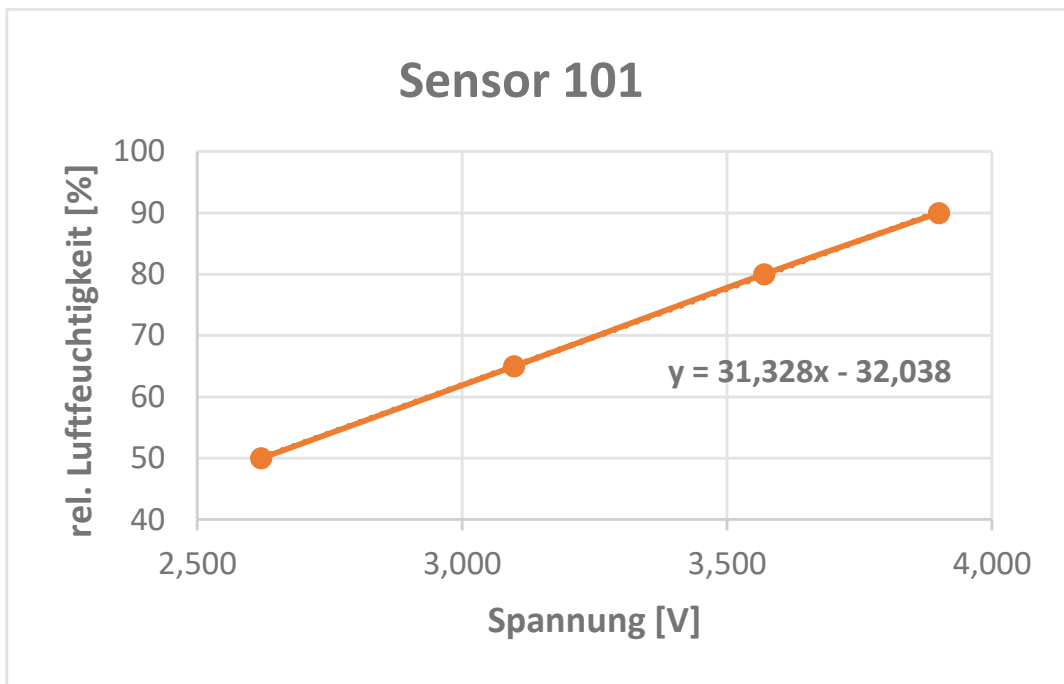


Diagramm 3 Kalibrierung Sensor 1



## Hauptversuch

### 4.2 Temperaturverlauf innerhalb der Estrichproben

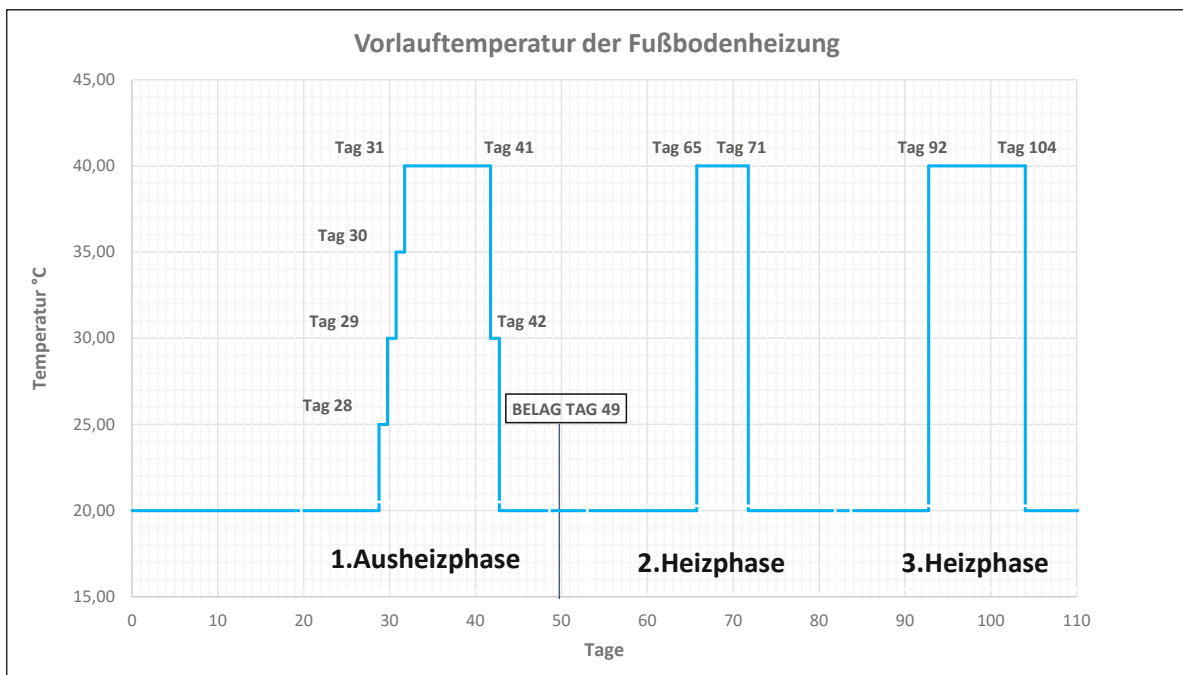
Es wurde, wie bereits in der gegenständlichen Diplomarbeit erwähnt, zu jedem Feuchtigkeitssensor ein Temperatursensor eingebaut. Um die Auswertung des Temperaturverlaufs innerhalb der Probe zu kennen, ist es wichtig, die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung anzugeben. Im Diagramm 4 ist diese ersichtlich.

Nach dem 28. Tag hat die erste Ausheizphase begonnen. Am 29. Tag wurde die Fußbodenheizung auf 25 Grad eingestellt. Die Vorlauftemperatur wurde bis zum 31. Tag täglich um 5 Grad erhöht. Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur von 40°C wurde diese 10 Tage lang konstant gehalten. Am 41. Tag wurde die Temperatur auf 30°C Grad reduziert und am 42. Tag auf 20 Grad reduziert. Am 49. Tag wurden die Beläge verlegt.

Rund 16 Tage nach Belagsverlegung startete die zweite Heizphase, dafür wurde die Ausgangstemperatur von 20°C direkt auf 40°C eingestellt. Die Vorlauftemperatur von 40°C wurde 6 Tage später genau am 71. Tag des Ausheizversuches auf 20 Grad verringert.

Am 92. Tag startete die dritte Heizphase. Die Temperatur wurde ebenfalls abrupt von 20°C auf 40°C eingestellt. Die Vorlauftemperatur von 40°C wurde 12 Tage lang konstant gehalten. Am 104. Tag wurde die Temperatur erneut auf die Ausgangstemperatur von 20°C verringert.

Diagramm 4 Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung





## Hauptversuch

In den nachfolgenden Diagrammen ist eine Übersicht über die Temperaturverläufe dargestellt. Die Messung der Temperaturverläufe erstreckt sich über die gesamte Trocknungszeit. Zum besseren Verständnis wurde eine Übersicht über die genaue Positionierung der Sensoren zusammengestellt.

- Sensorblock 1 (z.): Sensor 1 bis 5 in der Probe 1 (Parkett) zwischen den Heizungsrohren
- Sensorblock 1 (ü.): Sensor 6 bis 10 in der Probe 1 (Parkett) über dem Heizungsrohr
- Sensorblock 2 (z.): Sensor 11 bis 15 in der Probe 2 (Fliesen) zwischen den Heizungsrohren
- Sensorblock 2 (ü.): Sensor 16 bis 20 in der Probe 2 (Fliesen) über dem Heizungsrohr

Die Sensoren wurden zur besseren Übersicht immer von oben nach unten benannt, das bedeutet, dass z.B. der Sensor 16 in einer Tiefe von 7,1 cm liegt und der Sensor 20 in einer Tiefe von 1,1 cm über fertig betonierter Estrichoberkante liegt.

Nach 28 Tagen Erhärtungszeit begann die Ausheizphase des Estrichs. Diese 1.Ausheizphase ist in den unten dargestellten Temperaturverläufen (Diagramme 5-8) ersichtlich (Tag 28 bis Tag 41). Während der 1.Ausheizphase ist zu beobachten, dass die Temperaturfühler direkt über dem Heizungsrohr höhere Temperaturwerte als auf der Estrichoberfläche messen. Der Sensorblock 2 (ü.) spiegelt diesen Sachverhalt sehr deutlich. Der Temperaturunterschied zwischen oben und unten ist auf die Aktivierung der Fußbodenheizung zurückzuführen, welche 4 Tage lang um 5 °C erhöht wurde und dann konstant auf 40 °C 10 Tage lang gehalten wurde. Nach dem schrittweisen Abschalten der 1.Ausheizphase kommt es zu einer Umkehrung im Temperaturverlauf. Hier ist auch das Temperaturgefälle in der Probe bemerkbar. Die höher positionierten Sensoren nehmen geringfügig höhere Temperaturwerte an als auf der Unterseite auf.

Der Sensorblock 1 & 2 (z.) zeichnet gegenüber dem Verlauf des Sensorblocks 1&2 (ü.) eine größere Spreizung im Temperaturgefälle. Die Sensoren über dem Heizungsrohr messen im Gegensatz zu den Sensoren zwischen den Heizungsrohren höhere Temperaturwerte. Der Grund für die höheren Temperaturwerte ist die Nähe der Temperatursensoren zu den Heizungsrohren während der Heizphase. Ab dem Tag 92 kommt es zu einem leichten Anstieg in den Proben 1&2 zwischen den Heizungsrohren in der Temperaturkurve, da die Raumtemperatur außerplanmäßig erhöht wurde.

Im Temperaturverlauf kam es zu einigen Ausfällen, welche aber keine Auswirkung auf den Gesamtverlauf hatte, da der Verlauf im Zuge dieses Ausfalls konstant verlief. In der 2. Heizphase an den Tagen 65 bis 71 ist ein konstanter Verlauf zu beobachten. Im Allgemeinen ist jede abrupte Änderung des Temperaturverlaufs auf das Abschalten der Fußbodenheizung zurückzuführen.

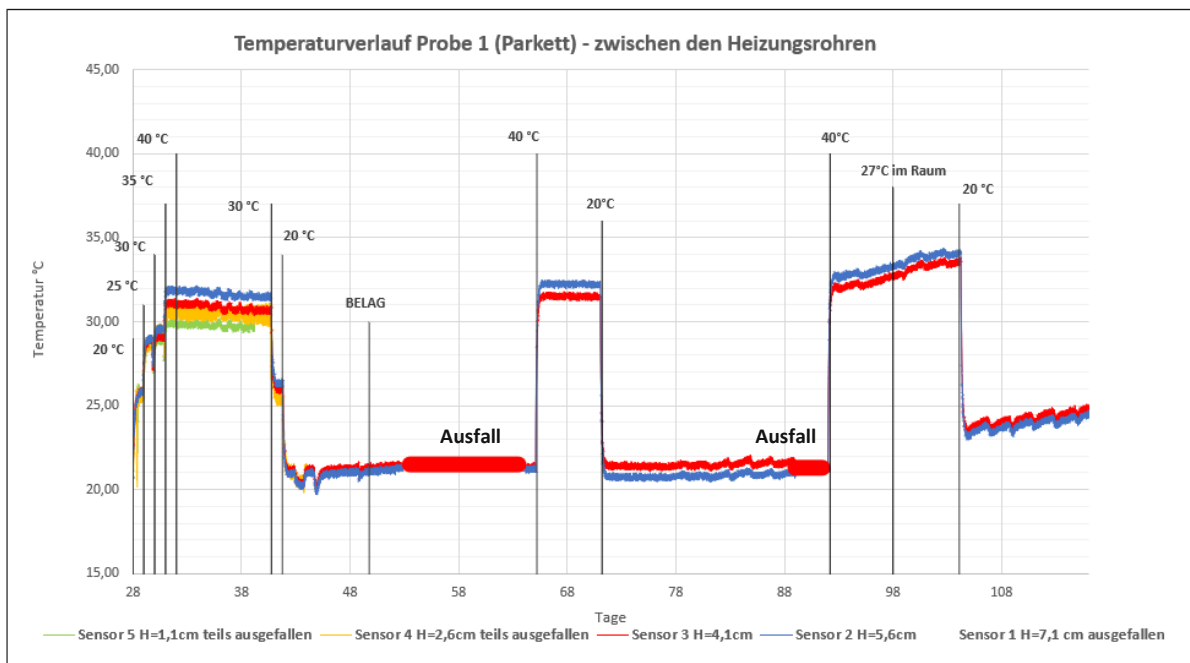
## Hauptversuch

In der 3.Heizperiode ist kein konstanter Verlauf mehr ersichtlich. Diese Änderungen im Temperaturverlauf sind auf technisch bedingte Schwankungen zurückzuführen. Die vorgesehene Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit konnten in diesem Abschnitt nicht eingehalten werden. Es kam zu einer Erhöhung der Temperatur in der Klimakammer auf ca. 27°C. Die Erhöhung der Temperatur in der Klimakammer zeigt sich auch nach dem Ende der 3.Heizperiode deutlich. Obwohl die Fußbodenheizung deaktiviert ist, zeigt der Temperaturverlauf nach dem Ende der 3.Heizphase höhere Temperaturwerte (23°C-25°C) an.

Generell lässt sich anmerken, dass vergleichsweise der Verlauf über dem Heizungsrohr gegenüber dem Verlauf zwischen den Heizungsrohren eine größere Spreizung im Temperaturverlauf sowie höhere Temperaturwerte aufweist. Außerdem lässt sich sagen, dass bei beim Parkettbelag die Temperaturen im Allgemeinen gering höher sind als beim Fliesenbelag, was auf die geringe Wärmeleitfähigkeit des Holzes zurückzuführen ist. Weiters lässt sich sagen, dass einige Sensoren teils ausgefallen sind bzw. komplett ausgefallen sind. Die Sensoren, welche fehlerhafte Daten lieferten, wurden aus diesem Grund als beschädigt gekennzeichnet und nicht dargestellt.

In den Diagrammen 5-8 sind die verschiedenen Temperaturverläufe dargestellt.

Diagramm 5 Temperaturverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren



# Hauptversuch

Diagramm 6 Temperaturverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr

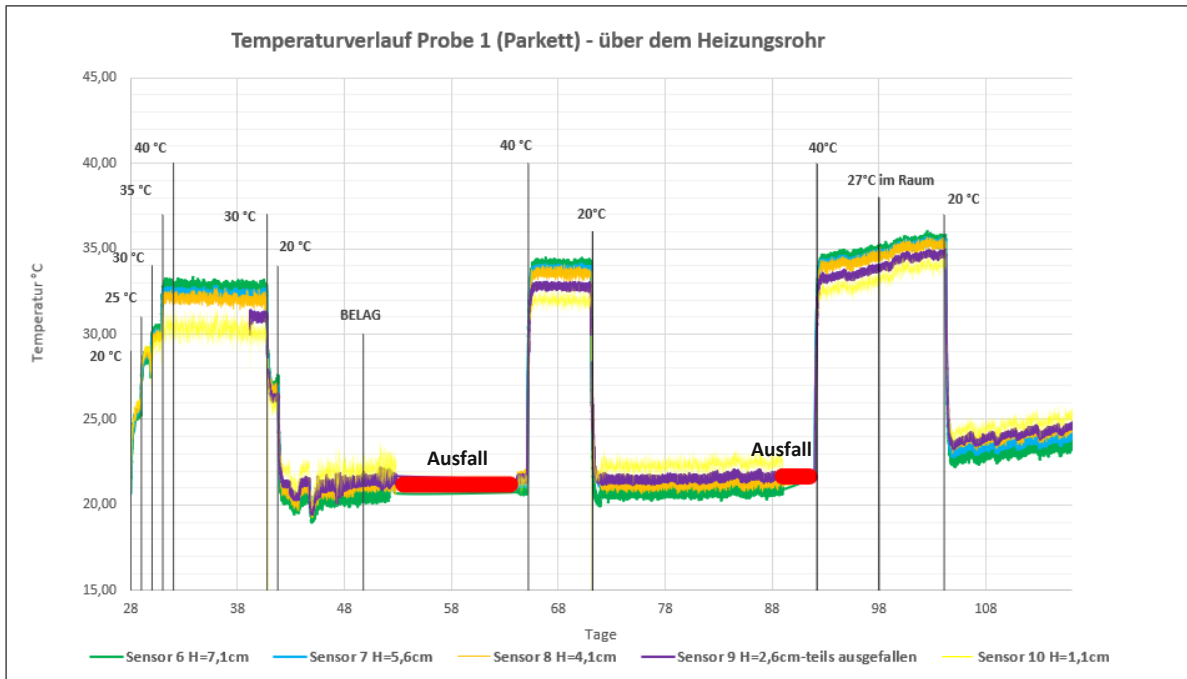
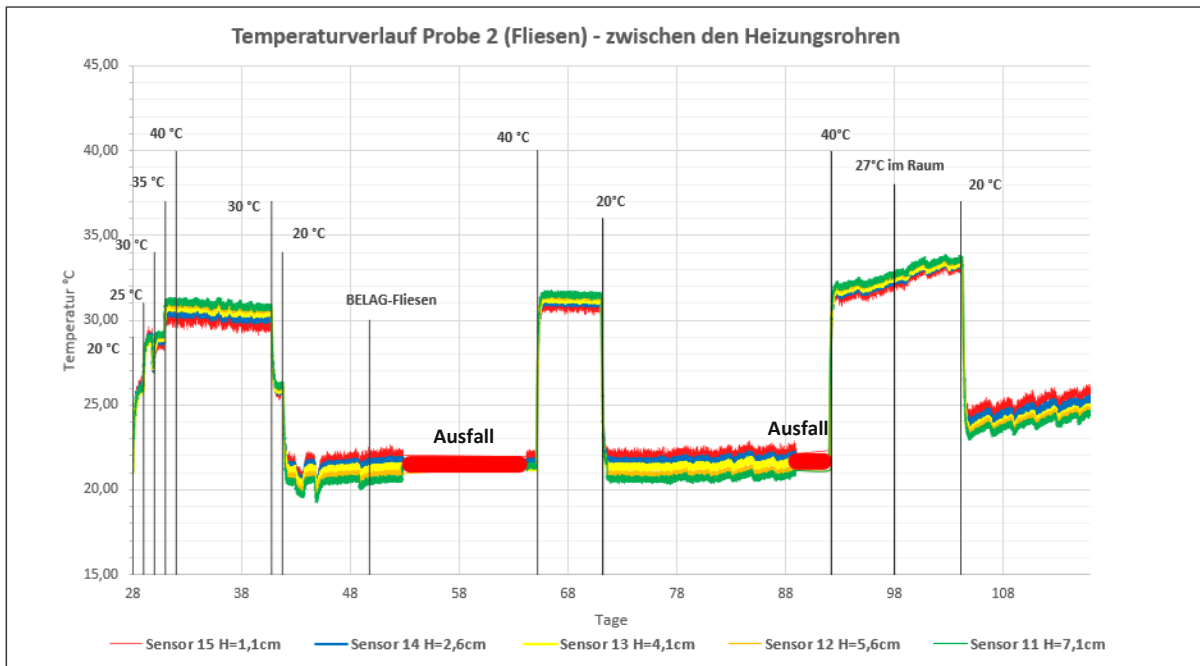
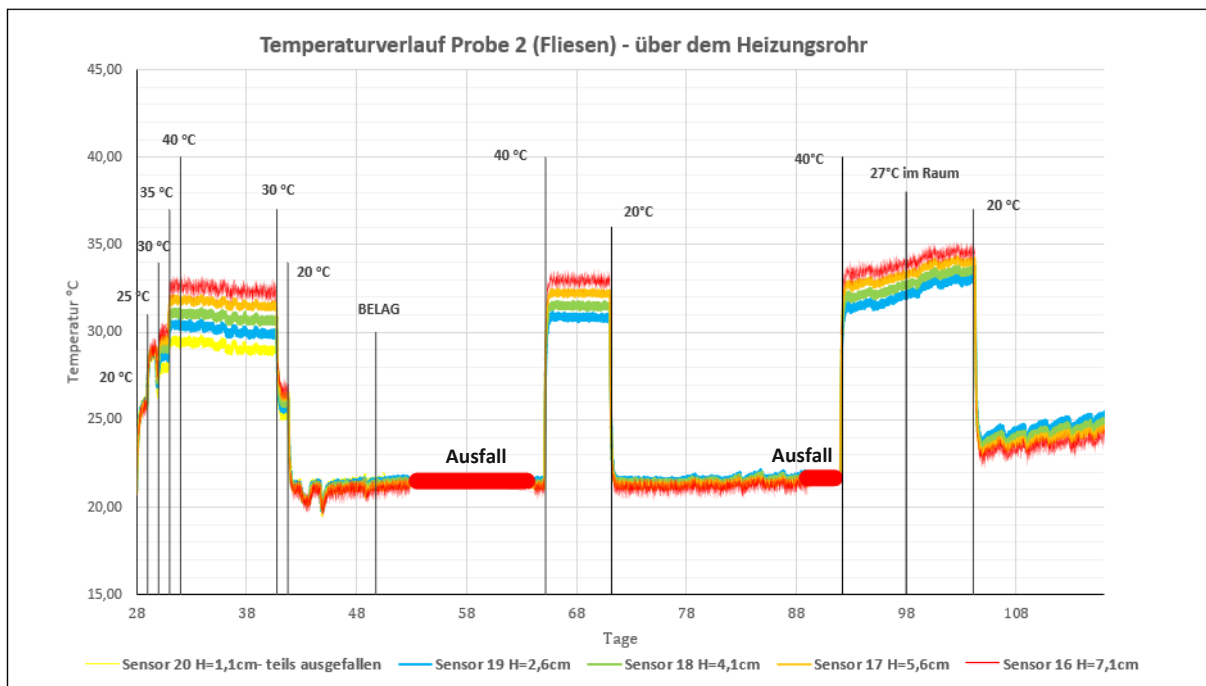


Diagramm 7 Temperaturverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren



## Hauptversuch

Diagramm 8 Temperaturverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr



### 4.3 Feuchteverhalten innerhalb der Estrichproben

Das Feuchteverhalten in Form der relativen Luftfeuchtigkeit innerhalb der beiden Estrichproben wurde ebenso auf den gleichen Stellen wie die Temperaturverteilung gemessen. Der Feuchteverlauf ist in den nachfolgenden Diagrammen über die gesamte Versuchsdauer dargestellt. Zur leichteren Übersicht wurde eine Übersicht über die genaue Positionierung der Feuchtefühler nochmals aufgelistet.

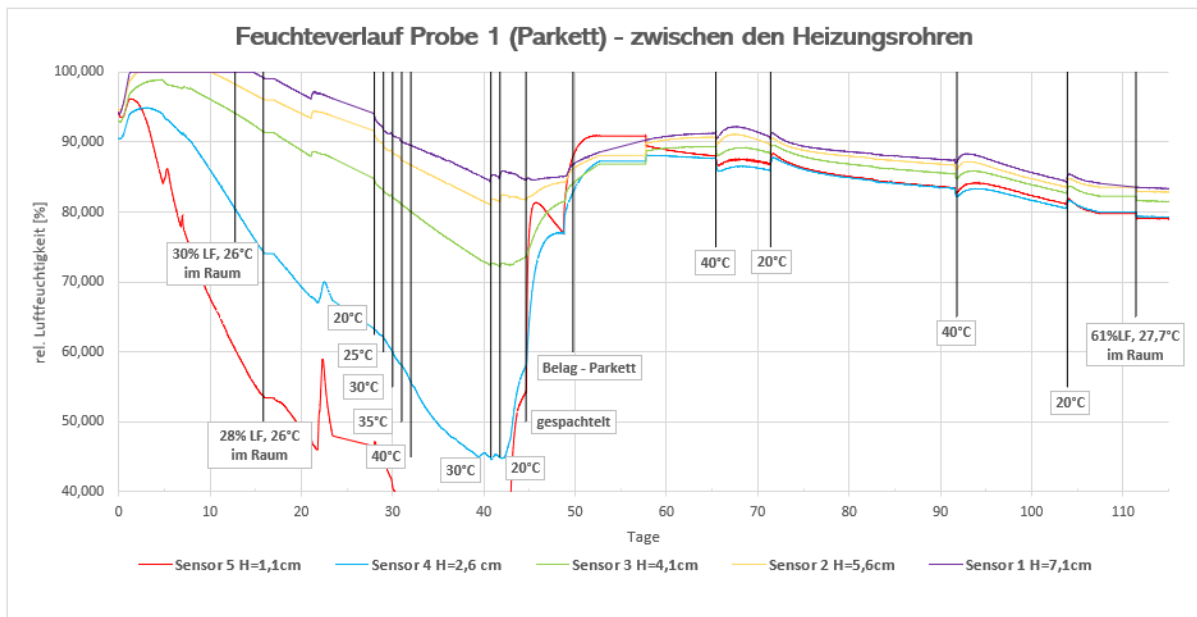
- Sensorblock 1 (z.): Sensor 1 bis 5 in der Probe 1 (Parkett) zwischen den Heizungsrohren
- Sensorblock 1 (ü.): Sensor 6 bis 10 in der Probe 1 (Parkett) über dem Heizungsrohr
- Sensorblock 2 (z.): Sensor 11 bis 15 in der Probe 2 (Fliesen) zwischen den Heizungsrohren
- Sensorblock 2 (ü.): Sensor 16 bis 20 in der Probe 2 (Fliesen) über dem Heizungsrohr

Es wurde pro Probekörper jeweils ein Sensorblock über dem Heizungsrohr und zwischen den Heizungsrohren platziert. Hier wurden, zur besseren Übersicht, die Sensoren immer von oben nach unten benannt. Das heißt, dass z.B. Sensor 16 auf einer Tiefe von 7,1 cm liegt und der Sensor 20 auf einer Tiefe von 1,1 cm über fertig betonierter Estrichoberkante liegt.

## Hauptversuch

Im Allgemeinen ist ergänzend zu sagen, dass technisch bedingt die Klimakammer während des gesamten Versuches Ausfälle hatte und somit die Wunschtemperatur von 20°C und 65% relativer Luftfeuchte nicht eingehalten werden konnte. Weiters ist noch zu erwähnen, dass in den Diagrammen 9-12 beim 58.Tag ein Sprung in der Kurve zu sehen ist. Der Grund für diesen Sprung sind Ausfälle von ungefähr 6 Tagen während des Messvorganges.

Diagramm 9 Feuchteverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren



Betrachtet man das Diagramm 9 sieht man, dass die Feuchtigkeit innerhalb der Estrichproben erwartungsgemäß von oben nach unten trocknet. Die Sensoren 4 und 5, welche auf den verschiedenen Höhen von 1,1 cm und 2,6 cm im Estrich positioniert sind, wiesen im Zuge des Feuchteverlaufs eine stetige Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit an. Weiters ist zu beobachten, dass die tiefgelegenen Sensoren 1 und 2 sofort nach dem Betonieren über ca. 2 Wochen die Feuchtigkeit von 100% annahmen.

In der 1. Ausheizphase kam es temperaturbedingt zu einem starken Feuchteabfall, der nach dem Ende wieder anstieg, da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann. Hier ist auch die Spreizung (Feuchtegefälle) sehr groß. Ein stärkerer Feuchteabfall ist beim Start des Ausheizens nur in den oberen Messstellen erkennbar. Die relative Luftfeuchtigkeit nahm mit jeder Steigerung der Temperatur der Fußbodenheizung ab. Das stufenweise Abschalten der Fußbodenheizung von 40°C auf 30°C und 30°C auf 20°C zeigt sich ebenso durch den erneuten Anstieg der relativen Luftfeuchte bemerkbar. Jede einzelne Temperaturänderung machte sich im Feuchteverlauf klar und deutlich bemerkbar, was

## Hauptversuch

natürlich auch die Richtigkeit des Feuchteverlaufs bestätigt. Aus diesem Grund kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Ausheizvorgang Auswirkung auf das Feuchteverhalten hat.

Vor der Belagsverlegung musste die Ebenheit der Estrichoberfläche hergestellt werden, woraufhin die Probe gespachtelt wurde. Durch das Spachteln nahm die Oberseite mehr Feuchtigkeit auf. Zum Zeitpunkt der Verlegung des Belages ist die relative Luftfeuchtigkeit ca. um 12 bis 16% geringer als zum Beginn des Versuches.

Eine weitere interessante Bemerkung ist das Verhalten nach dem Aufbringen des Fußbodenbelags. Nach der Belagsverlegung ist das Gefälle sehr gering, das heißt, dass die Feuchtigkeit über dem Querschnitt gleichmäßig verteilt ist. Das bedeutet auch, dass die Schwindvorgänge insbesondere zu Beginn zwischen Ober- und Unterseite sehr unterschiedlich sind und daher vor der Belagsverlegung die Gefahr einer Rissbildung an der Oberseite groß ist.

Besonders interessant ist die rapide Steigerung der Feuchtigkeit in allen Sensoren zu beobachten. Besonders auffällig ist es beim Sensor 5, welcher vor dem Aufbringen des Parketts einen Wert von ca. 77% zeigt und nach der Belagsverlegung einen Wert von fast 90% zeigt. Der Sachverhalt des Diffusionsstromes bestätigt sich ebenso im Laufe dieses Experiments. Die Schwankungen der Feuchte zeigen sich in den oberen Sensoren, da in diesem Abschnitt die Feuchtigkeit schneller aus der Probe entweicht und schnell nach dem Ende des Ausheizens wieder aufgenommen werden kann. Die Verläufe zeigen deutlich, dass die Positionierung des Sensors einen erheblichen Einfluss auf seinen Feuchtigkeitswert hat. Die Sensoren im unteren Bereich sind um einiges feuchter als im oberen Estrichbereich.

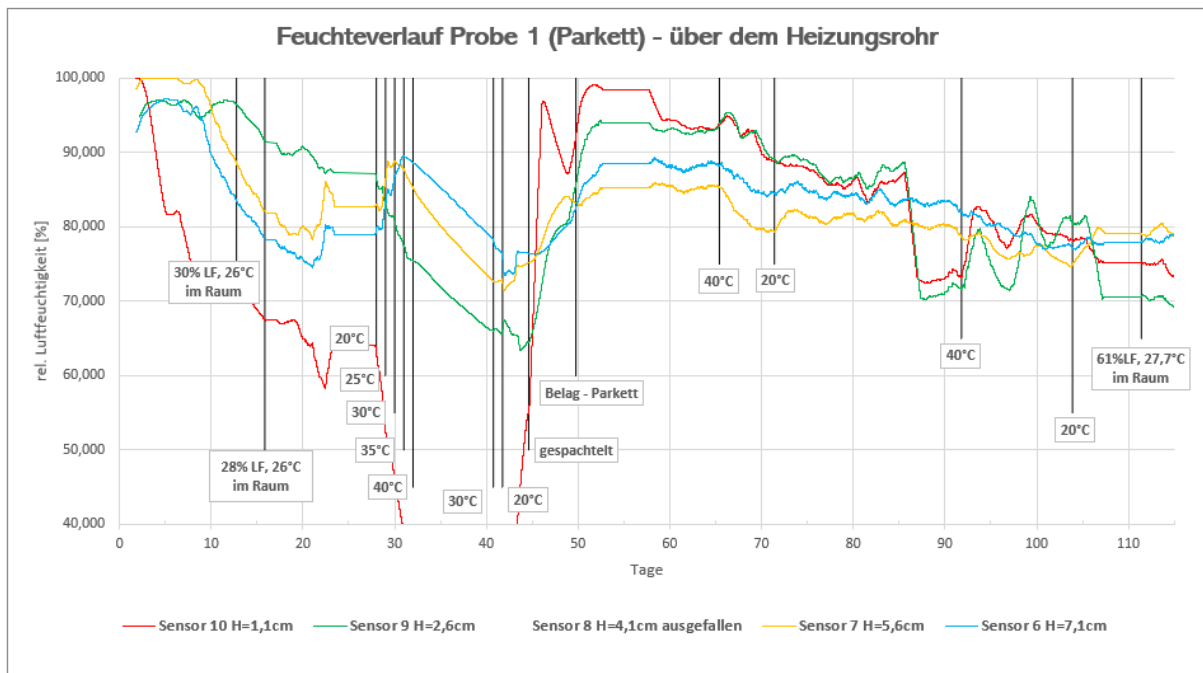
Die 2. und die 3. Heizphase haben im Zuge dieses Versuches auf die Sensoren 1 bis 5 hingegen wenig Einfluss.

Generell ist zu sagen, dass die 1. Ausheizphase keinen großen Einfluss auf das Austrocknungsverhalten hatte. Durch die große Spreizung in der Anfangsphase zwischen den oberen Sensoren 1 und 2 und den restlichen Sensoren 3 bis 5 sind starke Feuchteunterschiede bemerkbar. Bemerkenswert sind die minimalen Feuchteunterschiede nach Belagsverlegung zwischen den oberen und den unteren Feuchtesensoren, was bedeutet, dass die Feuchtigkeit über dem Querschnitt gleichmäßig verteilt ist.



## Hauptversuch

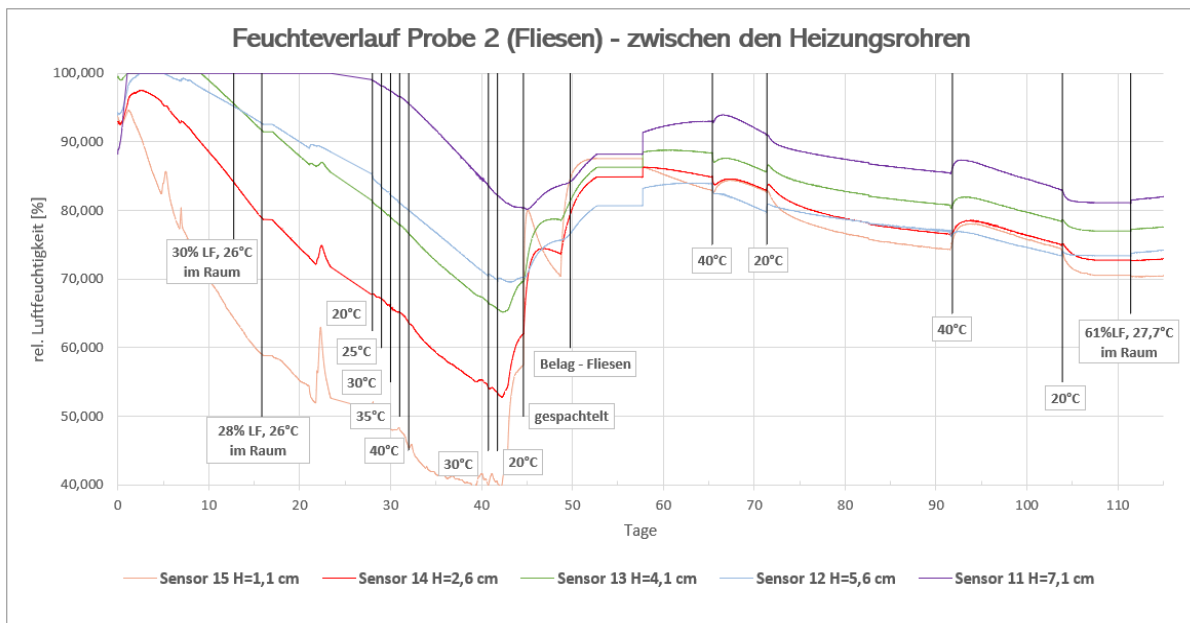
Diagramm 10 Feuchteverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr



Im Diagramm 10 ist der Feuchteverlauf in der Probe 1 über dem Heizungsrohr dargestellt. In diesem Sensorblock ist der Sensor 8 komplett ausgefallen. Es ergab sich in diesem Diagramm die Problematik, dass zeitlich benachbarte Feuchtigkeitswerte messtechnisch begründet, große Streuweiten hatten. Um einen brauchbaren Feuchteverlauf zu haben, wurde mithilfe einer Trendlinie ein gleitender Durchschnitt zur Darstellung gewählt. Hierbei erreichte die Feuchtigkeit nur am Anfang Werte von 100% relativer Luftfeuchte. Die Werte fielen konstant über die Austrocknungsdauer. Der einzige Sprung erfolgt wie bei allen Proben durch die Belagsverlegung. Durch diese Erkenntnis kann man einen Rückschluss ziehen, dass die Anbringung eines Fußbodenbelags einen erheblichen Einfluss auf den Anstieg des Feuchtgehalts bewirkt. Der Anstieg ist sowohl in den oberen als auch in den unteren Ebenen stark bemerkbar. Im Laufe dieses Versuchs, insbesondere nach der Belagsverlegung, kam es zu Messfehler, welche bauphysikalisch nicht erklärlich sind. Im Normalfall sollte der oberste Sensor 10 während des gesamten Versuches am tiefsten liegen und der Sensor 6 am höchsten. Die grüne Linie ist zumindest bis zum Ausheizen unplausibel. Es nehmen nicht alle Sensoren den Verlauf an, den sie annehmen sollten. Aus diesem Grund lässt sich sagen, dass dieses Diagramm nicht sehr brauchbare Werte liefert und nur zu Dokumentationszwecken herangezogen wurde.

## Hauptversuch

Diagramm 11 Feuchteverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren



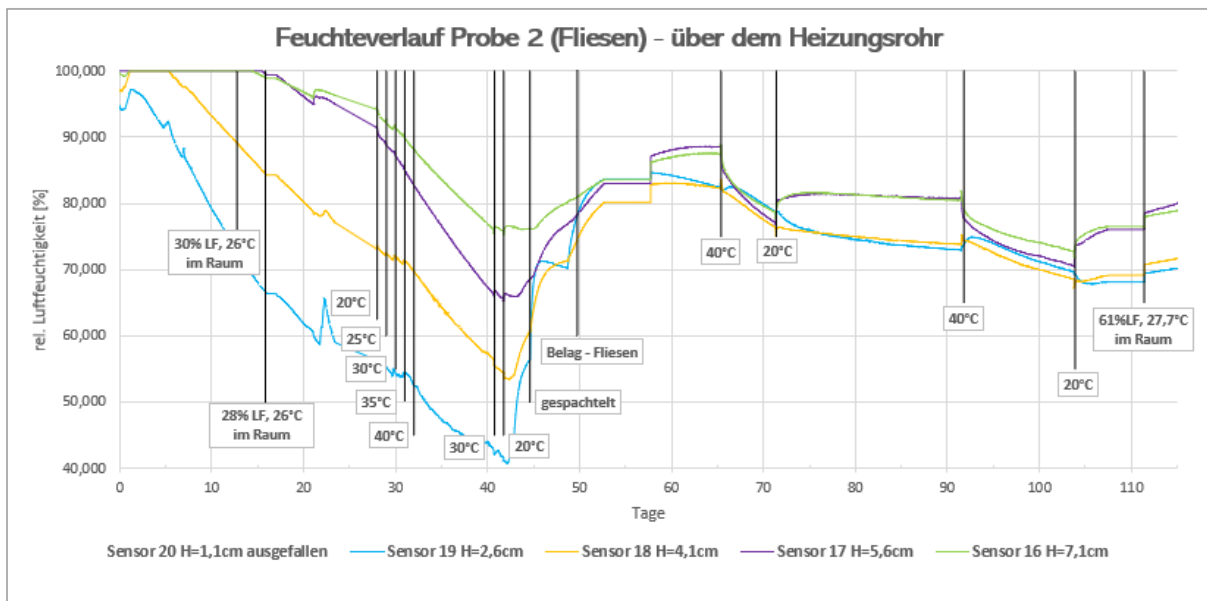
Das Diagramm 11 veranschaulicht die Feuchtigkeitswerte der Probe 2 zwischen den Heizungsrohren. Die Feuchtigkeiten sind in der 1. Phase vor der Belagsverlegung etwas höher als bei der Probe 1. Die Unterseite blieb bis zum 25. Tag bei 100 % relativer Luftfeuchte.

In der Anfangsphase ist eine große Spreizung zwischen den Feuchtesensoren zu beobachten. Nachdem schrittweisen Aktivieren der Fußbodenheizung ist der Verlauf gleichmäßiger. Nach der Belagsverlegung kam es zu einer erneuten Streuung der Sensoren. Es kam zu einer größeren Spreizung als bei der Probe 1. Die Feuchtigkeit stieg insbesondere beim Spachteln an der Oberseite und gab sie nach unten ab.

In der 2. und 3. Heizphase änderte sich die Feuchtigkeit nur gering. Nach dem Ende der Heizphasen ist der ursprüngliche Verlauf wieder vorhanden. Die Ausheizphasen haben keinen großen Einfluss auf den Austrocknungsverlauf. Trotz Belages kommt es in der Folge zu einem geringen Austrocknen aller Proben. Die Erklärung dieser Unterschiede liegt bei der Dampfdichtheit der beiden unterschiedlichen Materialien. Der Fliesenbelag stellt eine dampfdichtere Ausführung, woraufhin der Diffusionsstrom gesperrt wird [18]. Zum Vergleich könnte man bei beiden Proben die Sensoren 15 und 5 nehmen. Beide Sensoren liegen am höchsten und wiesen z.B. bei Tag 90 unterschiedliche Feuchtigkeitswerte auf. Der Feuchtigkeitswert bei Sensor 5 liegt am 90. Tag bei ungefähr 84%. Der Feuchtigkeitswert bei Sensor 15 bei ungefähr 73%. Es sind bemerkenswerte 11%, die einen Unterschied beim Feuchteverhalten ausmachen.

## Hauptversuch

Diagramm 12 Feuchteverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr



Das Diagramm 12 zeigt den Feuchteverlauf der Probe 2 über dem Heizungsrohr. Der Feuchteverlauf in der Anfangsphase bis zur Aktivierung der Fußbodenheizung verlief ähnlich wie bei den anderen Proben. Der Sensor 20 ist im gesamten Versuch ausgefallen. Nach der Belagsverlegung zeigen alle Sensoren einen größeren Feuchtigkeitsabfall im Gegensatz zu den anderen Proben. Im Vergleich zur Probe 1 zeigt die Probe 2 sogar im Bereich der oberen Sensoren einen Feuchtigkeitsabfall. Nach dem Ende der 1. Ausheizphase stieg die Feuchtigkeit wieder an, daraus lassen sich nochmal Rückschlüsse ziehen, dass das Ausheizen einen sehr großen Einfluss auf den Feuchteverlauf hat. Der einfache Grund ist dieser, dass wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Im Bereich der Belagsverlegung gibt es auch wie bei allen anderen Proben den Sprung nach oben, der sich im Gegensatz zu den anderen Sensoren in Grenzen hält und maximale Feuchtigkeitswerte von 90% aufweist. Die zweite Heizphase lässt die relative Luftfeuchtigkeit deutlich nach unten herabsinken. Nach dem Beenden der zweiten Heizphase stieg die Feuchtigkeit der Sensoren 16 und 17 an. Die beiden anderen Sensoren 18 und 19 sanken noch tiefer. Die 3. Heizphase hatte ebenso einen Einfluss auf das Feuchtverhalten. Die relative Luftfeuchtigkeit sank bei allen Sensoren auf unter 70%. Nach dem Abschalten der Heizung sieht man einen erneuten Feuchteanstieg, allerdings auf eine maximale Feuchtigkeit von 80%.

Bei Verlängerung der Linien von Tag 57 – 115 zurück auf Tag 0, ergibt sich eine relative Luftfeuchtigkeit von 100%. Über den Rohren liegt dieser Wert bei 90% was bedeutet, dass ein zusätzliches Austrocknen durch das Ausheizen nur über den Rohren eintritt und nicht dazwischen.

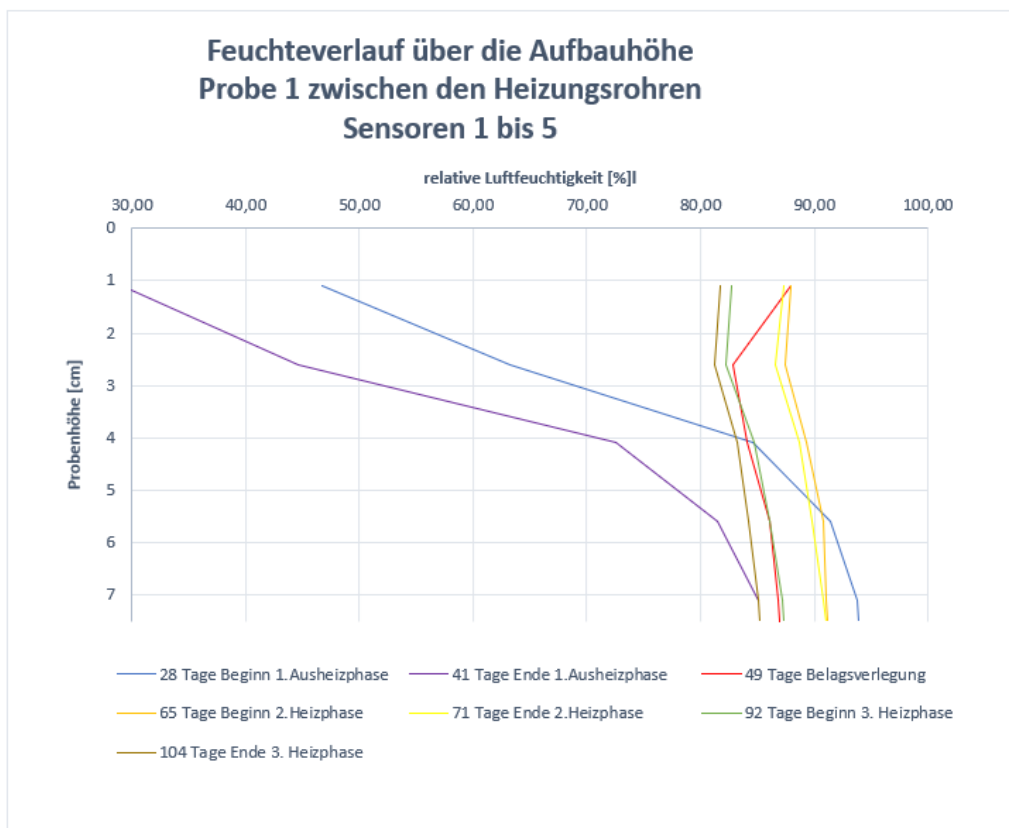
## Hauptversuch

### 4.3.1 Feuchteverhalten über die Aufbauhöhe

Um eine bessere Übersicht aus den Ergebnissen des Hauptversuches zu bekommen, wurde die Feuchtigkeitsverteilung über die Probenhöhe in den Diagrammen 13 bis 16 an verschiedenen Tagen dargestellt. Es wurden die repräsentativsten Tage aus dem ganzen Feuchteverlauf entnommen und im Diagramm aufgetragen. Auf der X-Achse wurde die von den Sensoren aufgezeichnete Luftfeuchtigkeit in % aufgetragen, die Y-Achse zeigt die Höhenlage des jeweiligen Sensors.

Die Klimakammer, in der die Proben aufbewahrt wurden, hatte, wie vorher schon erwähnt, aufgrund von technischen Gebrechen schwankende Temperaturwerte und relative Luftfeuchtigkeitswerte. Aus diesem Grund wurde der Feuchteverlauf nicht ganz oben bei einem Y-Wert von 0, sondern erst bei einer Höhe von 1,1 cm, ab dem höchsten Sensor im Aufbau begonnen. Die Feuchtigkeit wurde wie schon erwähnt an 5 verschiedenen Höhen gemessen. Diese sind 1,1 cm, 2,6 cm, 4,1 cm, 5,6 cm und 7,1 cm. Jeder einzelne Feuchtigkeitswert an dem jeweiligen Tag wurde miteinander verbunden, um einen plausiblen Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe zu erhalten.

Diagramm 13 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 1 zwischen den Heizungsrohren



## Hauptversuch

Die Diagramme 13 bis 16 veranschaulichen den Feuchteverlauf über die Probenhöhe, sowohl über dem Heizungsrohr als auch zwischen den Heizungsrohren. Da alle Diagramme sehr ähnliche Verläufe aufweisen, werden nachfolgend nur die Ergebnisse anhand von Diagramm 13 näher beschrieben und im Detail erläutert.

Bis zum 28.Tag konnten alle Proben in der Klimakammer trocknen. Die blaue Linie zeigt den vorherrschenden Feuchtigkeitsgehalt nach 28 Tagen über die Probenhöhe. Nach 28 Tagen begann die 1.Ausheizphase und dauerte bis zum 41.Tag an. Der Einfluss der Fußbodenheizung ist im Diagramm zu beobachten. Der Estrich trocknete bis zu einem gewissen Grad über die gesamte Höhe aus. Hierzu sind die violette Linie und die blaue Linie zu vergleichen. Die Verschiebung der violetten Linie nach links zeigt, wie sehr warme Luft mehr Feuchte aufnehmen kann und daher sich nach links verschiebt.

Nach dem Abschalten der Fußbodenheizung ist wieder eine Feuchtigkeitszunahme zu beobachten. Am 49.Tag erfolgte die Belagsverlegung. Die rote Linie, welche die Belagsverlegung darstellt, bewegte sich vor allem im oberen Bereich des Estrichs nach rechts. Die Feuchtezunahme im Oberbereich des Estrichs ist auf das Aufbringen der Spachtelmasse zurückzuführen.

Am 65. Tag begann die 2.Ausheizphase. Die 2.Ausheizphase hatte wiederum eine günstige Auswirkung auf den Trocknungsverlauf des Heizestrichs. Der resultierende Verlauf zeigt sich anhand der orangenen Linie. Während der 2.Ausheizphase ist eine Feuchteabnahme zu beobachten. Diese Feuchteabnahme ist über die gesamte Höhe im Diagramm erkennbar. Der Übergang vom Beginn der zweiten Heizphase bis zum Ende der zweiten Heizphase ist bemerkbar. Hier kommt es zu einem Feuchtverlust von ungefähr 5 % im oberen Bereich des Estrichs. Im unteren Bereich sogar zu einer höheren Feuchteabnahme von ca. 10%. Das Ende der 2.Heizphase stellt die gelbe Linie dar.

Am 92.Tag begann die 3.Heizphase, welche ebenso einen erheblichen Einfluss auf den Feuchteverlauf hatte. Die grüne Linie stellt den Verlauf dar. Hier ist ebenso besonders im oberen Bereich eine Trocknung zu beobachten. Das Ende der 3.Heizphase stellt die braune Linie dar. Hier ist von oben nach unten der Einfluss des Heizvorganges zu beobachten.

Die beschriebenen Effekte im Diagramm 13 durch die Belagsverlegung und den Ausheizprozess spiegeln sich in den Diagrammen 14 bis 16 wider. Der Sachverhalt, dass der Estrich von oben nach unten trocknet, hat sich auch in dieser Darstellung über die Aufbauhöhe bewiesen.

Im Diagramm 14 liegen die einzelnen Linien ein wenig auseinander, da wie vorhin schon erwähnt der Feuchteverlauf mit einem gleitenden Durchschnitt versehen wurde.

# Hauptversuch

Diagramm 14 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 1 über dem Heizungsrohr

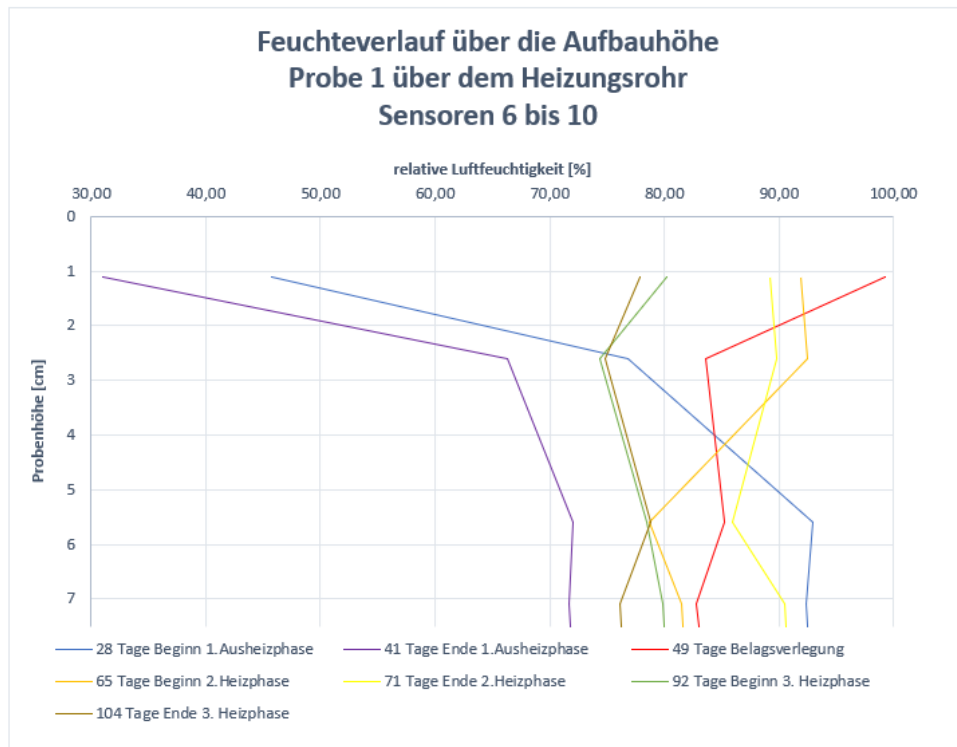
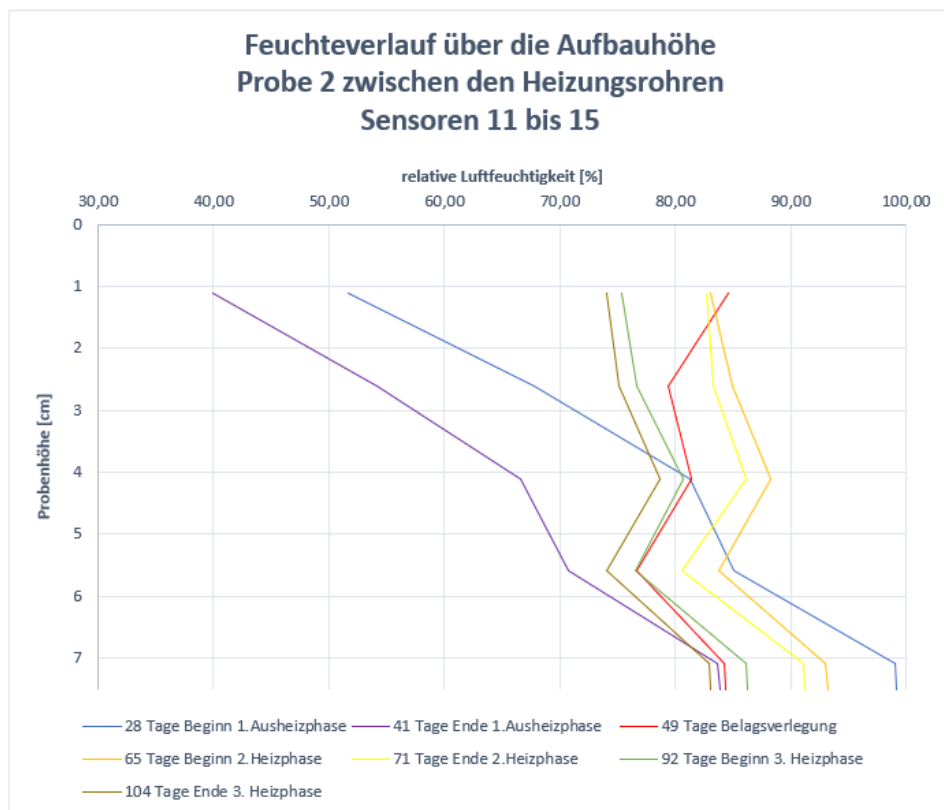


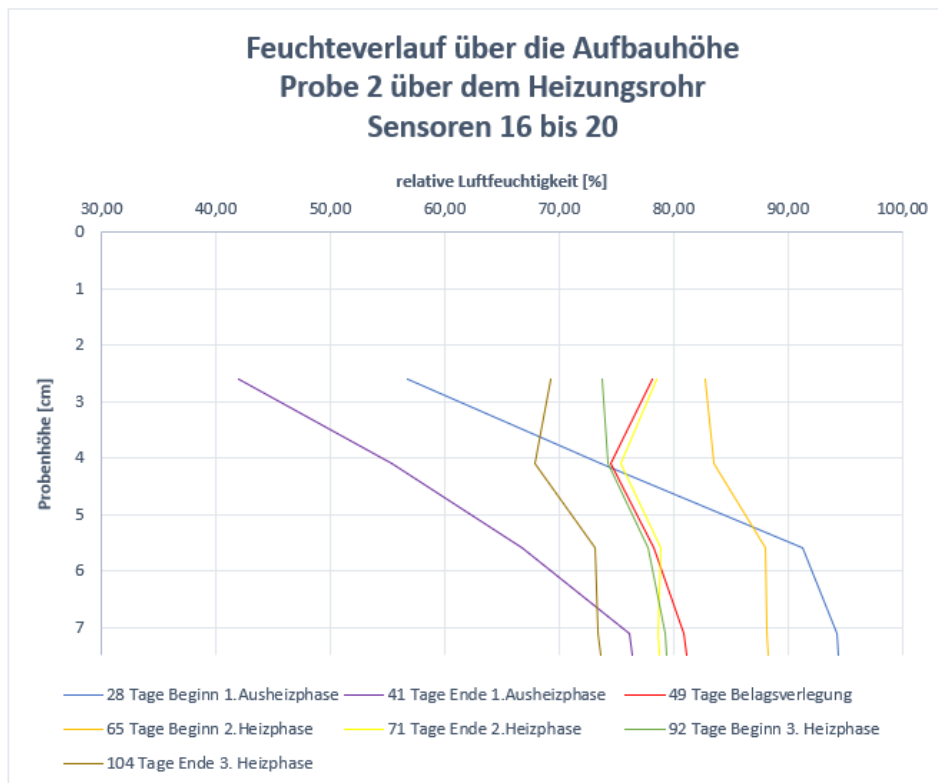
Diagramm 15 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 2 zwischen den Heizungsrohren





## Hauptversuch

Diagramm 16 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 2 über dem Heizungsrohr



Im Diagramm 16 ist der Sensor 20 während des gesamten Versuches ausgefallen. Aus diesem Grund beginnt der Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe erst ab 2,6cm beim Sensor 19.

Die Tatsache, dass der Estrich von oben nach unten trocknet, lässt sich in allen Diagrammen festhalten. Wie man aus allen Diagrammen in diesem Kapitel erkennen kann, war der Estrich im oberen Bereich trocken und im unteren Bereich eher feucht. Es wurde festgestellt, dass der Estrich besonders zwischen den Heizungsrohren in der unteren Hälfte hohe Feuchtigkeitswerte von über 80% annahm und somit nicht ideal belegreif war. Diese Erkenntnis zeigt sich an leichten Schäden am Belag. Durch Klopfen auf der Belagsoberfläche war aufgrund des Geräusches erkennbar, dass sich unter dem Belag Hohlräume gebildet haben. Die Hohlräume waren vor allem im vorderen Bereich des Parkettbelages vertreten. Beim Fliesenbelag wurde nur unter einer Fliese, die sich an der Ecke befand, eine Hohllage festgestellt. Weiters weist der Parkettbelag eine geringe konvexe Verformung im vorderen Bereich auf, wo auch die Hohllage sich befindet. Im Restbereich in beiden Proben ist ein festhaftender Verbund gegeben.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Feuchte- und Temperaturverhalten eines Zementestrichs untersucht. Der Versuch wurde an zwei Fußbodenaufbauten 70x70 cm und einer Stärke von 7,5 cm durchgeführt. Die Proben wurden in einer Klimakammer unter konditionierten Verhältnissen gelagert. Die Messungen wurden mittels Feuchte- und Temperatursensoren über die Aufbauhöhe durchgeführt. Durch die Anordnung der Sensoren über die Querschnittshöhe, konnte festgestellt werden, dass der Estrich von oben nach unten trocknet. Es wurde während der 1. Ausheizphase eine deutliche Verringerung des Feuchtegehaltes, insbesondere in der oberen Probehälfte festgestellt. Nach dem Ende der 1. Ausheizphase, stellte sich über die gesamte Aufbauhöhe erneut ein höherer Feuchtigkeitsgehalt ein. Die Werte stiegen teilweise auf über 85% relativer Luftfeuchte wieder an. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Feuchtezunahme nach dem Spachteln. Beim Spachteln stieg die Feuchtigkeit insbesondere an der Oberseite und gab sie nach unten ab. Nach dem Aufbringen des Belages war eine erhöhte Feuchtezunahme, speziell in der oberen Estrichhälfte zu beobachten. Das heißt die Feuchtigkeit war gleichmäßiger über dem Querschnitt verteilt. Vor allem die Unterseite blieb bei Probe 2 bis zum 25. Tag bei 100% relativer Luftfeuchte sehr feucht. Der Trocknungsprozess nach der Belagsverlegung verlief deutlich langsamer als vor der Belagsverlegung. Das ist eine wichtige Erkenntnis für die Praxisanwendung auf der Baustelle, dass durch die Belagsverlegung große Feuchteschwankungen, vor allem im oberen Estrichbereich verursacht werden. Ein Grund für die Feuchtezunahme ist auch der Fliesenkleber sowie der Parkettkleber der großflächig aufgetragen wird. Eine weitere Erkenntnis, ist, dass kaum Einfluss der 2.&3. Heizphase auf das Feuchteverhalten des Estrichs festgestellt wurde. Der Feuchteverlauf änderte sich minimal beim Aktivieren der Fußbodenheizung in der 2&3. Heizperiode.

Nach dem Ende der Versuchsdurchführung konnte festgestellt werden, dass der Estrich an der Unterseite teils Feuchtigkeitswerte von über 80% relativer Luftfeuchte annahm. Das heißt, dass der Estrich in der unteren Hälfte wenig austrocknen konnte. Die obere Hälfte war vielen Feuchteschwankungen ausgesetzt, konnte jedoch im Laufe des Versuches trocknen und Feuchtigkeitswerte von durchschnittlich unter 80% erzielen. Außerdem konnte festgestellt werden, dass der Fußbodenbelag (Parkett oder Fliesen) sich negativ auf das Austrocknen auswirkt.

## 6 Ausblick

In der gegenständlichen Diplomarbeit wurde ein Heizzementestrich auf das Feuchte- und Temperaturverhalten untersucht. Die Nebenversuche, welche neben dem Hauptversuch durchgeführt wurden, zeigen das Verhalten von Zementestrichen hinsichtlich Belastbarkeit, Wasseraufnahme oder Saugverhalten. Die Nebenversuche zeigten aufschlussreiche Informationen, welche für den Hauptversuch relevant waren.

Es wäre sehr interessant, das Feuchte- und Temperaturverhalten anderer Estricharten wie z.B. Anhydrit-Caciumsulfatestriche zu untersuchen. Weiters könnte man andere W/B-Werte heranziehen. Somit könnten Vergleiche zwischen mehreren Estricharten gezogen werden.

Es wäre sicherlich auch interessant den Estrich unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu untersuchen, um somit baustellenähnliche Werte zu erhalten. In der zukünftigen Nachforschung wäre es sehr sinnvoll eine Untersuchung direkt vor Ort auf der Baustelle durchzuführen. Dadurch können z.B. unregelmäßige Klimaeinflüsse berücksichtigt werden und somit realistischere Ergebnisse geliefert werden. Andererseits gelten die Ergebnisse nur für den spezifischen Fall.

Darüber hinaus wäre es noch vorteilhaft, das Ergebnis der gegenständlichen Arbeit mittels einer Software zu simulieren, um Vergleiche zwischen den praktischen Untersuchungen und dem theoretischen/rechnerischen Modell zu schaffen. Aufgrund fehlender Software, die auch die Hydratation des Zements berücksichtigt ist dies zurzeit nicht möglich.

## Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut): *ÖNORM B 2232: Estricharbeiten Werkvertragsnorm*. Ausgabe: 2016
- [2] Deix,K.: *Seminar Fußböden: Aktuelle Estrichsysteme für unterschiedliche Bodenarten und Bodensysteme*. Weiz, März 2008
- [3] Kolbitsch, A.: *Hochbaukonstruktionen I – Teil B*. TU Verlag,2015
- [4] Schnell,W.: *Das Trocknungsverhalten von Estrichen – Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis*. IBF Verlag, Wiesbaden, 1994
- [5] Timm,H.; Allmendinger,T.; Stehle,N.: *Estriche, Parkett und Bodenbeläge*. 6.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, Mai 2019
- [6] Dieter,M.: *Hygrisches Verhalten von Estrichen und Ausgleichsmassensystemen – Experimentelle Analyse der Zeitdauer bis zur Belegereife*. Diplomarbeit Technische Universität Wien, Nov.2007
- [7] Schwarz,M.: Trockenestrich: Das sollten Sie wissen,  
<https://www.haus.de/bauen/trockenestrich-2737>. Juli2021, [Zugriff am: 04.03.2022]
- [8] Deix K.: *ON-Seminar: Estriche: Normung, Tragfähigkeit, Verlegereife*. Wien, Mai 2016.
- [9] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen:  
Produktgruppeninformation, <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/moertel-estriche/estriche/kunsthazestrich.html> [Zugriff am 27.03.2022]
- [10] Austrian Standards Institute (Österreichisches Normungsinstitut): *ÖNORM B 3732: Estriche: Planung, Ausführung, Produkte und deren Anforderungen*. Ausgabe 2016.
- [11] Willems, Wolfgang M.: *Lehrbuch der Bauphysik, Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. 7.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [12] Maderböck,G.: *Der Einfluss von Trocknungsbeschleuniger auf das Feuchteverhalten von Estriche*. Diplomarbeit Fachhochschule Campus Wien, November 2014.
- [13] Rieche,G.: *Bewertung der Belegereife von Estrichen mit hygrometrischen Verfahren*. Schriftenreihe, Fellbach, 2008.

## Literaturverzeichnis

- [14] Plag,R: Wasserdampfdiffusion und feuchte Wände, <http://www.bastelitis.de/wasserdampfdiffusion-und-feuchte-waende/>, [Zugriff am 12.09.2022]
- [15] Wissenwiki: Konvektion, <https://wissenwiki.de/Konvektion>, [Zugriff am 03.06.2022]
- [16] Unger,A.: *Fußbodenatlas: Fußböden richtig planen und ausführen*. Chemnitzer Verlag, 8.Auflage, 2016.
- [17] Leuk,P.: *Methoden zur Bestimmung der spezifischen Trocknungsenergie von Faserstoffen*. Diplomarbeit Technische Universität Graz, April 2012.
- [18] Vranic,M.: *Trocknungsverhalten von Heizstrichen nach Belagsverlegung*, Diplomarbeit Technische Universität Wien, Mai 2021.
- [19] Vittek,H.: *Richtlinie zur Bestimmung der Feuchtigkeit von Estrich nach der Calciumcarbid Methode (CM-Methode)*. Bundesinnung der Bauhilfsgewerbe Bundesberufsgruppe der Bodenleger, 2.Auflage, Wien, 2014.
- [20] Technische Kommission Bauklebstoffe: *Belegreife und Feuchte – Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen*. TKB-Bericht, Industrieverband Klebstoffe,2013
- [21] Altmann,D.A.: *Bewertung von Rissen in Beton und Estrich*. Seminar, Leipzig, [Zugriff am 03.05.2022]
- [22] Millinger,V.M.: *Untersuchung der Eignung / Eigenschaften von Zellulosefasern in Zementestrichen*. Diplomarbeit Fachhochschule Campus Wien, Juli 2013.
- [23] Rolof, J.H.: *Fußbodenschäden im Bild*. Fraunhofer IRB Verlag, 1.Auflage, 2010.
- [24] DIN EN 13813: *Estrichmörtel und Estrichmassen*. Ausgabe Jänner 2003
- [25] DIN EN 12350: *Prüfung von Frischbeton – Teil 1 Probenahme und Prüfgeräte*. Ausgabe September 2019
- [26] Getifix: Kapillarwirkung im Mauerwerk, <https://www.getifix.de/glossar/kapillarwirkung/> [Zugriff am 13.09.2022]
- [27] DIN EN 15148: *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*. Ausgabe März 2003

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Netzrisse im Estrich [22] .....	6
Abbildung 2 Krakelee-Riss [21].....	6
Abbildung 3 Trennriss über die Estrichdicke [21].....	6
Abbildung 4 Randabsenkung mit konvexer Verformung [16].....	7
Abbildung 5 Aufschlüsselung von Zementestrichen [16].....	8
Abbildung 6 Sorptionsisotherme für Zementestriche [13] .....	11
Abbildung 7 Veranschaulichung Diffusion anhand einer Wand mit Glaser-Diagramm [14].....	12
Abbildung 8 Kapillarwirkung [26] .....	12
Abbildung 9 Ablauf der Austrocknung von porösen, hygroskopischen Stoffen [6] .....	13
Abbildung 10 Zulässige Restfeuchtigkeitswerte für Zementestriche nach der CM-Messmethode [12] .....	15
Abbildung 11 CM-Messgeräte und Manometer .....	17
Abbildung 12 Zerkleinerung des Estrichs und Stahlkugeln .....	18
Abbildung 13 DOKA- Schalungselemente und fertige Schalung .....	20
Abbildung 14 Schalung mit eingelegter Dämmung.....	21
Abbildung 15 Schalung mit eingelegten Heizungsrohren .....	21
Abbildung 16 LötKolben und die Drähte .....	22
Abbildung 17 Lötgerät.....	22
Abbildung 18 vorbereitete Sensorenblöcke.....	23
Abbildung 19 Position der Sensorenblöcke im Fall über den Heizungsrohren .....	25
Abbildung 20 Sensorenblöcke in Probe 1 und Probe 2 .....	25
Abbildung 21 Klimakammer .....	26

Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 22 Estrichmischer .....	27
Abbildung 23 Schubkarre .....	27
Abbildung 24 Fließmittel .....	27
Abbildung 25 Sandkübel.....	27
Abbildung 26 Estrichzement .....	27
Abbildung 27 Versuch für Bestimmung des Ausbreitmaßes.....	28
Abbildung 28 Estrichplatte mit aufgetragener Spachtelmasse.....	29
Abbildung 29 Klebstoff Parkett und Zahnspachtel.....	30
Abbildung 30 Estrichplatte mit vollflächiger Klebmasse und nach Parkettverlegung .....	30
Abbildung 31 Fliesenkleber .....	31
Abbildung 32 Fugenfüller .....	31
Abbildung 33 Estrichplatte mit vollflächiger Fliesenkleber und nach Verlegung der Fliesen .....	31
Abbildung 34 Rüttelverdichtung der Probekörper.....	32
Abbildung 35 Prüfkörper im frischen Zustand .....	32
Abbildung 36 Prüfkörper im erhärteten Zustand.....	33
Abbildung 37 Prismen nach Biegezugfestigkeitsversuch .....	34
Abbildung 38 Biegezugfestigkeitsversuch .....	35
Abbildung 39 Druckfestigkeitsversuch .....	35
Abbildung 40 Beschichtete Prismen für den Saugversuch.....	38
Abbildung 41 Prüfkörper in einem wassergefüllten Behälter.....	39
Abbildung 42 Probekörper für Durchführung CM-Methode .....	41
Abbildung 43 Zeitlicher Ablauf des Versuchsaufbaus .....	42
Abbildung 44 Estrichprobe 1 mit Parkettbelag links und Estrichprobe 2 mit Fliesenbelag rechts .....	43



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Sensorenanordnung.....	24
Tabelle 2 Mischverhältnis.....	26
Tabelle 3 Masse und Dichte der Prüfprismen .....	35
Tabelle 4 Mindestfestigkeiten Estriche und Estriche auf Trennlagen nach ÖNORM B 3732 [10] .....	36
Tabelle 5 Druckfestigkeitsklasse für Estrichmörtel nach DIN EN 13813 [24] .....	36
Tabelle 6 Biegezugfestigkeitsklassen für Estrichmörtel nach DIN EN 13813 [24] .....	36
Tabelle 7 Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsversuche .....	37
Tabelle 8 Ergebnisse CM-Messung.....	41
Tabelle 9 Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren .....	44

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Saugversuch.....	40
Diagramm 2 Kalibrierung Sensor 120.....	45
Diagramm 3 Kalibrierung Sensor 1.....	45
Diagramm 4 Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung .....	46
Diagramm 5 Temperaturverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren .....	48
Diagramm 6 Temperaturverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr .....	49
Diagramm 7 Temperaturverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren .....	49
Diagramm 8 Temperaturverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr .....	50
Diagramm 9 Feuchteverlauf Probe 1 zwischen den Heizungsrohren .....	51
Diagramm 10 Feuchteverlauf Probe 1 über dem Heizungsrohr .....	53
Diagramm 11 Feuchteverlauf Probe 2 zwischen den Heizungsrohren .....	54
Diagramm 12 Feuchteverlauf Probe 2 über dem Heizungsrohr .....	55
Diagramm 13 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 1 zwischen den Heizungsrohren .....	56
Diagramm 14 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 1 über dem Heizungsrohr .....	58
Diagramm 15 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 2 zwischen den Heizungsrohren .....	58
Diagramm 16 Feuchteverlauf über die Aufbauhöhe Probe 2 über dem Heizungsrohr .....	59

## Formelverzeichnis

Formel 1 relative Luftfeuchtigkeit in % [11] .....	9
Formel 2 massenbezogener und volumenbezogener Wassergehalt in % [11] .....	10
Formel 3 Umrechnung von volumenbezogenen auf massenbezogenen Wassergehalt [11] .....	10
Formel 4 Ermittlung Ausbreitmaß [25] .....	28
Formel 5 Biegezugfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 [3] .....	33
Formel 6: Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 13892-2 [3] .....	34
Formel 7: Ermittlung der Rohdichte.....	35
Formel 8: Berechnung Flüssigkeitsleitkoeffizient [m <sup>2</sup> /h] [11].....	40