

Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen

Messmethoden, Kennlinienerstellung und Validierung zur feuchte- und zeitabhängigen Wasserdampfaufnahme und -abgabe ausgewählter Baustoffe

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades

M.Sc Energieeffizientes und nachhaltiges Bauen

an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München.

Lehrstuhl Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Betreut von Nina Flexeder, M.Sc.

Eingereicht von Marina Ineichen, B. Sc.

Eingereicht am 28. Oktober 2020, in München

Kurzfassung „Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen“

Aktuelle Forschungen zu hygroskopisch aktiven Baustoffen befassen sich mit deren Energieeinsparpotenzial und positiven Effekt auf das Innenraumklima. Um diesbezüglich längerfristige Vorhersagen treffen zu können, ist es notwendig, die Wärme- und Feuchteverhältnisse in den Baustoffen mittels numerischer Modelle abzuschätzen. Voraussetzung für zuverlässige Resultate aus den Modellen ist die korrekte Beschreibung der Baustoffe mit ausreichend genauen Kennwerten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, in unterschiedlichen Wandaufbauten die vom Innenraumklima beeinflussten Baustoffe zu identifizieren und sie durch Kennwerte zu spezifizieren. Um die Baustoffe in den numerischen Modellen abzubilden, werden die Sorptionsisotherme und der Wasseraufnahmekoeffizient gemessen. Die Werte dienen der Validierung und Optimierung der in den Herstellerangaben und Literatur verfügbaren Materialdaten.

Die zusätzliche Analyse des Raumklimas zeigt, dass kurzzeitige Feuchteschwankungen für einen Großteil der jährlichen Feuchteaufnahmen und -abgaben verantwortlich sind. Bei kurzzeitigen Feuchteschwankungen stellen sich im Material keine Ausgleichsfeuchten ein, viel mehr ist die Materialfeuchte stark von der Dauer des auftretenden Feuchtesprungs abhängig. Die Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit und des Feuchtepufferwerts ermöglicht es die Baustoffe, unter dem Berücksichtigung von Tagesschwankungen und einmaligen Feuchtesprüngen, einzuordnen und zu vergleichen. Diese Werte haben keinen Einfluss auf das numerische Modell, sondern ermöglichen eine qualitative Aussage über das allgemeine Baustoffverhalten und dessen Potenziale. Sie werden als zusätzliche Baustoffkennwerte betrachtet. Für alle beschriebenen Kennwerte wird ein Messverfahren definiert, die entsprechende Messung durchgeführt und diskutiert. Ein Katalog fasst die Eigenschaften aller Baustoffe zur allgemeinen Beschreibung und für die weitere Verwendung in numerischen Modellen zusammen.

Die genaue Bestimmung der Kennwerte verbessert die Aussagekraft der numerisch berechneten Wärme- und Feuchteverläufe in Bauteilen deutlich. Es zeigt sich zudem, dass zwischen der dynamischen Feuchteaufnahme und dem Feuchtepufferwert ein Zusammenhang besteht. Designputze, Farben und Grundierungen auf der Innenoberfläche senken den Feuchtepufferwert und verlangsamen die Feuchteaufnahme nach einem Feuchtesprung. Das Trägermaterial selbst hat nahezu keinen Einfluss auf die Feuchtepufferzahl.

Abschließend wird ein optimiertes Messverfahren vorgeschlagen, dass die zeitaufwändige Bestimmung der oben beschriebenen Baustoffkennwerte zukünftig beschleunigt.

Abstract „ Determination and comparison of material properties of hygroscopically active building materials “

Current research on hygroscopically active building materials is concerned with their energy-saving potential and positive effect on the indoor climate. To be able to make longer-term predictions in this regard, it is necessary to estimate the heat and moisture conditions in the building materials by means of numerical models. A condition for reliable results from the models, is the correct description of the building materials with sufficiently accurate characteristic values.

The aim of the present work is to identify the building materials influenced by the indoor climate in different wall constructions and to specify them by characteristic values. To reproduce the building materials in the numerical models, the sorption isotherm and the water absorption coefficient are measured. They serve to validate and optimize the data available in the manufacturer's specifications and literature. The additional analysis of the indoor climate shows that short-term fluctuations are responsible for a large part of the annual moisture absorption and release. Short-term fluctuations do not result in equilibrium moisture content in the material, but rather the material moisture is strongly dependent on the duration of the moisture increase that occurs. The determination of the dynamic sorption capacity and the moisture buffer value allows to classify and compare the building materials under the consideration of daily fluctuations and one-time moisture peaks. These values have no influence on the numerical model but allow a qualitative statement about the general building material behavior and its potentials. They are regarded as additional building material characteristics. For all described characteristic values a measuring method is defined, the corresponding measurement is carried out and discussed. A catalog summarizes the properties of all building materials for general description and for further use in numerical models.

The exact determination of the characteristic values significantly improves the informative value of the numerically calculated heat and moisture curves in building components. It is also shown that there is a correlation between the dynamic moisture absorption and the moisture buffer value. Applied design plasters, paints and primers reduce the moisture buffer value and slow down the moisture absorption after an occurring moisture load. The carrier material itself has almost no influence on the moisture buffer value.

Finally, an optimized measuring method is proposed that should accelerate the time-consuming determination of the building material parameters, described above, in the future.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Einheiten	1
1 Einleitung	5
2 Arbeitsgrundlagen	6
2.1 Zielsetzung der Arbeit	6
2.2 Methodik und Vorgehen	7
2.2.1 Arbeitsschritte	7
2.2.2 Statistische Methoden	9
2.2.3 Analyse des Ad- und Desorptionsverhalten von Bauteilen	12
3 Bauphysikalische Grundlagen	14
3.1 Allgemeine Begriffe	14
3.2 Wärme	14
3.2.1 Wärmetransportphänomene	14
3.2.2 Wärmespeicherung	18
3.3 Feuchte	18
3.3.1 Feuchteeintrag	18
3.3.2 Feuchtetransport	19
3.3.3 Feuchtespeicherung	21
3.3.4 Baustoffmodell der Wassereinlagerung in Porenräumen	22
3.3.5 Beschreibung der Feuchteaufnahme und -abgabe eines Baustoffes	24
3.3.6 Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen	26
3.4 Gekoppelter Feuchte- und Wärmetransport	27
3.4.1 Sorptionsenthalpie	27
3.4.2 Wärmetransport infolge von Enthalpieströmen	27

3.5	Innenraumklima	27
3.5.1	Feuchte und Temperaturverläufe in Innenräumen.....	27
3.5.2	Ziele für das Innenraumklima.....	28
4	Stand der Forschung.....	29
4.1	Approximation der Sorptionsisotherme	29
4.2	Feuchtepufferwirkung von hygroskopischen Oberflächenmaterialien.....	31
4.2.1	Bestimmung der Feuchtepufferzahl (Moisture Buffer Value - MBV)	31
4.2.2	Einfluss von Oberflächenbehandlungen auf die Feuchtepufferwirkung	32
4.2.3	Einfluss der Oberflächen auf den Energieverbrauch	32
4.3	Der Latentwärmeeffekt und die hygrothermische Masse.....	33
5	Ermittlung der Wärme- und Feuchteverläufe im Baustoff	34
5.1	Vorteile der hygrothermischen Simulation	34
5.2	Modellbildung und Lösung	34
5.3	Grundlagen der numerischen Berechnung	37
5.3.1	Baustoffgruppen und benötigte Materialdaten	37
5.3.2	Randbedingungen der Simulation	39
5.3.3	Einfluss der Beschichtungen	39
5.3.4	Ausgabeform der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Material..	39
5.4	Vorhandene Werte in Literatur und Datenbanken	40
5.5	Ziele der vorbereitenden Schritte	41
5.6	Sensitivitätsanalyse	41
5.7	Untersuchte Kennwerte.....	47
6	Identifikation hygroskopisch bedeutsamer Baustoffe	49
6.1	Wandaufbauten	49

6.2	Abbildung von Brettsperrholz in numerischen Berechnungen	53
6.3	Durchs Innenraumklima beeinflusste Baustoffe	54
6.4	Zeitabhängige Adsorption und Desorption in den Baustoffen	60
7	Vorbereitungen zur Messung	62
7.1	Messaufbau	62
7.1.1	Räumlichkeiten	62
7.1.2	Klimaboxen	62
7.1.3	Probenherstellung	64
7.1.4	Messgeräte und ihre Genauigkeiten	73
7.2	Messungenauigkeiten	75
7.2.1	Zulässige Schwankungen von Temperatur und Feuchte	75
7.2.2	Feuchteverlust infolge des Wiegeprozesses	77
7.2.3	Eingeschränkte Luftzirkulation	77
7.3	Erwartungswerte	77
8	Messverfahren	78
8.1	Bestimmung der Sorptionsisotherme	78
8.2	Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizient	81
8.3	Bestimmung der freien Wassersättigung	81
8.4	Ermittlung der dynamische Sorptionsfähigkeit	82
8.5	Feuchtepufferwirkung	83
9	Messergebnisse	85
9.1	Sorptionsisotherme	85
9.2	Wasseraufnahmekoeffizient	89
9.3	Dynamische Sorptionsfähigkeit	93

9.4	Feuchtepuffervermögen	96
10	Diskussion	99
10.1	Material und Messtechnik	99
10.1.1	Probekörper.....	99
10.1.2	Seitliche Abdichtung.....	101
10.1.3	Klimamodell.....	101
10.2	Darstellung der Sorptionsisotherme in numerischen Berechnungen	102
10.2.1	Ermittlung der Sorptionsisotherme zur Beschreibung der gemessenen Punkte	102
10.2.2	Gegenüberstellung verschiedener Ansätze.....	103
10.3	Vorschlag zur Erzeugung verbesserter Kennwerte für die numerische Berechnung.....	106
10.4	Zeitliche Abhängigkeit der Feuchtaufnahme hygroskopischer Baustoffe ...	109
10.4.1	Gegenüberstellung der freie Wasseraufnahme	109
10.4.2	Gegenüberstellung der dynamische Sorptionsfähigkeit.....	113
10.4.3	Gegenüberstellung der Feuchtepufferwirkung.....	115
10.5	Vorschlag für ein zeitlich optimiertes Messverfahren.....	118
11	Fazit.....	122
12	Ausblick.....	124
	Literaturverzeichnis.....	125
	Abbildungsverzeichnis	132
	Tabellenverzeichnis.....	137
	Formelverzeichnis	138
	Anhang	

Formelzeichen und Einheiten

Im Allgemeinen gelten die folgenden Symbole und Einheiten zur Beschreibung der Größen in der Arbeit.

Größe	Symbol	Einheit
Breite	b	[m]
Länge	l	[m]
Dicke/Höhe	d	[m]
Durchmesser	D	[m]
Fläche	A	[m ²]
Volumen	V	[m ³]
Masse	m	[kg]
Dichte	ρ	[kg/m ³]
Temperatur,		
Kelvin	T	[K]
Celsius	ϑ	[°C]
Zeit	t	[s]

Folgende Formelzeichen und Einheiten werden entsprechend der EN ISO 9346, DIN EN ISO 7345 im Verlauf der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens der Baustoffe verwendet [1, 2].

Größe	Symbol	Einheit
Relative Luftfeuchte	φ	[%]
Volumenbezogene Luftfeuchte	v	[kg/m ³]
Massenbezogene Luftfeuchte	χ	[kg/kg]
Spezifische Enthalpie	H	[J/kg]
Spezifische latente Verdampfungs- oder Kondensationsenthalpie	h_e	[J/kg]
Spezifische latente Schmelz- oder Erstarrungsenthalpie	h_m	[J/kg]
Volumenbezogene Masse des Feuchtgehalts	w	[kg/m ³]
Massenbezogener Feuchtegehalt	u	[kg/kg]
Feuchtestrom	G	[kg/s]
Feuchtestromdichte	g	[kg/(m ² *s)]
Wärmemenge	Q	[J]
Wärmestrom	ϕ	[W]
Wärmestromdichte	q	[W/m ²]

Wasserdampfdiffusionskoeffizient	D	$[m^2/s]$
Wasserdampfleitkoeffizient, auf volumenbezogene Luftfeuchte bezogen	δ_v	$[m^2/s]$
Wasserdampfdurchlasskoeffizient, auf volumenbezogene Luftfeuchte bezogen	W_v	$[m/s]$
Wasserdampfdurchlasswiderstand, auf volumenbezogene Luftfeuchte bezogen	Z_v	$[s/m]$
Wasserdampfwiderstandszahl	μ	$[-]$
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	s_d	$[m]$
Feuchteausbreitungsvermögen, Saugen	D_w	$[m^2/s]$
Weiterverteilung	D_{ww}	
Feuchteleitfähigkeit	λ_G	$[kg/(m^2*s*Pa)]$
Wärmeleitfähigkeit	λ_Q	$[W/m*K]$
Wasserdampfübergangskoeffizient, auf volumenbezogene Luftfeuchte bezogen	β_v	$[m/s]$
spezifischer Wärmedurchlasswiderstand	r	$[(m*K)/W]$
Wärmedurchlasswiderstand	R	$[(m^2*K)/W]$

oberflächenbezogener Wärmeübertragskoeffizient	h	[W/m ² K]
Wärmedurchlasskoeffizient	L	[W/m ² K]
Wärmedurchgangskoeffizient	U	[W/m ² K]
Wärmekapazität	C	[J/K]
spezifische Wärmekapazität	c	[J/kg*K]

Indizes

Innen	i
Aussen	a
abhängig von der relativen Luftfeuchte	φ

1 Einleitung

Der Mensch verbringt ein Großteil seiner Zeit in Innenräumen. Die gebaute Umwelt hat damit erheblichen Einfluss auf sein Wohlbefinden und die Gesundheit [3]. Fanger beschreibt den Zusammenhang zwischen den thermischen und hygrischen Faktoren der gebauten Umwelt auf unsere individuelle Behaglichkeit bereits 1970 [4]. Zwischenzeitlich sind die Ansprüche aber weiter gestiegen. Es gilt höheren Anforderungen an die Raumluftqualität gerecht zu werden. Gleichzeitig senken dichter gewordene Gebäudehüllen die Luftwechselrate. Dies führt zu hohen relativen Luftfeuchten und Schadstoffkonzentrationen im Innenraum [5]. Viele der geforderten Werte, wie beispielsweise eine konstante Innentemperatur zwischen 20 °C und 26 °C, sind kaum mehr ohne Heizung, Lüftung und teilweise auch Kühlung einhaltbar [6]. Diese zusätzlichen Anlagen schlagen sich auch im Energieverbrauch der Gebäude nieder. Bereits heute ist der Gebäudesektor einer der größten Energieverbraucher. Weltweit ist er verantwortlich für 20-40 % des gesamten Energieverbrauchs. Ein Großteil des Verbrauchs geht auf die Heizung, Lüftung und Kühlung der Gebäude zurück. Global gesehen verschärfen Faktoren wie das Bevölkerungswachstum und die voranschreitende Industrialisierung die Situation zusätzlich [7]. Die Baubranche muss, auch vor dem Hintergrund der angestrebten Klimaziele, effizientere, nachhaltigere und ressourcenschonendere Lösungen finden.

Hygroskopische Materialien verfügen über die Möglichkeit Feuchte aus der Innenraumluft aufzunehmen und zu speichern. Zusätzlich haben erste Untersuchungen gezeigt, dass neben dem positiven Effekt auf das Innenraumklima durch hygrothermische Leistungen auch energetische Vorteile möglich sind [8]. Bei neuen und innovativen Technologien ist es oftmals schwierig längerfristige Prognosen hinsichtlich des Bauteilverhaltens zu machen. Der Einsatz von Simulationsprogrammen hilft dabei die bauphysikalischen Vorgänge im Material zu verstehen und die Reaktion von Bauteilen besser abzuschätzen.

Die hygrothermische Leistung eines Baustoffes hängt von den Wärmeströmen und den Feuchteströmen im Baustoff sowie deren Speicherung ab. Die Wärme- und Feuchteströme werden von natürlichen, externen oder mechanischen Kräften angetrieben. Deshalb sind die Kenntnisse der Geometrie, der Randbedingungen und der Materialeigenschaften bedeutsam für eine realitätsnahe Simulation. Die gängigen Simulationsprogramme verlangen die Eingabe von, vergleichsweise, vielen Materialkennwerte zur Abbildung des hygrothermischen Verhaltens. Die typischen, einzugebenden Materialkennwerte umfassen die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit, die Dampfdurchlässigkeit, den Wasserabsorptionskoeffizient sowie die Feuchtespeicherfunktion [9].

2 Arbeitsgrundlagen

2.1 Zielsetzung der Arbeit

Hygrothermisch aktivierte Bauteile verbinden die Eigenschaften von thermisch aktivierten Massivbauteilen mit den Vorteilen von hygroskopischen Oberflächen. Die Ziele der Verwendung von hygrothermisch aktivierten Bauteilen sind die energetische Optimierung, die Einbindung der Bauteile in die Gebäudetechnik und eine gute Behaglichkeit für den Nutzer. Die in vorangehenden Forschungen gewonnene Erkenntnisse [10] über thermisch aktivierte Bauteile (TAM) werden aktuell in neuen Forschungsvorhaben [11, 12] vertieft und Potenziale von Wärmespeicherung in den Bauteilen durch hygrothermische Prozesse aufgezeigt. Dies erfolgt in dem die thermische Masse des Massivbauteils mit einer hygroskopisch aktiven Oberfläche kombiniert wird, um eine weitere Leistungssteigerung zu erwirken. Ein wichtiger Teil der Forschung besteht darin, die verschiedenen Wandaufbauten zu simulieren und den Energiebedarf sowie den Nutzerkomfort unter instationären Bedingungen abzubilden. Die Kennwerte, welche die Grundlage für eine realistische Abbildung in den Programmen bilden, sind dafür teilweise neu zu ermitteln oder zu validieren. Dies geschieht durch Messungen sowohl unter Laborvoraussetzungen als auch in frei bewitterten Testkuben mit austauschbaren Wandaufbauten [11, 12].

Die numerische Simulation und damit verbundenen Energiebedarfsermittlungen sowie Behaglichkeitsanalysen sind folglich ein Kernthema der Forschung zu hygrothermisch aktivierten Bauteilen. Das räumliche und zeitliche Verhalten der verwendeten Bauteile und der Einfluss der instationären Randbedingungen ist möglichst realitätsnahe abzubilden. Ein Teil davon ist die Untersuchung des Einflusses der Sorptionsenthalpie auf das Raumklima. Die Grundlage dafür schafft die korrekte Abbildung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge im Material. Um dies zu gewährleisten, gilt es, materialspezifische Eigenschaften der hygroskopischen Oberflächen genauer zu untersuchen. Vorangegangene Untersuchungen zeigen, dass insbesondere der temperatur- und feuchteabhängige Diffusionswiderstand sowie die Sorptionsisotherme signifikanten Einfluss auf das Materialverhalten haben.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die bereits gewonnenen Kenntnisse zu überprüfen, zu vertiefen, zu ergänzen und abschließend zusammenzufassen, so dass für weitere numerische Berechnungen darauf zurückgegriffen werden kann. Am Ende entsteht ein Katalog (separates Dokument) mit den relevanten Kennwerten für die Beschreibung des Verhaltens und Abbildung der hygroskopisch aktiven Materialien in numerischen Modellen. Dieser erleichtert zukünftige Untersuchungen hinsichtlich des Raumklimas und Energiebedarfs. [11–14].

2.2 Methodik und Vorgehen

2.2.1 Arbeitsschritte

Die Arbeit ist in die in Abb. 1 dargestellten vier Arbeitsschritte Grundlagenerarbeitung (Kapitel 1 bis Kapitel 4), Definition der benötigten Kennwerte (Kapitel 5 bis Kapitel 6), Messungen (Kapitel 7 bis Kapitel 9) und Auswertung (Kapitel 10 bis Kapitel 12) gegliedert. Die einzelnen Arbeitsschritte bauen aufeinander auf. Die Resultate der Messung werden analysiert und anschließend in die bestehenden Simulationen eingearbeitet. Sie ergänzen und verbessern diese schrittweise.

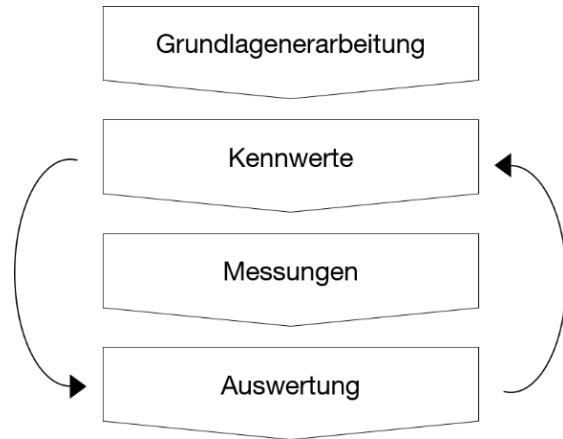


Abb. 1 - Arbeitsschritte

Grundlagen

Die Basis für alle weiteren Schritte bildet die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen. Der Fokus liegt hierbei einerseits auf den bauphysikalischen Grundlagen und andererseits auf der Analyse der materialspezifischen Eigenschaften.

Die bauphysikalischen Grundlagen umfassen die Feuchte- und Wärmetransporte in Materialien mit der Definition der zugehörigen Kennwerte und Begrifflichkeiten, welche für die weitere Bearbeitung relevant sind. Im Zusammenhang mit der Interaktion der Materialien mit dem Innenraum ist zusätzlich die Betrachtung des zu erwartenden Innenraumklimas und damit verbunden die Behaglichkeit für den Nutzer des Raums bedeutsam.

Die weiteren Schritte definieren die genauen Wandaufbauten sowie die für die weitere Bearbeitung relevanten Materialeigenschaften und analysieren den Einfluss der Beschichtung.

Definition der benötigten Kennwerte

Es folgt eine Analyse des für die numerische Lösung verwendeten Simulationsprogramms und der benötigten Parameter. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt die Relevanz der einzelnen Parameter auf. Den in den Grundlagen definierten Materialien werden in der Literatur und Datenbank verfügbare Kennwerte zugeordnet.

Anschließend erfolgt eine Simulation der jahreszeitlichen Verhältnisse in den untersuchten Wandaufbauten. Dies dient dazu, die Probenanzahl einzuschränken und zu definieren,

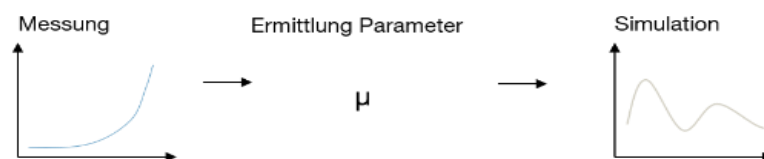
welche Baustoffe in weiterführenden Messungen genauer zu untersuchen sind. Eine qualitative ermittelte Eindringtiefe definiert die fürs Innenraumklima signifikanten Baustoffe. Eine Auswertung der Ad- und Desorptionsverhältnisse im Material hilft falls erforderlich weitere notwendige Messverfahren festzulegen. Kapitel 2.2.3 beschreibt das dazugehörige Vorgehen.

Basierend darauf entstehen die relevanten Messungen, erste Abschätzungen der vorgesehenen Messungen und zu erwartenden Resultate. Die Messungen unterteilen sich in quantitative Messungen zur direkten Bestimmung einzelner Stoffkennwerte und qualitative Messungen zur allgemeinen Beschreibung des Baustoffverhaltens.

Messungen und Ermittlung der Parameter

Hier ist zwischen Messvorbereitungen und -durchführung zu unterscheiden. In der Vorbereitung sind der genaue Aufbau sowie die verwendeten Geräte beschrieben und die Messungenauigkeiten aufgezeigt. Darauf aufbauend sind die in der Durchführung ermittelten Werte sowie eine Dokumentation der Messvorgänge angefügt.

Schritt 1



Schritt 2

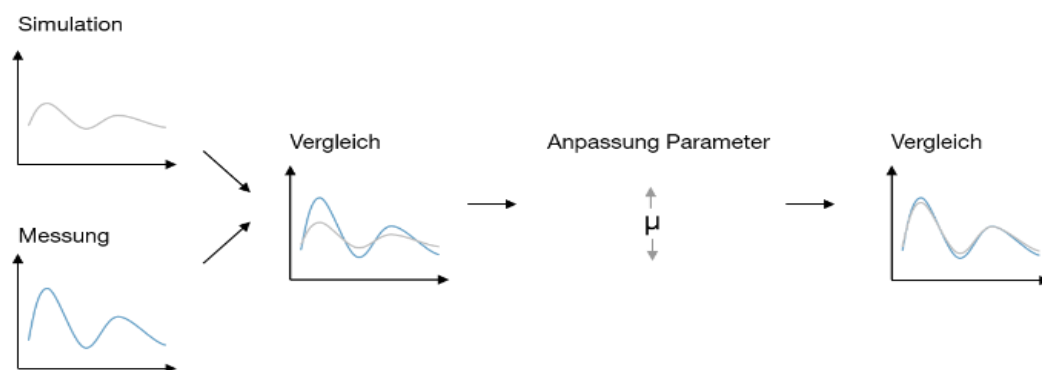


Abb. 2 - Schritte der Auswertung

Die Messungen unterteilen sich in Messungen, welche der direkten Kennwertermittlung dienen (Sorptionsisotherme, freie Wasseraufnahme) und solche die eine qualitative Aussage über die Feuchte in den Bauteilen zulassen (dynamische Sorptionsfähigkeit, Feuchtepufferzahl).

Zusammenfassung, Auswertung der Messreihen

Aus den gemessenen Feuchteveränderungen im Material errechnen sich, die als relevant definierten Kennwerte. Die in Anlehnung an gängige Normen gravimetrisch ermittelten Feuchtemengen lassen sich größtenteils direkt in Kennwerte umrechnen. Diese sind anschließend durch vorhandene Werte in der Literatur und vorgängige numerische Lösungen zu plausibilisieren. Die Simulation der qualitativen Messungen mit den neu ermittelten Kennwerten (vgl. Schritt 1 in Abb. 2) ermöglicht es, eine Aussage über die Verbesserung der Datenqualität zu machen. Ist diese noch ungenügend, kann durch die iterative Anpassung der nicht gravimetrisch ermittelten Kennwerte eine Verbesserung erzielt werden (vgl. Schritt 2 in Abb. 2).

2.2.2 Statistische Methoden

Zur Beurteilung und Analyse der Datenlagen sowie Abschätzung weiterer Datenpunkte eignen sich unterschiedliche statistische Methoden. Die verwendeten Methoden sind in diesem Kapitel kurz erläutert [15].

Standardabweichung

Die Streuung der Messergebnisse wird anhand der Standardabweichung σ (Formel 1) beschrieben. Dabei wird zunächst für eine gegebene Messbedingung x (zum Beispiel für eine bestimmte relative Luftfeuchte) die Standardabweichung der mit n Probestücken durchgeführten Messung y_1, \dots, y_n ermittelt.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Formel 1 – Standardabweichung

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Messreihe (das heißt unter verschiedenen Messbedingungen) pro Baustoff zu treffen, werden die so berechneten Standardabweichungen anschließend je Baustoff gemittelt. Wenn nicht anders angegeben, bezeichnet die Standardabweichung im Folgenden stets diese gemittelte Standardabweichung des Baustoffes.

Regressionsanalyse zur Approximation einzelner Messpunkte

Ist es aus zeitlichen oder technischen Gründen nicht möglich einzelne Messpunkte zu ermitteln werden fehlende Datenpunkte mittels einer Regressionsanalyse bestimmt. Abb. 3 beschreibt das gewählte Vorgehen zur Bestimmung fehlender Datenpunkte, welches aus vier wesentlichen Schritten besteht.

- Schritt 1 – Bildung der Mittelwerte:
Der Mittelwert, der für die einzelnen Probestücke gemessenen Werte wird je Messbedingung ermittelt.
- Schritt 2 – Festlegen der Kurvenform:
Es wird eine möglichst einfache Kurvenform ausgewählt mittels derer die Messpunkte beschrieben werden können und die initiale Parametrisierung der Kurve festgelegt. In diesem Schritt kann es notwendig sein zunächst verschiedene Kurvenformen auszuprobieren.
- Schritt 3 – Minimierung der Residuen:
Mittels eines iterativen Algorithmus wird die Summe der quadrierten Residuen minimiert und so eine optimale Kurve bestimmt (Die Minimierung erfolgt mittels Excel).
- Schritt 4 – Bestimmung eines Messpunktes:
Der fehlende Datenpunkt wird schließlich mit der in Schritt 3 ermittelten optimalen Kurve bestimmt.

In Ausnahmefällen kann es darüber hinaus erforderlich sein fehlenden Messpunkte für einen einzelnen Probekörper zu bestimmen. Das Vorgehen ist dabei im Wesentlichen analog zu dem oben beschriebenen. Es entfällt lediglich Schritt 1, also die Bildung des Mittelwertes, und in Schritt 2 wird die bereits festgelegte Kurvenform herangezogen.

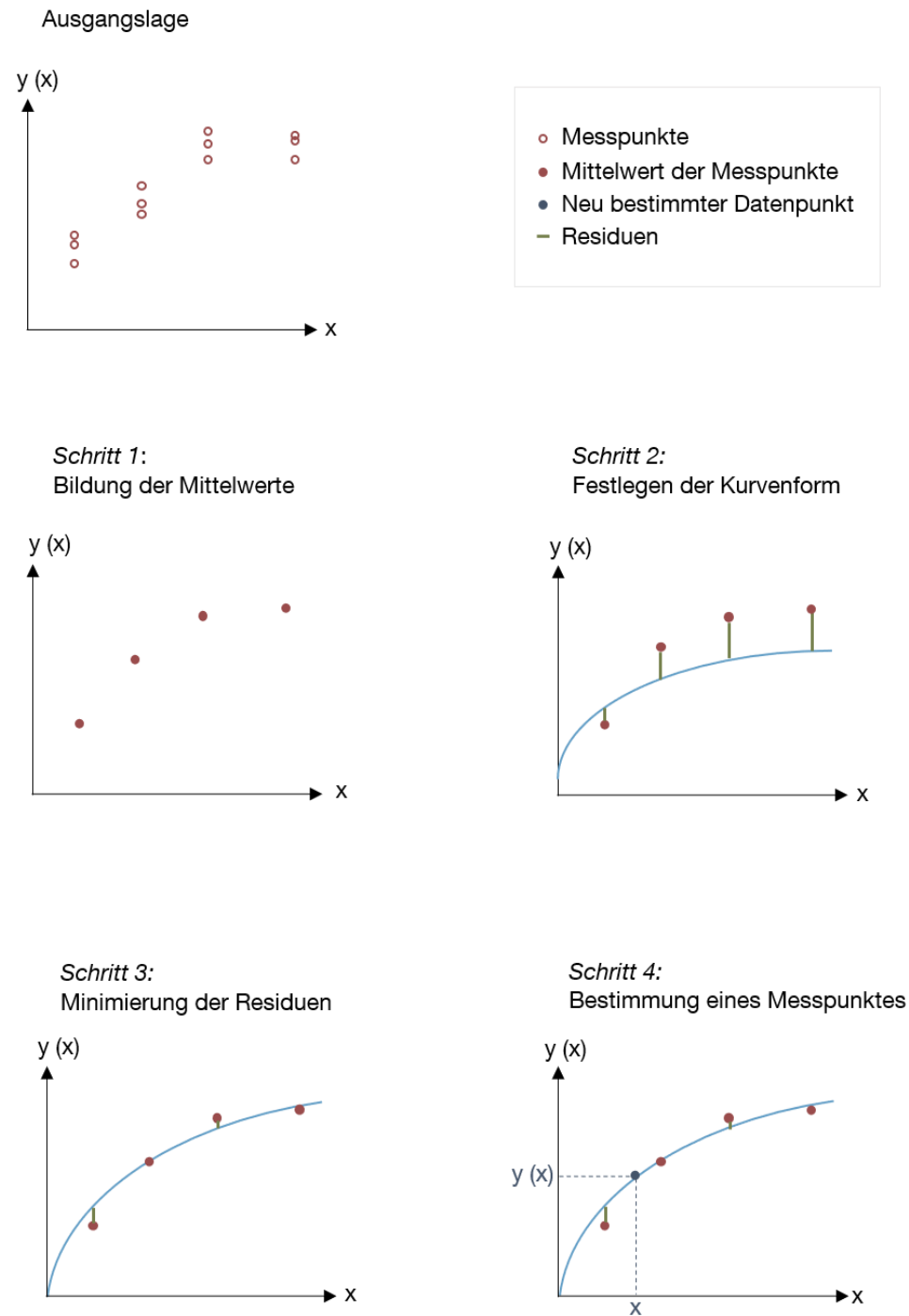


Abb. 3 – Vorgehen bei der Regressionsanalyse

Regressionsanalyse zur Approximation der Sorptionsisotherme

In der numerischen Berechnung der Feuchte- und Wärmeverläufe im Baustoff ist der Sorptionsisotherme nur ein Wassergehalt in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte zuweisbar. Treten für eine relative Luftfeuchte unterschiedliche Wassergehalte für Desorption- und Adsorption auf, werden diese auf einen Wert reduziert. Dies erfolgt entweder durch eine Mittelwertbildung oder eine Regressionsanalyse der Messpunkte. Bei der Regressionsanalyse werden zunächst die gängige Kurvenformen zur Beschreibung von Sorptionsisothermen verwendet. Final wird stets diejenige Kurvenform ausgewählt, die zur geringsten Summe der quadrierten Residuen führt.

Beschreibung der Modellqualität

Um die Fehleranfälligkeit eines Modells zu beschreiben eignet sich die Kreuzvalidierung. Dafür werden die Messpunkte in Trainings- und Vorhersageset unterteilt. Auf Basis der Trainingssets erfolgt eine Schätzung eines Modells zur Berechnung der fehlenden Punkte. Die Fehler errechnen sich dann aus der Differenz der rechnerisch ermittelten Werten und tatsächlich gemessenen Wert für die Vorhersagepunkte. Die Fehler sind quadriert, um den Einfluss von positiven und negativen Vorzeichen zu eliminieren.

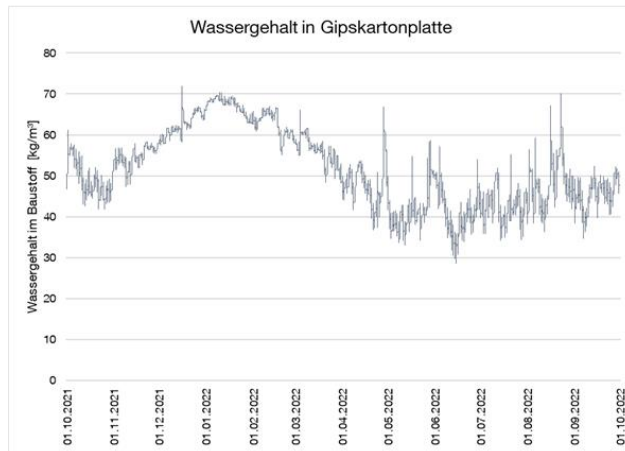
2.2.3 Analyse des Ad- und Desorptionsverhalten von Bauteilen

Die jährliche Feuchteaufnahme einzelner Baustoffe in einem Bauteil erfolgt typischerweise nicht gleichförmig, sondern konzentriert in gewissen Zeitintervallen. Dasselbe gilt für die Feuchteabnahme.

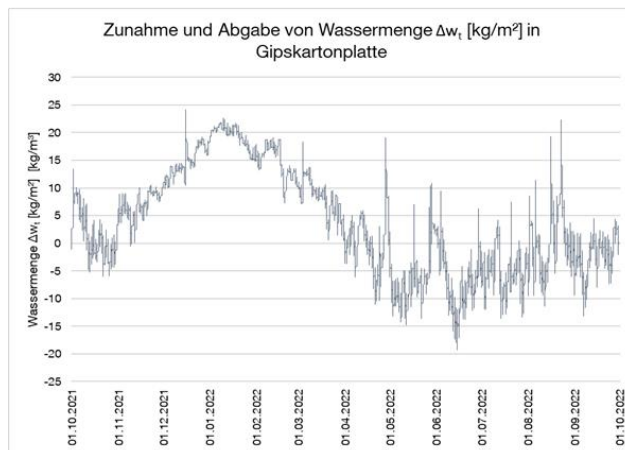
Um diese Ungleichförmigkeit der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe zu quantifizieren, wird folgendermaßen vorgegangen (siehe Abb. 4):

- Schritt 1: Je Baustoff wird der volumenbezogene Wassergehalt w_t über eine Periode von einem Jahr stündlich numerisch ermittelt (das heißt $t = 0h, 1h, \dots, 8760h$).
- Schritt 2: Es werden die stündlichen Feuchtedifferenzen $\Delta w_t = w_t - w_{t-1}$ ermittelt.
- Schritt 3: Die stündlichen Feuchtedifferenzen Δw_t werden absteigend der Größe nach geordnet.
- Schritt 4: Die geordneten Feuchtedifferenzen werden nacheinander aufsummiert und graphisch aufgetragen. Dabei entsteht eine konkave Funktion wie in Abb. 4 dargestellt.
- Schritt 5: Mittels der graphischen Darstellung werden Aussagen über die Verteilung der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe getroffen. Beispielweise lässt sich mittels Abb. 4 ermitteln, dass 60 % der gesamten jährlichen Wasserabgabe in lediglich 900 h im Jahr (ungefähr 10 % des Jahres) erfolgt.

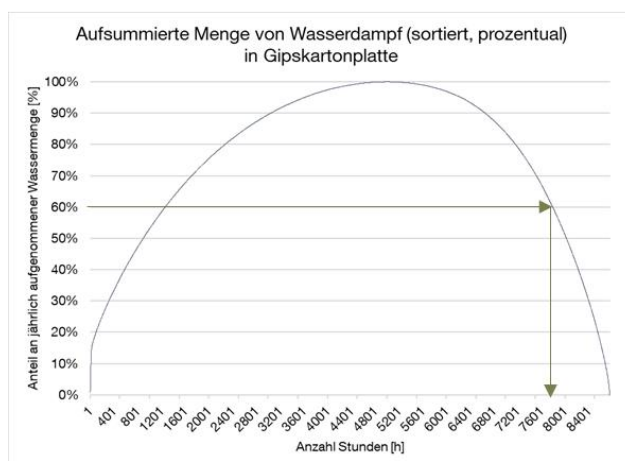
Schritt 1: Ermittlung des Wassergehalts w_t



Schritt 2: Ermittlung der stündlichen Wassergehaltsdifferenz Δw_t



Schritt 3 & 4: Ordnen und Aufsummieren von Wassergehaltsdifferenz Δw_t



Schritt 5: Analyse →

Abb. 4 - Vorgehen bei Analyse des Ad- und Desorptionsverhaltens

3 Bauphysikalische Grundlagen

3.1 Allgemeine Begriffe

Die Grundlage für alle weiteren Kapitel bilden Kenntnisse über die in einem Material möglichen Stoff- und Energietransporte, deren Speicherung sowie die damit verbundenen Effekte. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die notwendigen Kennzahlen und das Innenraumklima definiert.

Zur Beschreibung des Baustoffes im Allgemeinen werden die folgenden Begriffe verwendet:

Rohdichte ρ [kg/m³]: Beschreibt die Masse pro Volumen. Die Rohdichte hat Einfluss auf die wärme- und schalldämmenden Eigenschaften eines Stoffes.

Porosität Φ [-]: Beschreibt das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen des Materials.

Gravimetrisch bestimmter Wassergehalt: Beschreibt ein Verfahren, das den Wassergehalt durch das Wiegen der Gesamtmasse bestimmt [16, 17].

3.2 Wärme

3.2.1 Wärmetransportphänomene

Herrscht zwischen zwei Systemen, in diesem Fall Innen- und Außenraum, eine Temperaturdifferenz, so kommt es zu einem Energiestrom durch die Systemgrenze, den Wandaufbau, in Form von Wärme. Die Wärme strömt solange, bis sich zwischen den beiden Systemen ein Gleichgewichtszustand einstellt. Es gibt verschiedene Wärmequellen/-senken, welche ein Ungleichgewicht zwischen Innen- und Außenraum verursachen können [18].

Dem Wärmetransport durch den Wandaufbau liegen die in Abb. 5 dargestellten drei Mechanismen zugrunde. Diese treten einzeln oder auch gleichzeitig auf [19]. Die folgenden Begriffe beschreiben die thermischen Eigenschaften eines Baustoffes [1, 2, 20]:

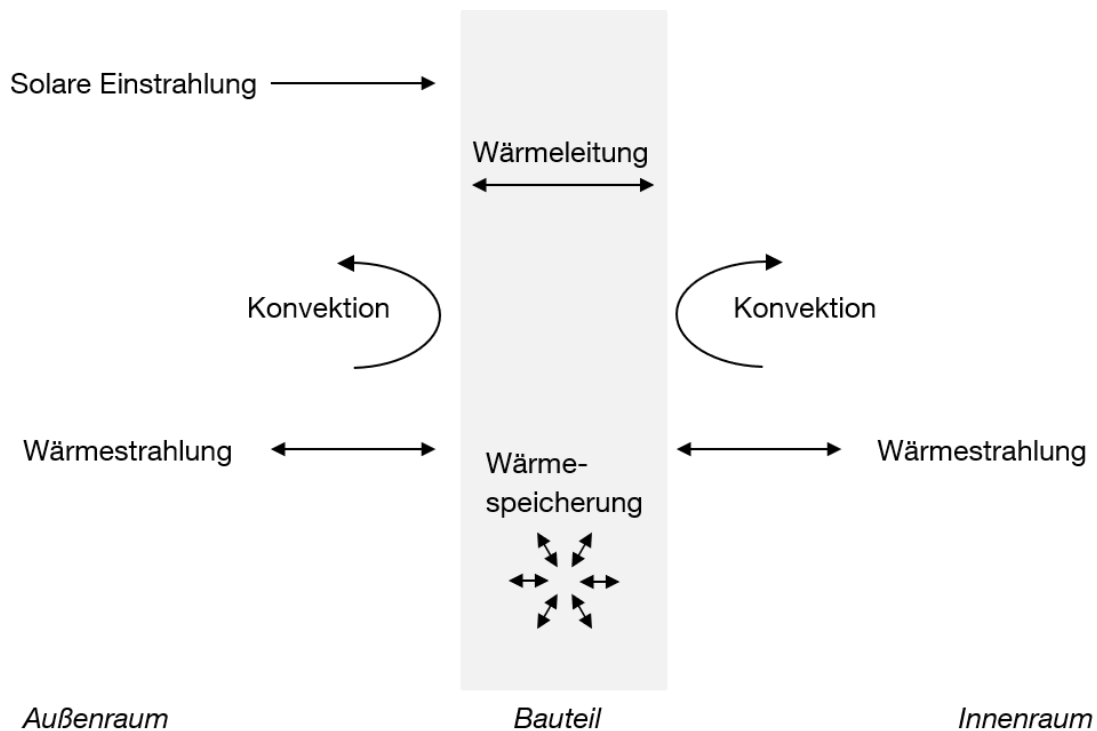


Abb. 5 - Wärmetransportvorgänge im Bauteil

Wärmeleitung

Zusätzliche Energie in Form von Wärme regt die Moleküle zum Schwingen an. Die Schwingung des Moleküls regt die benachbarten Moleküle an und propagiert so durch das Bauteil. Diese Form des Wärmetransport ist in einem Feststoff oder in mehreren miteinander in Berührung stehenden Feststoffen zu finden. Ausschlaggebend für die Stärke des Wärmestroms ist die Wärmeleitfähigkeit λ (Formel 2). Sie definiert die Wärmemenge Q [W], die pro Fläche A [m²] mittels Wärmeleitung durch eine ein Meter dicke Stoffschicht l [m] bei einem Grad Kelvin Temperaturdifferenz ΔT [K] fließt. Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Rohdichte, je höher die Rohdichte ist desto größer ist die Wärmeleitfähigkeit. Der Wärmedurchlasswiderstand R [K/W] hängt von der Wärmeleitfähigkeit und der Bauteildicke d [m] ab.

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta T} = \frac{d}{R}$$

Formel 2 – Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]

Die Wärmestromdichte q (Formel 3) beschreibt den Wärmestrom Φ [W], der durch die Bauteilfläche A [m²] fließt. Der Temperaturgradient im Bauteil entspricht im Falle eines linearen Temperaturverlaufs ΔT .

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$$

Formel 3 - Wärmestromdichte q [W/m²]

Wärmekonvektion

Die Wärmekonvektion beschreibt den Austausch von Wärme zwischen einem Festkörper und einem vorbeiströmenden, flüssigen oder gasförmigen Medium. Das Medium führt dem Festkörper abhängig von dessen Temperatur, dem Wärmeübergangswiderstand und der Oberflächentemperatur des Festkörpers Energie zu oder ab.

Wärmestrahlung

Es findet ein Wärmeaustausch zwischen zwei Festkörpern in Form von elektromagnetischen Wellen statt. Die Menge der ausgetauschten Wärme steht in direktem Zusammenhang mit der Temperaturdifferenz der Festkörper und dem strahlungsabhängigen Wärmeübergangswiderstand, welcher die Materialeigenschaften zusammenfasst. Es ist kein Medium nötig, um die Wärme zwischen den Körpern auszutauschen, der Vorgang kann folglich auch im Vakuum stattfinden. Es kann zusätzlich in langwellige Strahlung (Wärmestrahlung) und kurzwellige Strahlung (solare Einstrahlung) unterschieden werden.

Der Wärmeübergangswiderstand (Formel 4) beschreibt den Wärmeaustausch zwischen einer Luftschicht und einem angrenzenden Bauteil. Er ist der Kehrwert des Wärmeübergangswiderstandes h [W/m²K], welcher sich aus einem konvektiven h_c und einem Strahlungsanteil h_r zusammensetzt.

$$R_s = \frac{1}{h} = \frac{1}{(h_r + h_c)}$$

Formel 4 – Wärmeübergangswiderstand R_s [m²K/W]

Der Wärmedurchgangswiderstand R_T [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] beschreibt den Gesamtwiderstand eines Bauteiles gegenüber einem Wärmestrom, bestehend aus den Wärmedurchlasswiderständen R_i [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] aller Bauteilschichten und den innen- und außenseitigen Wärmeübergangswiderständen $R_{s,i}$ und $R_{s,a}$ [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]. Der Kehrwert des Gesamtwiderstands ist der Wärmedurchgangskoeffizient U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] (Formel 5).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{(R_{s,i} + \sum R_i + R_{s,a})}$$

Formel 5 – Wärmedurchgangskoeffizient U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Die Wärmetransportvorgänge finden nicht nur großräumig in ganzen Wandaufbauten statt, sondern lassen sich analog auch auf die Porenräume und den umschließenden Feststoff im Material übertragen. Abb. 6 zeigt die vorgängig beschriebenen Transportvorgänge übertragen auf den Porenraum [20].

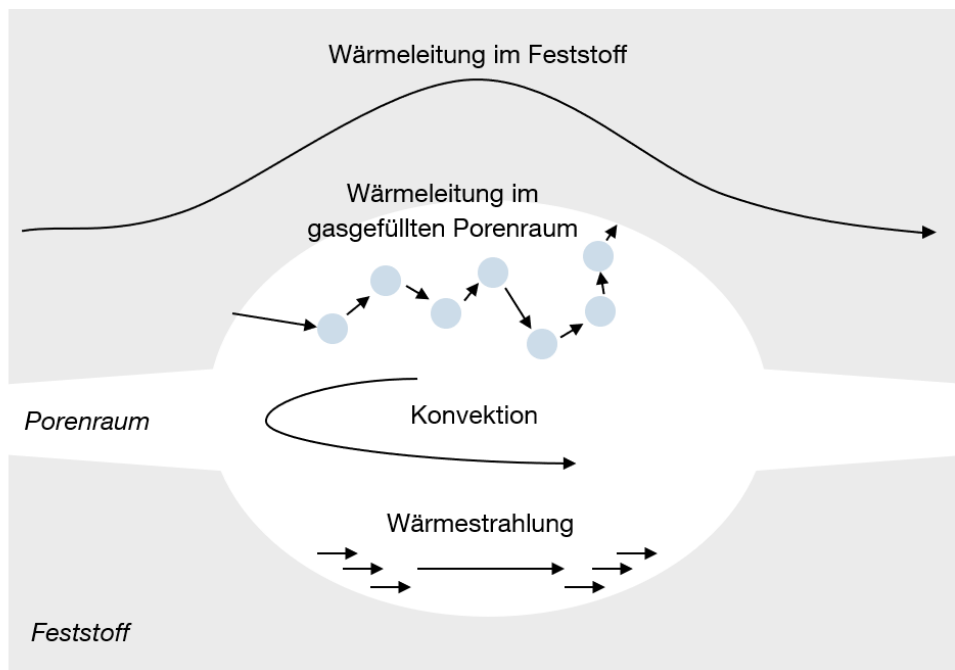


Abb. 6 - Wärmetransport im Porenraum

3.2.2 Wärmespeicherung

Zusätzlich zu dem Wärmetransport, der in dem Material und in Interaktion mit seiner Umgebung stattfinden kann, haben Materialien die Eigenschaft Wärme zu speichern.

Die gespeicherte Wärmemenge setzt sich aus einem sensiblen Teil und einem latenten Teil zusammen. Der sensible Teil ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität und beschreibt die fühlbare Temperaturzunahme des Materials. Die Temperaturzunahme des Materials ist hierbei proportional zu der zugeführten Wärmemenge. Der latente Teil beschreibt die Wärmemenge, welche für den Phasenübergang eines Mediums benötigt wird. Die spezifische Wärmekapazität c [J/kgK] (Formel 6) beschreibt die Wärmemenge ΔQ [W] die notwendig ist, um ein Kilogramm eines Stoffes m [kg] um ein Grad Kelvin zu erwärmen ΔT [K] [1, 2, 20].

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

Formel 6 - Spezifische Wärmekapazität c [J/kgK]

3.3 Feuchte

3.3.1 Feuchteeintrag

Neben Wärmetransporten finden zwischen den Porenräumen auch Stofftransporte in Form von Feuchte statt. Die Hauptquelle in Innenräumen ist in der Luft enthaltenes Wasser in Form von Dampf. Dieser gelangt durch die Porenräume ins Material. Der Anteil von Wasserdampf am Luftgemisch variiert zwischen 0-4 Vol.-%. Der vorherrschende Wasserdampfgehalt wird mit Hilfe der relativen Luftfeuchte beschrieben und wird gegen oben von der temperaturabhängigen Sättigungslinie beschränkt [21].

Wasserdampfkonzentration

Die Wasserdampfkonzentration v [kg/m³] beschreibt die Menge an gelöstem Wasser in der Luft. Hat die Luft die maximal mögliche Wasserdampfmenge aufgenommen wird von Sättigung gesprochen. Die Konzentration des im Sättigungszustand vorhandenen Wasserdampfes wird als Wasserdampfsättigungskonzentration bezeichnet.

Wasserdampfpartialdrücke

Der Wasserdampfpartialdruck p [Pa] ist ein Bestandteil des vorherrschenden Luftdrucks. Er beschreibt den Druck, der durch die in der Luft enthaltenen Wasserdampfmoleküle herbeigeführt wird. Der im Sättigungszustand vorherrschende Wasserdampfpartialdruck wird als Wasserdampfsättigungsdruck bezeichnet. Die DIN 4108-3 tabelliert die entsprechenden Wasserdampfsättigungsdrücke p_{sat} in Abhängigkeit von der Temperatur [6].

relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte φ [-] ist definiert als das Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks p [Pa] zum Wasserdampf-sättigungsdruck p_{sat} [Pa], was der Wasserdampfkonzentration v [kg/m³] im Verhältnis zur Wasserdampf-sättigungskonzentration v_{sat} [kg/m³] entspricht (siehe Formel 7).

$$\varphi = \frac{v}{v_{\text{sat}}} = \frac{p}{p_{\text{sat}}}$$

Formel 7 - relative Luftfeuchte φ [-]

Sowohl der Wasserdampfkonzentration als auch dem Wasserdampfpartialdruck liegt die ideale Gasgleichung zu Grunde. Sie sind von der Masseänderung der Luft durch Aufnahme von zusätzlichem Wasserdampf abhängig. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % hat die Luft ihre maximal mögliche Menge an Wasserdampf bei entsprechender Temperatur aufgenommen [18].

3.3.2 Feuchtetransport

Abhängig von der Porenbeschaffenheit eines Baustoffes treten unterschiedliche Feuchtetransportmechanismen auf. Dabei sind die Größe und Form der Poren maßgebend. Der Zusammenhang zwischen den möglichen Feuchtetransportmechanismen und der Porengröße ist in Abb. 7 ersichtlich [21] [22]. Es können weitere Transporteffekte wie Elektrokinese, hydraulische Strömung, Thermoeffusion oder Gasströmungen auftreten, diese sind aber für die weitere Bearbeitung nicht relevant [23].

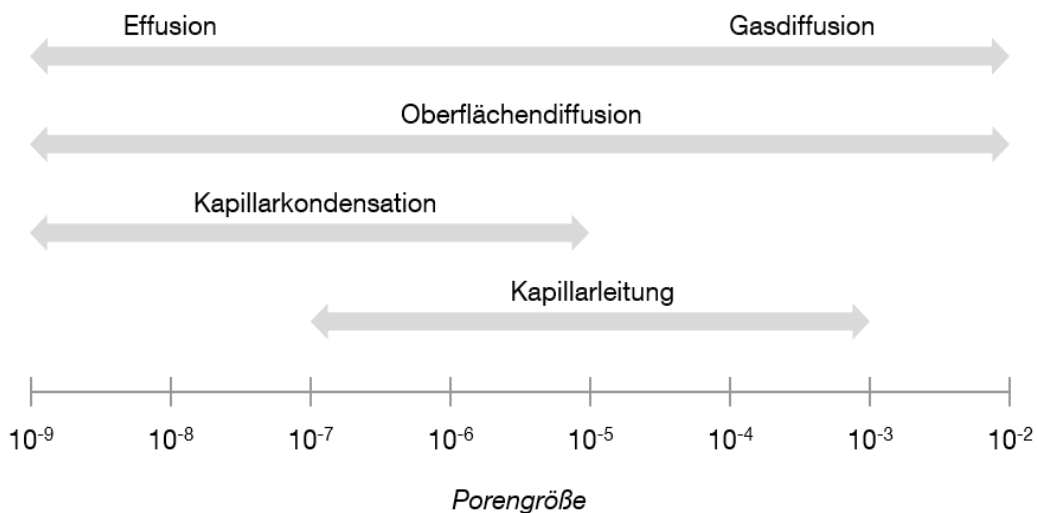


Abb. 7 – Feuchtetransportmechanismen nach [20]

Der Auslöser für die Bewegung der Wassermoleküle durch den Baustoff, die Diffusion, ist die thermische Eigenbeweglichkeit der Moleküle. Das 1. Fick'sche Gesetz beschreibt alle der Diffusion zugrundeliegenden Vorgänge und damit die Durchlässigkeit eines Baustoffes [19, 21].

Wasserdampfdiffusion (Gasdiffusion) und Effusion

Entsteht durch unterschiedliche Wasserdampfkonzentrationen auf der Innen- und Außenseite eines Bauteils oder Baustoffes ein Wasserdampfdruckgefälle, so bewegen sich die in der Luft gelösten Wassermoleküle in die Richtung des niedrigeren Druckes bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Kollidieren die Moleküle auf ihrem zurückgelegten Weg überwiegend mit anderen in der Luft gelösten Wasserdampfmolekülen, spricht man von Wasserdampfdiffusion. Der mittlere Weg, welchen die Moleküle ohne Kollision und daraus resultierender Richtungsänderung zurücklegen, wird freie Weglänge genannt.

Bei kleineren Porendurchmessern stoßen die Moleküle vermehrt mit den Porenwänden anstelle von anderen Molekülen zusammen. Dominieren diese Zusammenstöße, spricht man von Effusion. Die freie Weglänge entspricht dem Durchmesser der Pore.

Lösungsdiffusion

Beschreibt den Transport eines einzelnen gelösten Moleküls durch ein flüssiges oder quasi-flüssiges Stoffgefüge. Das Molekül kann in gleichen Molekülen oder molekular in einem anderen Stoff gelöst sein. Die Weglänge ist hierbei annäherungsweise der Moleküldurchmesser.

Oberflächendiffusion

Durch Anlagerung von Wassermolekülen an den Porenwänden entsteht ein Sorbatfilm. Lagern sich vermehrt Moleküle an, entsteht ein mehrschichtiger Sorbatfilm, in welchem es zu einer Lösungsdiffusion kommt. Diese Art von Lösungsdiffusion wird Oberflächendiffusion genannt. Die treibende Kraft für die Oberflächendiffusion ist die vorherrschende relative Feuchte.

Kapillarleitung

Ist der Porendurchmesser vollständig gefüllt, kommt es zu kapillarer Leitung. Die Flüssigkeit steigt entgegen der Schwerkraft weiter in die Pore auf, bis ihre kapillare Steighöhe erreicht ist. Die kapillare Steighöhe ist abhängig vom Porenradius. Je kleiner der Radius umso größer die Steighöhe.

3.3.3 Feuchtespeicherung

In porösen Baustoffen treten die in Tabelle 1 aufgeführten Arten von Feuchtespeicherung auf. Die Speicherform ist abhängig von der vorherrschenden relativen Luftfeuchte.

Wassergehaltsbereich	Speicherform	Transportmechanismus	Charakteristische Feuchtwert
Sorptionsfeuchtebereich / hygroskopischer Bereich	Sorption	Wasserdampfdiffusion	bis ca. rel. LF 95 %
Kapillarwasserbereich	Kapillarkondensation	Ungesättigte Porenwasserströmung (Oberflächendiffusion)	bis freie Wassersättigung
Übersättigungsbereich	-	Kapillarleitung Wasserströmung	- in Überdruckbereichen

Tabelle 1 – Feuchtespeichermechanismus [22]

Sorption

Die Sorption beschreibt die Anlagerung von Wassermolekülen an die Porenwände. Die zugehörigen Begriffe sind in Abb. 8 ersichtlich. Das Sorbens ist der Feststoff, an dem sich die Wasserdampfmoleküle anlagern. Das Sorptiv ist das ungebundene Wasserdampfmolekül im Porenraum. Nach der Anlagerung an die Porenwand, wird es als Sorbat bezeichnet.

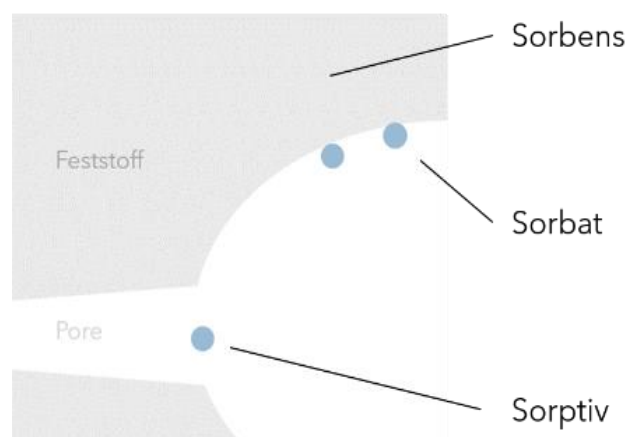


Abb. 8 - Sorptionsbegriffe

Sorptionsvorgänge unterteilen sich in Adsorption- und Desorption. Die Adsorption beschreibt die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft durch Anlagerung an Porenwände und die Desorption die Abgabe [21]. Die Wassermoleküle werden mittels Van-Der-Waals-Kräfte an die Porenwand gebunden. Je dicker die Wassermolekülschicht, desto größer ist der Abstand zur Porenwand und entsprechend kleiner werden die Bindungskräfte. Die weiterentfernt liegenden Wassermoleküle sind somit weniger stark gebunden und können sich leichter wieder lösen [13].

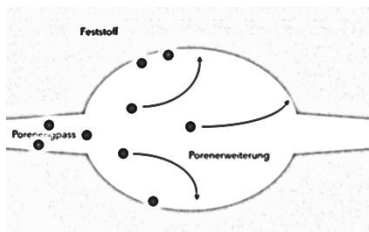
Bei den beschriebenen Vorgängen der Ad- und Desorption handelt es sich um die reversible Physisorption, welche auch im Rahmen der Arbeit betrachtet wird. Die Chemisorption verursacht eine Veränderung der intermolekularen Struktur und Bindungen im Feststoff. Die Sorptionsisotherme beschreibt, welche Menge an Wassermolekülen sich in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und Temperatur in einem Stoff anlagern.

Kapillarkondensation

Im Gegensatz zur Sorption lagern sich die Moleküle bei der Kapillarkondensation nicht mehr über Van-Der-Waals Kräfte zwischen Sorbens und Sorbat an den Wänden an, sondern in Form von Dipol-Dipol-Kräften an den bestehenden Sorbatfilm. Dies tritt überwiegen in kleinen Poren und bei bereits genügend gebundenen Wasserstoffmolekülen entlang der Porenwand auf [24].

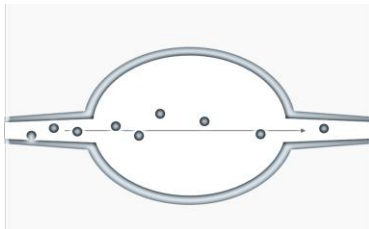
3.3.4 Baustoffmodell der Wassereinlagerung in Porenräumen

Rose [25] überträgt die in den Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 beschriebenen Transport- und Speichermöglichkeiten auf ein Modell aus idealer Kugelpore und Zylinderpore. Damit lassen sich die verschiedenen Zustände in einem porösen Material bei seiner Durchfeuchtung beschreiben. Er unterscheidet dafür die in Abb. 9 aufgezeigten sechs Stadien. Die Idealisierung der Pore als Kugelpore beschreibt die Grenze des Modells.



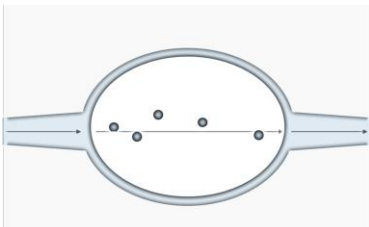
Phase 1 – Dampfdiffusion / Adsorption:

Die durch den Wasserdampf eindiffundierenden Moleküle lagern sich an den Porenwänden ab, verantwortlich dafür sind hohe Adsorptionskräfte.



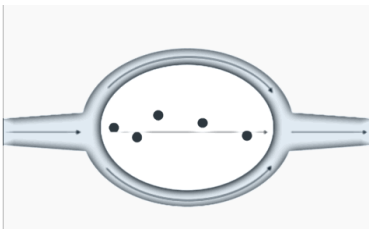
Phase 2 – Dampfdiffusion mono- und multi-molekulare Bewegung:

An den Porenwänden lagern sich Moleküle an bis diese einen geschlossenen Film von ein oder mehreren Moleküldicken umschließt (Sorbatschicht).



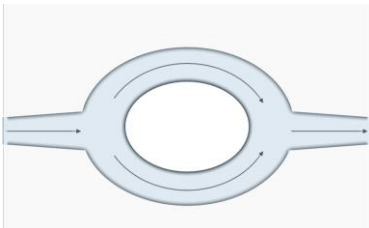
Phase 3 – Dampfdiffusion, Kapillarkondensation, Kapillarleitung:

Durch Kapillarkondensation füllen sich zunächst die Porenengpässe vollständig, in der Folge kommt es in diesen Bereichen zu Kapillarleitung. Im erweiterten Porenraum und herrscht weiterhin Dampfdiffusion vor.



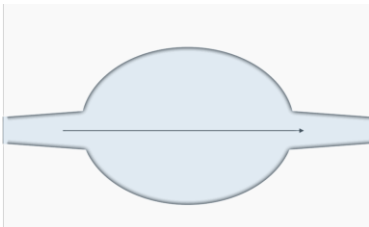
Phase 4 – Dampfdiffusion, Oberflächendiffusion, Kapillarleitung:

Die Sorbatschicht ist soweit angewachsen, dass neben Dampfdiffusion im erweiterten Porenraum auch Oberflächendiffusion möglich ist.



Phase 5 – Kapillarleitung, gesättigte Strömung:

An den Wänden ist soviel Wasser angelagert, dass es zur gesättigten Strömung kommt (siehe Krischner). Es ist nach wie vor eine Luftblase (freischwimmend) in der Pore eingeschlossen.



Phase 6 – Kapillarleitung, gesättigter Porenraum:

Der erweiterte Porenraum ist vollständig gefüllt (wassergesättigt) und folgt nun dem Darcyschen Gesetz.

Abb. 9 - Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt nach Rose [25]

3.3.5 Beschreibung der Feuchtaufnahme und -abgabe eines Baustoffes

Die DIN 4108-3 und DIN EN ISO 9246 benutzen die folgenden Begriffe und Definitionen, um die hygrischen Eigenschaften eines Baustoffes zu beschreiben.

Sorptionsisotherme

Die Sorptionsisotherme beschreibt die Materialfeuchte, die sich in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei isothermen Verhältnissen im Material als Ausgleichsfeuchte einstellt. Die Adsorptionskurve beschreibt die Materialfeuchten bei der Wasseraufnahme und die Desorptionskurve bei der Wasserabgabe. Die Sorptionsisothermen lassen sich in die in Abb. 10 dargestellten Typen einteilen [26]. Die meisten mineralischen Baustoffe, zementhaltigen Betone und Putze, Natur- und Kunststeine sowie Hölzer und Holzwerkstoffen entsprechen Typ II und III.

Die Hysterese beschreibt den Unterschied der Ausgleichsfeuchte bei Ad- und Desorption, bei gleicher vorherrschender relativer Luftfeuchte. Entgegen der Darstellung in Abb. 10, können alle Sorptionsisothermen ein hysteresisches Verhalten aufweisen.

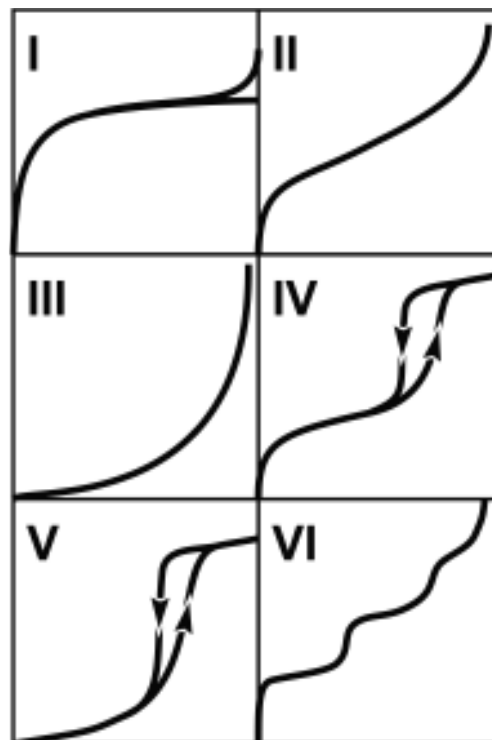


Abb. 10 – Sorptionsisothermentypen nach Sing [26]

Physisorption beschreibt die Anlagerung von Wassermoleküle in den Porenräumen durch Van-der-Waals-Kräfte. Im Gegensatz dazu gehen die Wassermoleküle in der Chemisorption eine feste Bindung mit dem Sorbat ein. Das Sorbat erfährt in der Folge eine chemische Veränderung.

Wasserdampfdiffusionswiderstand

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-] quantifiziert den Widerstand, der ein Baustoff gegenüber der Diffusion von Feuchte durch das Material leistet. Ein hoher μ -Wert bedeutet, dass der Baustoff weniger dampfdurchlässig ist. Er beschreibt das Verhältnis von Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in Luft D [m^2/s] zum Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des porösen Stoffes δ_v [m^2/s] (Formel 8).

$$\mu = \frac{D}{\delta_v}$$

Formel 8 – Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-]

Wasseraufnahmekoeffizient

Die DIN 15148 [27] beschreibt den Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] als die vom Baustoff über eine Fläche A [m^2] aufgenommene Feuchtigkeit m [kg] in Abhängigkeit der Zeit t [s] (Formel 9)

$$w = \frac{m_w}{A \cdot \sqrt{t}}$$

Formel 9 - Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

Bezugsfeuchtegehalt

Beschreibt den Wassergehalt w_ϕ [kg/m^3], der sich bei einer gegebenen relativen Luftfeuchte [%] im Baustoff einstellt.

Freie Wassersättigung

Beschreibt den Wassergehalt w_f [kg/m^3], der vom Baustoff ohne äußere Einwirkung durch Saugen aufgenommen wird [23].

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

Die Mächtigkeit einer ruhenden Luftschicht S_d [m], die den gleichen Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-] besitzt wie eine betrachtete Bauteildicke d [m] (Formel 10).

$$s_d = \mu \cdot d$$

Formel 10 - Wasserdampfdiffusionsäquivalente-Luftschichtdicke s_d [m]

3.3.6 Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen

Holz ist ein kapillarporöser und hygroskopischer Baustoff, der Flüssigkeit nicht nur in seinen Poren (Makrosystem), sondern auch in der Zellstruktur (Mikrosystem) speichern kann. Daraus ergeben sich drei Grenzzustände:

Darrtrocken: Die Holzfeuchte beträgt 0 %

Fasersättigung: Die Mikrostruktur ist vollständig mit Wasser gefüllt.

Wassersättigung: Die Mikro- und Makrostruktur sind vollständig gefüllt.

Gebundenes Wasser bezeichnet den Anteil an aufgenommene Wasser bis zum Fasersättigungspunkt. Der Anteil oberhalb des Fasersättigungspunkt heißt freies Wasser. Der Fasersättigungspunkt befindet sich je nach Holzart zwischen 22 % und 35 % Holzfeuchte [28]. Die Wasseraufnahme und -abgabe einer Holzzelle sind in Abb. 11 dargestellt. Im Bereich zwischen Darrtrocken und Fasersättigung kann es zu Quellen und Schwinden kommen [29].

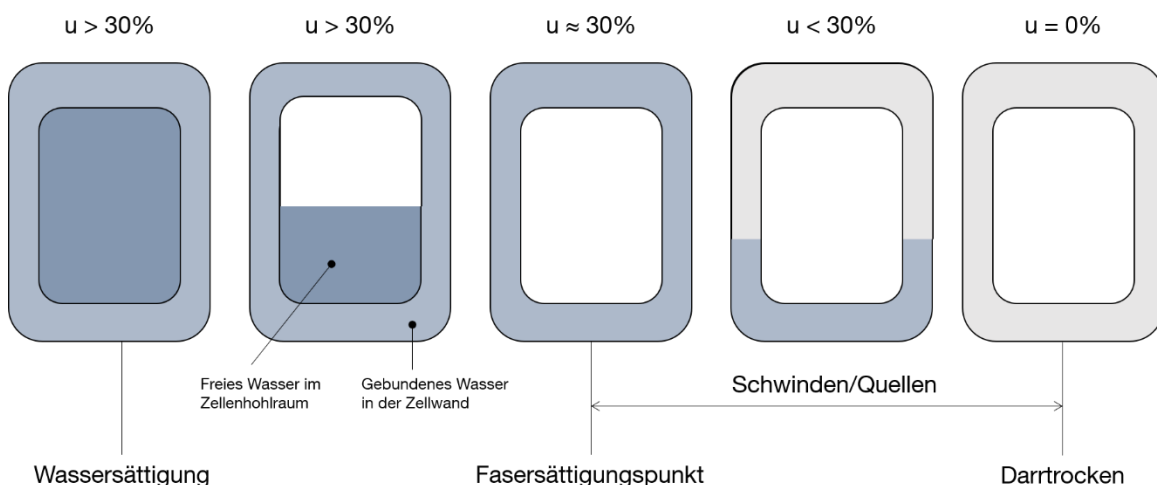


Abb. 11 - Wasseraufnahme und -abgabe einer Holzzelle aus [29].

Die Holzfeuchte ist ein häufig verwendeter Begriff, um die Feuchteverhältnisse in Holz zu beschreiben. Sie bezieht den vorliegenden Wassergehalt auf den darrtrockenen Zustand. Der Wassergehalt hingegen bezieht sich auf den fasergesättigten Zustand. Im Holzfeuchtebereich von 0 – 6 % (unter 20 % relativer Luftfeuchte) kommt es zur Chemisorption, die Wassermoleküle lagern sich durch Van-der-Waalsche Kräfte an die OH Gruppen der Cellulose an an. Ab 6 % Holzfeuchte tritt Physisorption auf [30].

3.4 Gekoppelter Feuchte- und Wärmetransport

3.4.1 Sorptionsenthalpie

Die Bauteilfeuchte kann Einfluss auf den Wärmetransport nehmen. Diese Koppelung zeigt sich beispielsweise in der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen von deren Durchfeuchtung.

Ein bedeutsamer Begriff in diesem Zusammenhang stellt die Enthalpie dar, sie beschreibt die Wärme, welche unter gleichbleibendem Druck im Material gespeichert ist. In feuchten Baustoffen setzt sich die Gesamtenthalpie aus der Enthalpie des trockenen Baustoffes und der Enthalpie des Wassers, welches sich im Baustoff befindet, zusammen. Diese Enthalpie wird Sorptionsenthalpie genannt. Die genaue Beschreibung der enthaltenen Enthalpien gestaltet sich schwierig, da es dafür vertiefte Kenntnisse über die Porengestaltung des Baustoffes braucht. Künzel unterscheidet zwei Formen, wie Enthalpien Einfluss auf die Wärmeleitung haben können [31].

Die Enthalpie infolge von sich an den Porenwänden anlagernden Wassermolekülen heißt Sorptions- oder auch Adsorptionsenthalpie. Sie setzt sich aus der Verdampfungsenthalpie und der Bindungsenthalpie zusammen. Die Verdampfungsenthalpie beschreibt den Energieunterschied durch einen Phasenwechsel von dampfförmig zu flüssig. Bei der Bindungsenergie handelt es sich um die Energie, die sich durch die Bindung des Stoffes an das Sorbens freisetzt. Die Bindungsenergie verringert sich mit zunehmendem Abstand vom Sorbens.

3.4.2 Wärmetransport infolge von Enthalpieströmen

Infolge von Feuchtebewegungen im Material kann es zu Enthalpieströmen und dadurch zu Wärmetransport im Material kommen. Die Ströme sind an Wasser als Medium gebunden. Künzel zeigt auf, dass insbesondere die Enthalpieströme infolge von Wasserdampfdiffusion verbunden mit Phasenänderungen großen Einfluss auf die Wärmebilanz des Bauteils oder Materials haben können. Die Enthalpieströme infolge von Flüssigtransport sind vernachlässigbar.

3.5 Innenraumklima

3.5.1 Feuchte und Temperaturverläufe in Innenräumen

Der Mensch verbringt einen Großteil seiner Zeit in Innenräumen. Es entsteht eine Wechselwirkung zwischen Innenraumklima und dem Menschen. Die Aktivität des Menschen beeinflusst das Raumklima und das Raumklima nimmt Einfluss auf das physische und psychische Wohlbefinden des Menschen.

Die Temperatur und relative Luftfeuchte in Innenräumen unterliegt tageszeit- als auch jahreszeitabhängigen Schwankungen. Die DIN 4108 – Teil 3 beschreibt das Innenraum-

klima als Funktion des Außenklimas. Diese Methode eignet sich gut, um den Jahresverlauf des Raumklimas abzubilden. Die Tagesschwankungen sind allerdings abhängig von den umgebenden Oberflächen. In Kombination mit hygroskopischen Materialien ist es deshalb schwierig kurzzeitige Schwankungen zu erfassen. Die Bestimmung der Innenraumluftfeuchte mittels der in DIN 4108 – Teil 3 aufgeführten Gleichung eignet sich hier nur bedingt [6, 32, 33]. Durch eine verfeinerte Grundlast in Form einer Sinusschwankung zwischen 40 % und 60 % relative Luftfeuchte im Laufe von 24 Stunden, lässt sich der Tageszyklus besser beschreiben. Um Koch- oder Duschkzyklen abzubilden, eignen sich spontane Feuchtesprünge von 50 % auf 80 % für eine Stunde, respektive von 50 % auf 90 % für 30 Minuten. Die Höhe des Sprungs hat stärkeren Einfluss auf das Resultat in den umliegenden Bauteiloberflächen, als die Dauer der Feuchtelast [19]. Das Nordtestprotokoll simuliert den Tagesverlauf mit einem Zyklus von acht Stunden bei 75 % relative Luftfeuchte, abgelöst von 16 Stunden bei 33 % relative Luftfeuchte [34].

3.5.2 Ziele für das Innenraumklima

Die DIN 4108-3 legt die Grenzwerte für die Raumlufffeuchte und Temperaturen fest. Zwei grundlegende Faktoren, welche bei der Beurteilung des Innenraumklimas relevant sind, sind der Schutz vor Schimmelpilzbildung und die Schaffung einer an die Bedürfnisse angepasste Behaglichkeit. Beide stehen im Austausch mit den, in den Räumen vorherrschenden Feuchten und Temperaturen.

Treten konstant hohe Luftfeuchten in Räumen auf, kommt es zu Tauwasser- und Schimmelpilzbildung. Schimmelpilze lösen gesundheitliche Probleme aus und verursachen unangenehme Gerüche. Es ist nicht abschließend geklärt, bei welcher Konzentration Schimmelpilzsporen gefährlich sind. Allgemein gilt es Schimmelpilz zu vermeiden und Räume trocken zu halten [35]. Hohe Feuchten in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur begünstigen Schimmelpilzbildung, hygroskopische Baustoffe sind folglich besonders förderlich. Die von der DIN 4108-3 definierten kritischen relativen Luftfeuchten, bei denen es zu Schimmelpilz oder Tauwasserbildung kommen kann, sind zu unterschreiten [19], [6].

Die Behaglichkeit ist nicht rechnerisch erfassbar. Der Komfort im Raum ist stark abhängig vom individuellen Empfinden des Menschen. Die DIN 7730 [36] legt fest, dass sich 80 % der darin befindlichen Menschen wohlfühlen sollen. Die relative Luftfeuchte im Innenraum beeinflusst neben der Behaglichkeit des Menschen zusätzlich das Empfinden der Luftqualität.

Ein günstiger Wandaufbau verhindert nicht nur Schimmelpilzbildung und schafft ein angenehmes Innenraumklima, sondern senkt bestenfalls zusätzlich den Energiebedarf durch Heizungs-, Lüftungs- und Klimageräte.

4 Stand der Forschung

4.1 Approximation der Sorptionsisotherme

Langmuir [37] entwickelte ein einfaches Modell zur Beschreibung der Physisorption in Poren (siehe Formel 11). Seine Theorie basiert auf der Annahme, dass sich in einer Pore eine einlagige Schicht von Wassermolekülen bilden kann und der Platz für sich anlagernde Moleküle dadurch beschränkt ist. Die Sorptionsisotherme lässt sich so mittels weniger Parameter beschreiben. Die theoretische Langmuir-Isotherme bildet die realen Feuchteverhältnisse im Baustoff im Bereich von 10 – 30 % relative Luftfeuchte gut ab.

$$u_{\varphi} = u_f \cdot \frac{c \cdot \varphi}{1 + c \cdot \varphi}$$

u_{φ} [kg/m ³]	Wassergehalt
u_f [kg/m ³]	freie kapillare Wassersättigung
φ [-]	relative Luftfeuchte
c [-]	freie Parameter

Formel 11 - Approximation des Wassergehalts u_{φ} [-] im Material nach Langmuir [37]

Bei höheren Luftfeuchten stößt das Modell an seine Grenzen. Brunauer, Emmett und Teller (BET) [38] ergänzten das Modell von Langmuir unter der Annahme, dass sich in der Pore mehrere Schichten von Molekülen anlagern können. Unter der Annahme, dass keine Wechselwirkung zwischen den Molekülen stattfindet.

Die BET-Gleichung ist Grundlage für weitere Verfeinerungen und Anpassungen. Sowohl die Gleichung von Kast [39] als auch die für das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelte Simulationsprogramm Wärme- und Feuchte instationär (WUFI) genutzte Gleichung zur Approximation der Sorptionsisotherme basieren darauf. Die in WUFI integrierte Gleichung (Formel 12) ermöglicht es, mittels Eingabe weniger Parameter die Sorptionsisotherme zu generieren [31, 40].

$$u_\phi = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{\rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln(\phi)}{c_1} \right)^{c_2}}$$

u_ϕ [kg/m ³]	Wassergehalt
u_f [kg/m ³]	freie kapillare Wassersättigung
ρ_w [kg/m ³]	Dichte von Wasser
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	Absolute Temperatur
ϕ [-]	relative Luftfeuchte
c_1, c_2 [-]	freie Parameter

Formel 12 - Adaptierte BET-Gleichung von Holm et al. [39] zur Beschreibung von u_ϕ [-]

Im Bereich der Lebensmittelchemie beschreiben Guggenheim, Anderson und de Boer (GAB) eine weitere Gleichung zur Beschreibung der Feuchteaufnahme (Formel 13). Mit dieser lässt sich der gesamte Bereich der Sorptionsisotherme in Abhängigkeit von drei Parametern zuverlässig abbilden [41].

$$u_\phi = 1 - \frac{u_f \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \phi}{(1 - c_2 \cdot \phi)(1 - c_2 \cdot \phi + c_1 \cdot c_2 \cdot \phi)}$$

u_ϕ [kg/m ³]	Wassergehalt
u_f [kg/m ³]	freie kapillare Wassersättigung
ϕ [-]	relative Luftfeuchte
c_1, c_2 [-]	freie Parameter

Formel 13 - GAB-Gleichung zur Beschreibung der Sorptionsisotherme mittels u_ϕ [-]

Sie nutzen den gleichen physikalischen Hintergrund wie die BET-Gleichung. Inzwischen beschränkt sich das Anwendungsgebiet der GAB-Gleichung nicht mehr auf die Feuchteaufnahme von Lebensmittel. Rhim [42] zeigt, dass sich die GAB-Gleichung auf die Sorptionseigenschaften von Papierproben übertragen lässt. Bratasz et al. nutzen die Gleichung zur Abschätzung der Sorptionsisotherme in Faserstoffen und verschiedenen Holzarten [43, 44].

Berger et al. versuchen aktuell die Schätzung der Approximationsparameter effizienter zu machen. Sie untersuchen das mathematische Problem, die optimalen Experimentplanungen und -aufbau zur Bestimmung der Sorptionsisothermen eines Holzfasermaterials [45].

4.2 Feuchtepufferwirkung von hygroskopischen Oberflächenmaterialien

4.2.1 Bestimmung der Feuchtepufferzahl (Moisture Buffer Value - MBV)

Der Einfluss der Raumlufftfeuchte auf das Temperaturempfinden und Wohlbefinden in einem Raum haben bereits viele Studien zum Gegenstand [46–48]. Durch die gestiegenen Anforderungen an die Innenraumlufftqualität und dem damit oftmals verbunden erhöhten Energiebedarf werden neue Untersuchungen hinsichtlich der passiven Wirkung von Innenraumoberflächen immer relevanter. Studien haben gezeigt, dass hygroskopische Materialien eine Möglichkeit bieten, die Spitzenwerte von Raumlufftfeuchten auszugleichen, ohne den Energieverbrauch zu erhöhen. Dadurch können bestenfalls die auftretenden Feuchtesprünge infolge der Nutzung der Räume gemäßigt und der thermische Komfort erhöht werden [49–51].

Die Wahl der Oberfläche hinsichtlich der Feuchtepufferung ist nicht allein aus der theoretisch ermittelten Sorptionsisotherme ablesbar, da die Hysterese das dynamische Verhalten der Baustoffe beeinflussen kann. Dieses hysteresische Verhalten in Simulationsprogrammen abzubilden, bereitet weiterhin Schwierigkeiten [52].

Eine Vielzahl von Vorgehen quantifizieren die Pufferwirkung der Oberflächenmaterialien. Die Parameter, wie Zykluslänge der Feuchtebelastung, Messtemperatur und die Feuchtesprunghöhe unterscheiden sich aber je nach Verfahren stark. Um die Messung der Feuchtepufferwirkung eines eingesetzten Materials zu vereinheitlichen und vergleichbar zu machen, wurde im Rahmen des Nordtest-Projects ein einheitliches Test-Protokoll entwickelt [34].

Das Testvorgehen basiert auf Feuchtebelastungen in Form von Rechteck-Wellen, welche die täglichen Feuchtebelastungen in einem Wohngebäude abbilden. Die Testkörper werden 8 Stunden lang einer erhöhten relativen Luftfeuchte von 75 % ausgesetzt, gefolgt von 16 Stunden bei einer niedrigeren relativen Luftfeuchte von 33 %. Dieser Zyklus wiederholt sich bis die Feuchten in den Testkörpern eingeschwungen sind. Aus der Massendifferenz zwischen hoher und niedriger Feuchtebelastung errechnet sich der MBV (Moisture Buffer Value) [53].

$$MBV = \frac{(m_{RH,max} - m_{RH,min})}{A * (RH_{max} - RH_{min})}$$

$m_{RH,max}$ [kg]	maximale Masse bei hoher relativer Luftfeuchte RH_{max}
$m_{RH,min}$ [kg]	minimale Masse bei niedriger relativer Luftfeuchte RH_{min}
RH_{max} [%]	relative Luftfeuchte bei hoher Feuchtebelastung
RH_{min} [%]	relative Luftfeuchte bei niedriger Feuchtebelastung
A [m ²]	exponierte Oberfläche

Formel 14 - Feuchtepufferzahl MBV [kg/m²%RH]

Aus dem Vergleich der Nordtest-Methode [34] und der im Japanese Industrial Standard (JIS) A 1470-1:2002 [54] festgehaltenen Methode zur Bewertung der Feuchtepufferwirkung geht hervor, dass sich beide Methoden zur Bestimmung des MBV eignen. In der Bewertung der Methoden zeigt sich, dass sich der so bestimmte MBV-Wert bei langen Zyklen (Tageszyklen) gut für die Charakterisierung der Pufferkapazitäten eignet. Für sehr kurze Zyklen (Duschzyklen, Kochzyklen) ist die Ähnlichkeit der real auftretenden Feuchteschwankungen und die Konditionen während der Messung ausschlaggebend dafür, wie zuverlässig die Abbildung durch den MBV ist [55].

4.2.2 Einfluss von Oberflächenbehandlungen auf die Feuchtepufferwirkung

Ramos et al. [52] untersuchen den Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die Feuchtepufferwirkung. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung der Oberflächenbehandlung auf die Wasserdampfresistenz einerseits von der vorherrschenden Feuchte und andererseits von dem Trägermaterial abhängt. Insbesondere durch den Einsatz von Grundierungen in Kombination mit Farben sinken die MBV-Werte deutlich.

Ramos und Freitas haben basierend auf dem MBV-Wert einen täglichen Trägheitsindex definiert. Dieser Wert kann als Raum-MBV angesehen werden, welches die Luftwechselrate und Feuchteschwankungen miteinbezieht. Dadurch wird eine Verbindung zwischen dem MBV der umgebenden Raumbooberflächen auf Materialebene zum Gesamtraum geschaffen [56].

4.2.3 Einfluss der Oberflächen auf den Energieverbrauch

Zhang et al. zeigen, dass sich der Energieaufwand in gemäßigtem und semi-ariden Klima um bis zu 25 % senken lässt. Die feuchtepuffernden Materialien sind besonders geeignet für ein Klima mit ausgeprägten Feuchteunterschieden zwischen Tag und Nacht. Der Feuchtepufferwert hat das Potenzial zukünftig als Entscheidungshilfe für die Auswahl der Innenoberfläche zu dienen [51]. Die Untersuchungen von Osanyintola und Simonson zeigen, dass die größten direkten Energieeinsparungen in Gebäuden mit einer mechanischen Kühlung möglich sind. Sie sehen aber in allen Klimazonen potenzielle

Einsparmöglichkeiten. Einerseits durch direkte Einsparungen in Heiz- und Kühlenergie und andererseits durch indirekte Einsparungen infolge anpassbaren Luftwechselraten und Innentemperaturen durch das verbesserte Innenraumklima [8].

Sie sehen das große Potenzial des Feuchtepufferwerts im Einsatz als Richtwert zur korrekten Auswahl des Innenoberflächenmaterials.

4.3 Der Latentwärmeeffekt und die hygrothermische Masse

Beeinflussen, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, Enthalpieströme infolge von Wasserdampfdiffusion den Wärmetransport, spricht man vom Latentwärmeeffekt. Dieser hängt von der vom Bauteil aufgenommenen Feuchtemenge ab. Folglich zeigt er sich in hygroskopischen Baustoffen stärker als in anderen. Nore und Kraniotis zeigen, dass bei Massivholz-Innenoberflächen der Latentwärmeeffekt zu einer Reduktion des Energiebedarfs führen kann. Basis dafür liefert eine Simulation der Feuchteverhältnisse im Bauteil und die mathematische Umrechnung auf die zu erwartende Energieeinsparung. Die gewonnene Energie kann als hygrothermische Masse einen Teil der benötigten thermischen Masse zur Wärmedämmung ersetzen und den Materialverbrauch dadurch senken. Parallel gleichen die hygroskopischen Baustoffe Feuchtespitzen aus, was den Energieverbrauch zusätzlich senkt (siehe Kapitel 4.2) [57, 58].

5 Ermittlung der Wärme- und Feuchteverläufe im Baustoff

5.1 Vorteile der hygrothermischen Simulation

Das Glaser-Verfahren bietet eine einfache und schnelle Berechnung, um Auskunft über die stationären Feuchteverhältnisse in den einzelnen Bauteilschichten zubekommen. In vielen Fällen reicht dieses simple Verfahren aus, um Aussagen über die Qualität des Bauteiles zu machen. Treten trotz korrekter Nachweisführung Probleme mit Feuchte in den Bauteilen auf, gilt es, die Kenntnisse über einen Baustoff hinsichtlich Feuchteaufnahme und -speicherung sowie die Koppelung zwischen Wärme- und Feuchtevorgängen zu vertiefen. Die Möglichkeiten dafür sind mit diesem Verfahren nur beschränkt möglich, da einige Vereinfachungen hinsichtlich der Vorgänge im Material getroffen werden. [59, 60]:

- Feuchtetransport ausschließlich durch Dampfdiffusion
- keine Wärme- oder Feuchtespeicherung
- stationäre Verhältnisse (Blockrandbedingungen)
- keine Kopplung von Wärme- und Feuchtetransport
- eindimensionales Verfahren

Dies führt dazu, dass Effekte wie Austrocknung von Baufeuchten, Schlagregenpenetration, Sommerkondensation, Tauwasserbildung auf Außenbauteilen durch nächtliche Unterkühlung, aufsteigende Feuchte und die energetische Auswirkung der Feuchte kaum abbildbar sind. Bei der Mitabbildung der beschriebenen Effekte entstehen komplexe Gleichungen, welche schwer lösbar sind. An dieser Stelle kommen instationäre Programme zum Einsatz, wie beispielsweise WUFI des Fraunhofer IBP. Diese bilden die zeitlichen Verläufe der Temperatur und Feuchte im Material ab.

Ein großes Potential von instationären Simulationsprogrammen liegt bei der Untersuchung von neuen Bauprodukten. Sie können messtechnische Untersuchungen unterstützen oder ersetzen und verringern dadurch den Zeit- und Kostenaufwand. Zusätzlich ermöglichen sie langzeitige Untersuchungen von Bauprodukten, welche im Realmaßstab aufgrund des Zeit- und Platzaufwands nur schwer umsetzbar sind. [59, 60].

5.2 Modellbildung und Lösung

Die Grundlage aller thermischen- und hygrischen Simulationsprogramme bilden physikalische Modelle, welche die in Kap. 3.2-3.4 beschriebenen Vorgänge im Material in Abhängigkeit zum Außenklima und weiteren Randbedingungen abbilden.

Es gibt eine ganze Reihe von Modellen unterschiedlicher Detaillierungsgrade und numerischen Methoden, welche weltweit zum Einsatz kommen. Delgado et al. [9]

erstellen in ihrem Buch eine Übersicht über verschiedene Simulationsprogramme. Sie beschreiben die zugehörigen, bauphysikalischen Modelle und die benötigten Parameter für jedes Simulationsprogramm. Die Simulationen für die vorliegende Arbeit werden mit WUFI Pro durchgeführt. Die Grundlage für die Simulation bildet das von H.M Künzel entwickelten numerische Modell [31]. Dieses eignet sich für ein- und zweidimensionale, instationäre Berechnungen mit gekoppeltem Wärme- und Feuchtetransport. Ein Vorteil von WUFI ist, dass für die Eingabe nur wenige Stoffkennwerte und Größen zu ermitteln sind. Diese Werte sind verhältnismäßig einfach zu messen und größtenteils bereits in den Herstellerangaben vorhanden.

Das Modell von Künzel basiert auf den folgenden Gleichungen zur Beschreibung der Wärme und Feuchtetransporte im Material (siehe Formel 15):

Wärmetransport:
$$\frac{\partial H}{\partial \theta} * \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda * \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v * \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Feuchtetransport:
$$\rho_w * \frac{\partial u}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w * D_w * \frac{\partial u}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

D_w [m ² /s]	Feuchtetransportkoeffizient
H [J/m ³]	Enthalpie des feuchten Materials
h_v [J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
p [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
u [m ³ /m ³]	Wassergehalt
δ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionskoeffizient der Luft
θ [°C]	Temperatur
λ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstand des trockenen Materials
ρ_w [kg/m ³]	Rohdichte von Wasser
φ [-]	Relative Luftfeuchte

Formel 15 - Gekoppelte Wärme- und Feuchtegleichung

Der linke Term der Gleichung beschreibt die Speicherung der Wärme bzw. Feuchte und der rechte die Transportvorgänge im Material. Die Kopplung der beiden Gleichungen ist auf die Feuchteabhängigkeit der Gesamtenthalpie, die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturabhängigkeit der Feuchteströme zurückzuführen.

WUFI unterteilt die Baustoffe in finite Volumenelemente und löst die Gleichungen iterativ für die einzelnen Volumenelemente. Die Genauigkeit und der Rechenaufwand hängt somit direkt zusammen mit dem Gitteraufbau. Abb. 12 zeigt die Funktionsweise und einzelnen Schritte von WUFI [31, 61].

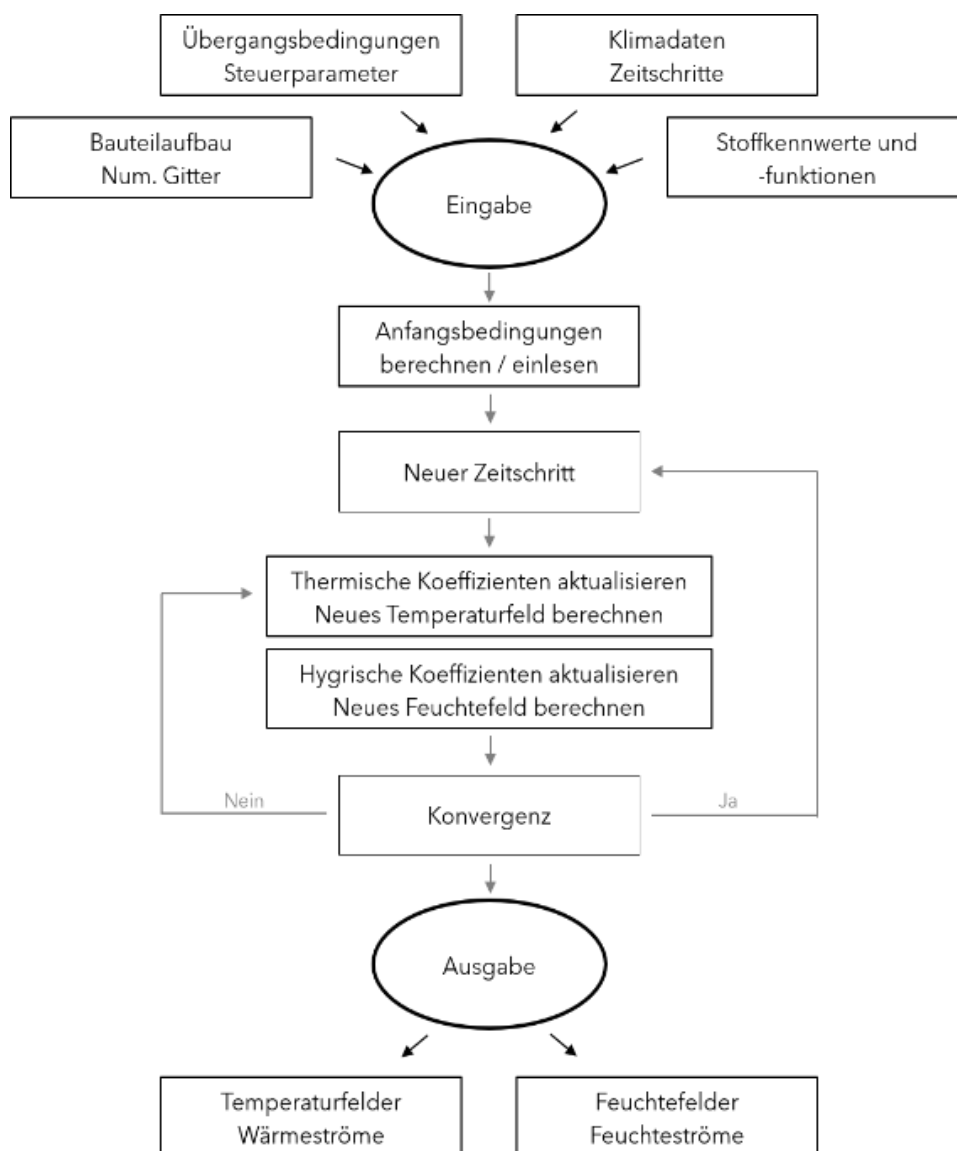


Abb. 12 - Flussdiagramm WUFI-Simulation

5.3 Grundlagen der numerischen Berechnung

5.3.1 Baustoffgruppen und benötigte Materialdaten

Welche Daten notwendig sind, um ein möglichst zuverlässiges Simulationsergebnis zu erhalten, ist abhängig von dem verwendeten Simulationsprogramm, den verwendeten Baustoffen und seinen Eigenschaften. WUFI unterteilt die Materialien in sechs Gruppen und listet die dazugehörigen benötigten Messwerte auf [62]:

Gruppe A: kapillaraktive Materialien (Beton, Mauerstein, Holzwerkstoffe, Putz)

Gruppe B: nicht kapillaraktive Faserdämmstoffe (Mineralwolle)

Gruppe C: nicht hygroskopische Materialien (Glas, Metall)

Gruppe D: kapillaraktive Innendämmungen (Holzfaserdämmplatte)

Gruppe E: Folie konstanter μ -Wert

Gruppe F: Folie feuchtevariabler μ -Wert

Für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind insbesondere die Gruppen A und D. Für die in diese Kategorie fallenden Materialien sind die in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerte zu ermitteln.

Das technische Datenblatt der Hersteller liefert für die meisten Baustoffe standardmäßig einige der Kennwerte. Die folgenden Kennwerte sind normalerweise in den Herstellerangaben zu finden:

- Rohdichte
- Wärmeleitfähigkeit
- Spezifische Wärmekapazität
- Wasserdampfdiffusionswiderstand

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Kennwerte aus leicht bestimmbareren Werten zu approximieren. WUFI verwendet den Bezugsfeuchtegehalt u_{80} und die freie Wassersättigung zur Berechnung der Feuchtespeicherfunktion. Die Approximation erfolgt mit der in Kapitel 4.1 beschriebenen Funktion, einer Weiterentwicklung der BET-Funktion. Zusätzlich definieren Krus et al. ein Verfahren, um die Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen D_{ws} und Weiterverteilen D_{ww} aus dem Bezugsfeuchtegehalt, der freien Wassersättigung und dem Wasseraufnahmekoeffizient zu bestimmen [63, 64]. Der Wasseraufnahmekoeffizient lässt sich aus der in der DIN-15148 beschriebenen Verfahren ermitteln [33]. Das Vorgehen zur Bestimmung der freien Wassersättigung erläutert Kapitel 8.3, die Grundlage bildet die DIN 16535 [65].

Messwert		Gruppe A	Gruppe D
Rohdichte	[kg/m ³]	✓	✓
Porosität	m ³ /m ³	✓	✓
Wärmekapazität	J/kgK	✓	✓
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C, trocken	W/mK	✓	✓
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ-Wert)	-	✓	✓
Feuchtespeicherfunktion	kg/m ³	✓	✓
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen	m ² /s	✓	✓
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilen	m ² /s	✓	✓
μ-Wert, feuchteabhängig	-	(✓)	(✓)
Wärmeleitfähigkeit, feuchteabhängig	W/mK	(✓)	(✓)
Wärmeleitfähigkeit, temperaturabhängig	W/mK	(✓)	(✓)
Enthalpie, temperaturabhängig	J/kg	(✓)	(✓)
✓ = notwendig; (✓) = notwendig, wenn Eigenschaft relevant			

Tabelle 2 - Zu bestimmende Kennwerte der Baustoffgruppen A und D

5.3.2 Randbedingungen der Simulation

Die Randbedingungen haben erheblichen Einfluss und können maßgebend für eine realitätsnahe Simulation sein.

Außenklima

Das Außenklima setzt sich aus Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Niederschlag zusammen. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit die Verschattung, die Ausrichtung, die Neigung und die Höhe des Gebäudes zu definieren. In der WUFI Datenbank sind Klimadaten für diverse Standorte hinterlegt. Es lassen sich auch eigene Klimadateien einlesen.

Innenraumklima

Das Innenraumklima ist in vielen Fällen abhängig vom Außenklima. Entsprechend lässt es sich an das Außenklima koppeln oder eigenständig definieren. Zusätzlich ist es möglich, eigene Klimadaten einzulesen.

Oberflächendifusionsübergang

Der Oberflächendifusionsübergang für Bauteile, wie Dach oder Außenwand, ist im Simulationsprogramm basierend auf der DIN 4108-3 voreingestellt. Es ist zusätzlich möglich benutzerdefinierte Werte einzugeben.

5.3.3 Einfluss der Beschichtungen

Für Beschichtungen an Außen- und Innenoberfläche ist, aufgrund der geringen Dicke und den schwer zu bestimmenden Kennwerten keine Betrachtung als eigene Schicht möglich. Der Beschreibung des zusätzlichen Widerstandes erfolgt über die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke S_D [m]. Sie bildet den zusätzlichen Wasserdampfdiffusionswiderstand, infolge der Beschichtung, für die meisten Fälle ausreichend ab. Alternativ ist es möglich die Kennwerte für das Material in Verbindung mit dem Trägermaterial zu ermitteln. In der vorliegenden Arbeit kommen beide Varianten zum Einsatz. Das genaue Vorgehen erläutert Kapitel 8.

5.3.4 Ausgabeform der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Material

Die Zeitschritte und Monitorpositionen sind vom Nutzer einstellbar. Die Ausgabe erfolgt als .asc-Datei, als Bericht oder als Graphik.

5.4 Vorhandene Werte in Literatur und Datenbanken

In den vom Hersteller mitgelieferten Produktdatenblätter sind einige der benötigten Kennwerte bereits angegeben. Fehlen einzelne Werte oder sind keine Produktdatenblätter verfügbar, gibt es die Möglichkeiten auf bestehende Datenbanken zurück zu greifen:

- Fraunhofer Institut für Bauphysik
- Generische Materialien in der WUFI internen Datenbank
- Japanische Datenbank
- LTH Universität von Lund
- NTNU Norwegian University of Science and Technology
- TU Wien – Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
- MASEA Datenbank

Zusätzliche Kennwerte befinden sich in der Literatur. Beispielsweise beschreiben Holm et al. eine Reihe von Sorptionsisothermen für unterschiedliche Materialien [66].

Eine kritische Betrachtung der Werte und Prüfung auf ihre Plausibilität bleiben unerlässlich. Für einen Baustoff existieren in mehreren Quellen teilweise sehr unterschiedliche Werte. Die Bandbreite an Werten ist in Tabelle 3 am Beispiel der, in den oben aufgelisteten Datenbank, verfügbaren Kennwerte für einer Gipskartonplatte aufgezeigt.

Kennwert	Minimum	Maximum
Rohdichte ρ [kg/m ³]	625	1023
Porosität Φ [m ³ /m ³]	0,65	0,75
Wärmekapazität c [J/kgK]	850	1384
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,163	0,3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]	6	11,2

Tabelle 3 - Bandbreite der Kennwerte für eine Gipskartonplatte in den Datenbanken

5.5 Ziele der vorbereitenden Schritte

Um die Rahmenbedingungen und Anforderungen an die geplanten Messungen festzulegen, sind vorbereitende Analysen und Simulationen durchzuführen.

Die Ziele dieser vorbereitenden Simulationen sind:

- Die relevanten Parameter zu identifizieren, welche zu messen sind.
- Die benötigten Messinstrumente und Proben, sowie deren Abmessungen, zu bestimmen.
- Erste Erkenntnisse zu den zu erwartenden Werten zu gewinnen.
- Allfällige Fehler und Ungenauigkeiten bereits in frühen Stadien der Messungen zu erkennen und entsprechende Anpassungen sowohl im Modell als auch in der Messaufbau vorzunehmen.

Diese Schritte sorgen dafür, dass die Messungen möglichst zuverlässige und nachvollziehbare Resultate liefern.

5.6 Sensitivitätsanalyse

Die in WUFI hinterlegten Gleichungen zur Abbildung des Wärme- und Feuchtetransport sind zwei gekoppelte nicht lineare Differentialgleichungen. Dies macht die analytische Abschätzung des Einflusses einzelner Parameter sehr schwierig. Stattdessen untersucht eine Sensitivitätsanalyse qualitativ den Einfluss der einzelnen Parameter.

Eine Erhöhung und Reduzierung eines Parameters um 20 % und 50 % zeigt die Auswirkung dessen auf den Temperaturverlauf und Feuchtegehalt im Material. Die Randbedingungen sowie alle anderen Parameter bleiben konstant. Dies macht ersichtlich, welchen Einfluss der einzelne Parameter auf die Maximalwerte und die Abklingzeit hat. Es lassen sich keine Zahlen quantifizieren, aber qualitative Änderungen erkennen. Zusätzlich zeigt die Sensitivitätsanalyse, ob ein Zusammenhang zwischen Wärme- und Feuchte im Material besteht. Die Sensitivitätsanalyse betrachtet die folgenden Baustoffe und materialspezifischen Parameter.

Vollholz, OSB-Platte, Holzfaserdämmung, Gipskartonplatte Lehmputz,	}	Rohdichte ρ [kg/m ³] Porosität Φ [-] Wärmekapazität c [J/kgK] Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-] Bauteildicke d [m] Bezugsfeuchtegehalt u_{80} [kg/kg]
--	---	---

Es erfolgt ein einmaliger, innenseitiger Feuchtesprung von 30 % auf 70 % relative Luftfeuchte. Die Auswertung der Wirkung des Feuchtesprungs erfolgt anhand der veränderten Oberflächentemperatur sowie dem Anstieg der relativen Luftfeuchte an der Innenoberfläche. Die veränderte Oberflächentemperatur zeigt gleichzeitig die Koppelung der Wärme an die Feuchte.

Die Tabelle 4 zeigt die Kennwerte für einen Lehmputz. Die Abb. 14 und Abb. 13 zeigen die dazugehörigen Resultate der Sensitivitätsanalyse des Parameters Rohdichte. Alle weiteren Resultate der Sensitivitätsanalyse befinden sich im Anhang D.

Parameter	50 %	80 %	100 %	120 %	150 %
Rohdichte ρ [kg/m ³]	757	1211,2	1514	1816,8	2271
Porosität Φ	0,21	0,34	0,42	0,50	0,63
Wärmekapazität c [J/kgK]	425	680	850	1020	1274
Wärmeleitfähigkeit λ	0,325	0,520	0,650	0,780	0,975
Wasserdampfdiffusionswiderstand	5,65	9,04	11,30	13,56	16,95
Bezugsfeuchtegehalt u_{80} [kg/kg]	Die Sorptionsisotherme ist in diesem Fall nicht in Abhängigkeit des Bezugsfeuchtegehalts approximiert.				

Tabelle 4 - Parameter Sensitivitätsanalyse, Lehmputz

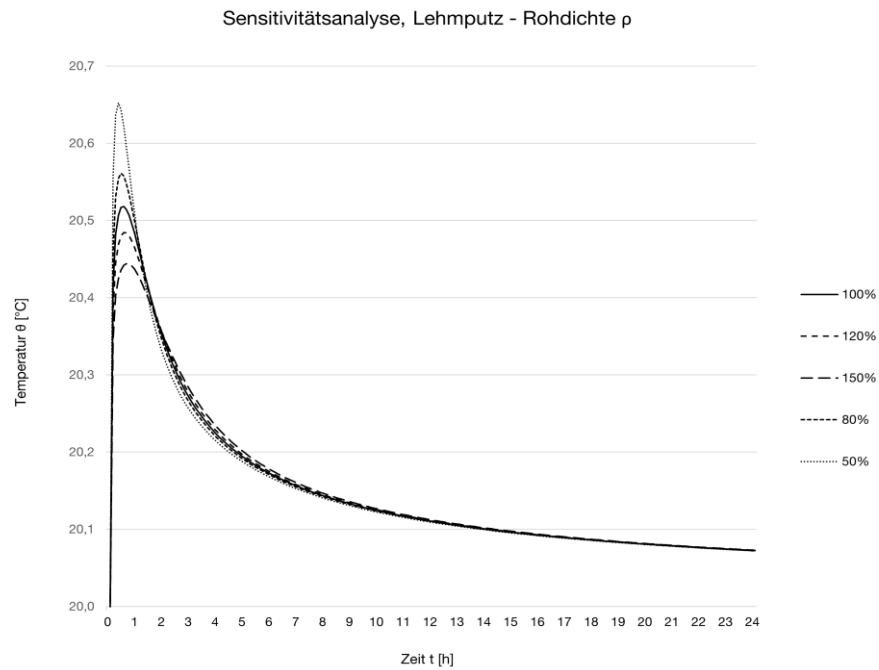


Abb. 14 - Sensitivitätsanalyse der Rohdichte, Lehmputz, Innenoberflächentemperatur

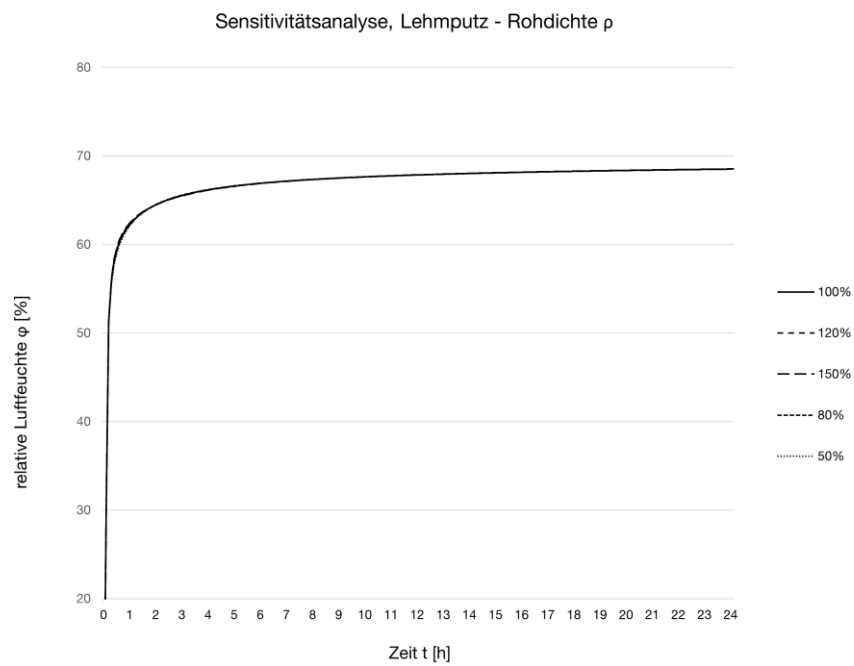


Abb. 13 – Sensitivitätsanalyse der Rohdichte, Lehmputz, relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche

Rohdichte:

Eine höhere Rohdichte reduziert den Temperaturanstieg an der Innenoberfläche infolge des Feuchtesprungs. Die größten Unterschiede infolge der veränderten Rohdichte finden in der Holzfaserdämmung statt. Die Differenzen im Temperaturanstieg, verursacht durch die unterschiedlichen Rohdichten, heben sich bereits nach kurzer Zeit wieder auf (siehe Abb. 13). Die Rohdichte hat keinen Einfluss auf die relative Luftfeuchte auf der Innenoberfläche.

Porosität:

Die Porosität hat kaum Einfluss auf den Temperaturanstieg an der Innenoberfläche infolge des Feuchtesprungs. Nur der Lehmputz zeigt einen klaren Anstieg des Temperaturmaximums bei einer geringeren Rohdichte. Die Porosität hat keinen Einfluss auf die relative Luftfeuchte.

Wärmekapazität:

Die höhere Wärmekapazität reduziert den Temperaturanstieg an der Innenoberfläche infolge des Feuchtesprungs. Das Vollholz (VH), die OSB-Platte (OSB) und die Holzfaserdämmung (HF) besitzen die gleiche Wärmekapazität. Trotzdem sind Unterschiede in der Veränderung des Temperaturanstiegs zu erkennen. Der Einfluss der Wärmekapazität zeigt sich bei der Holzfaserdämmung stärker als beim Vollholz und der OSB-Platte. Die Unterschiede sind in der Abb. 15 ersichtlich. Dies bestätigt die Annahme, dass es zwischen den einzelnen Parametern und dem Temperaturanstieg keinen direkten, linearen Zusammenhang gibt, sondern diese immer auch mit den restlichen Parametern zusammenhängt.

Wärmeleitfähigkeit:

Eine höhere Wärmeleitfähigkeit reduziert den Temperaturanstieg an der Innenoberfläche infolge des Feuchtesprungs. Im Gegensatz der durch die Rohdichte verursachten Temperaturdifferenz, hält sich der Unterschied zwischen den verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten länger und ist nach 8 Stunden immer noch klar erkennbar (vgl. Abb. 14 und Abb. 16). Die Wärmeleitfähigkeit hat keinen Einfluss auf die relative Luftfeuchte auf der Innenoberfläche.

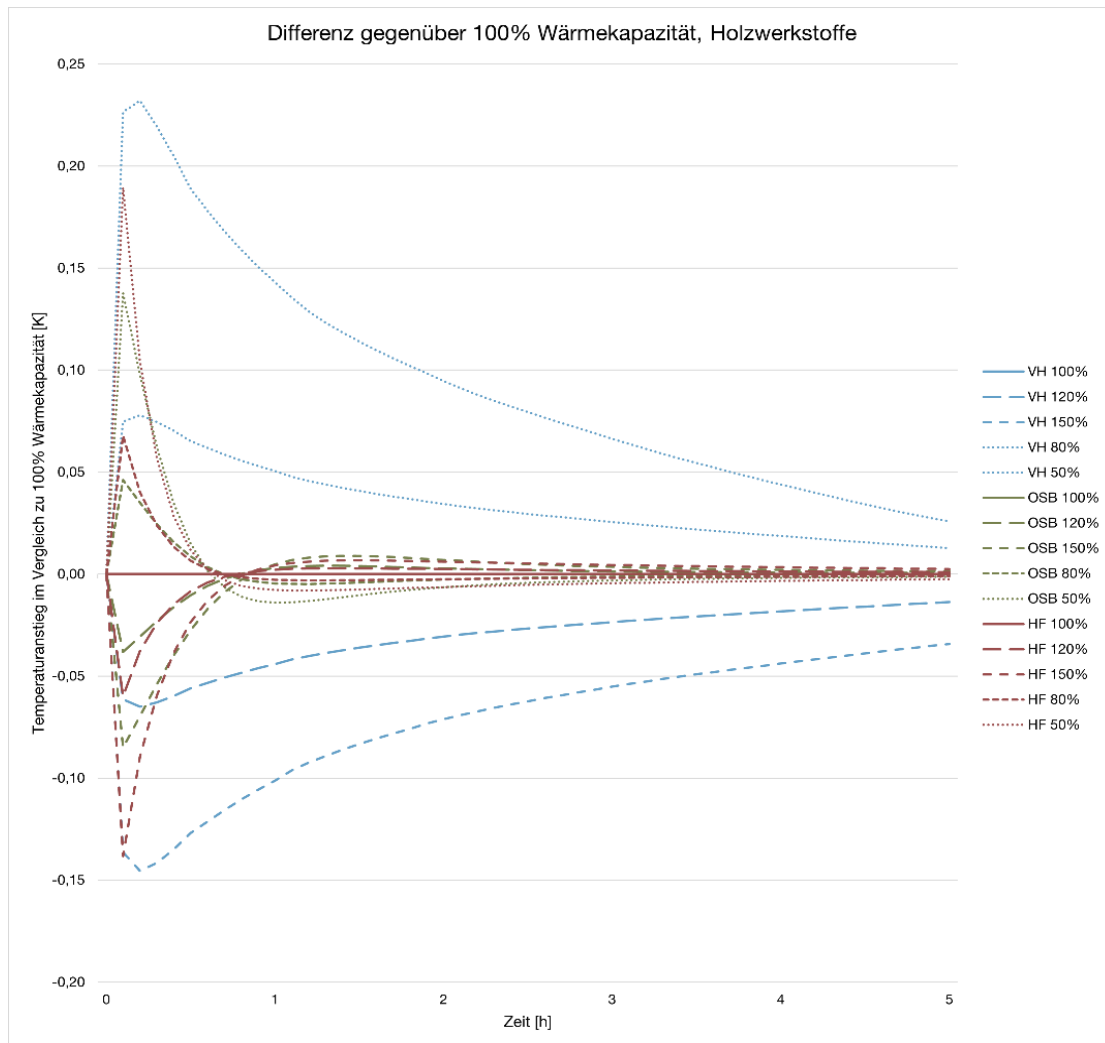


Abb. 15 - Sensitivitätsanalyse der Wärmekapazität, Zunahme der Temperatur gegenüber 100 % Wärmekapazität

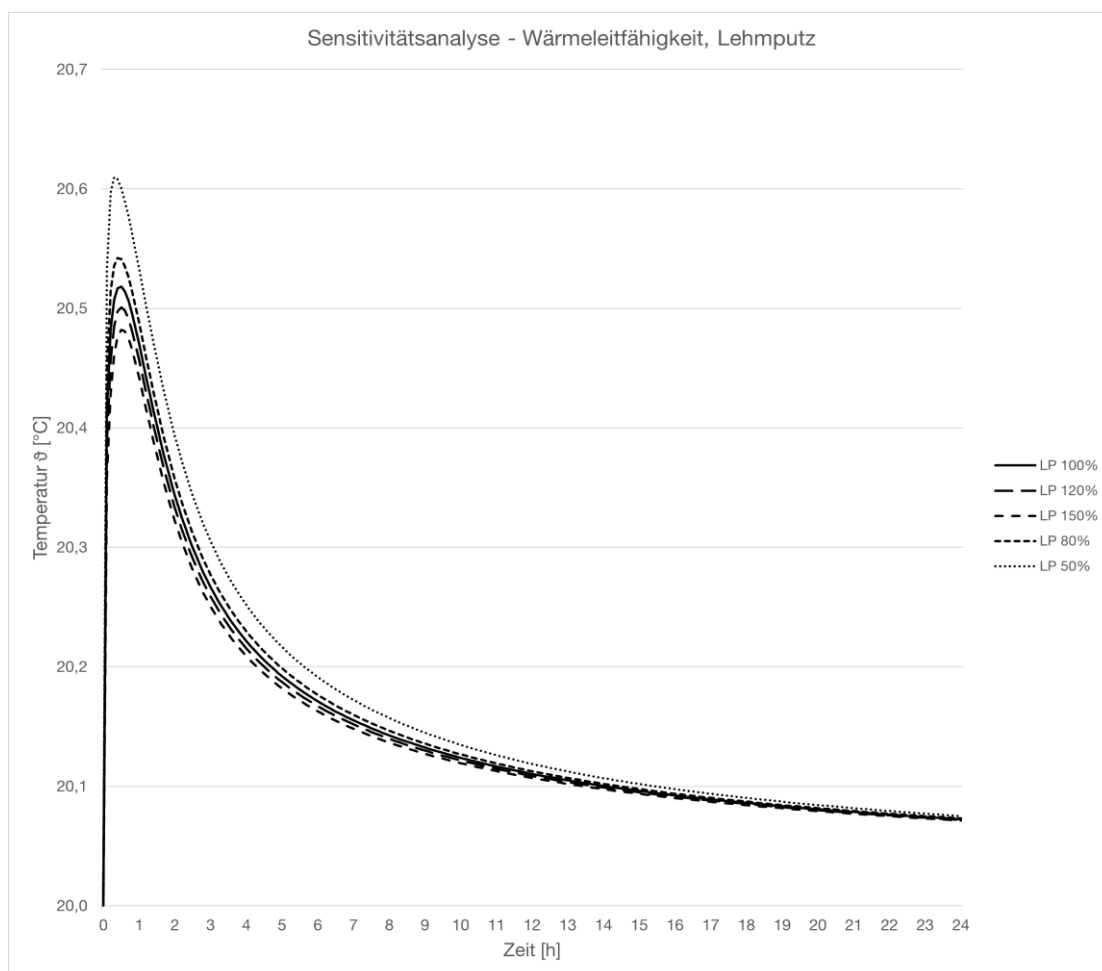


Abb. 16 - Sensitivitätsanalyse der Wärmeleitfähigkeit, Lehmputz, Innenoberflächentemperatur

Wasserdampfdiffusionswiderstand:

Je kleiner der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist, desto schneller steigt die relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche an und desto höher ist die maximal auftretende relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche. Ein kleinerer Wasserdampfdiffusionswiderstand verursacht zudem einen höheren Temperaturanstieg an der Innenoberfläche. Beim maximalen Temperaturanstieg ist das Abklingen abhängig vom Baustoff. Das Vollholz nähert sich nur langsam wieder der vorherrschenden Innentemperatur von 20 °C an, während die Gipskartonplatte schnell auf den Ausgangswert zurückfällt. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand als Feuchtekenwert zeigt durch seinen Einfluss auf die Temperatur die Koppelung zwischen Wärme und Feuchte im Material.

Bauteildicke:

Der maximale Wert des Temperaturanstiegs an der Innenoberfläche durch den Feuchtesprung ist unabhängig von der Materialdicke. Das Abklingen nach dem Maximum verlangsamt sich mit zunehmender Bauteildicke. Hinsichtlich der relativen Feuchte an der Innenoberfläche sind nur die Holzfaserdämmung und die Gipskartonplatte abhängig von der Materialdicke. Mit zunehmender Materialdicke verlangsamt sich bei diesen Baustoffen der Anstieg der relativen Feuchte.

5.7 Untersuchte Kennwerte

Kapitel 5.3.1 definiert und Kapitel 5.6 untersucht die Kennwerte, die für die numerische Berechnung notwendig sind. Daraus ergeben sich die, in Tabelle 5 aufgeführten, für die Feuchte relevanten Kennwerte. Diese Werte lassen sich aus den ebenfalls in Tabelle 5 aufgeführten Messwerten bestimmen.

Kennwert für die numerische Berechnung	Benötigter Messwert zur Kennwertberechnung
Sorptionisotherme	Baustofffeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte Freie Wassersättigung
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen	Wasseraufnahmekoeffizient Freie Wassersättigung Baustofffeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilen	Wasseraufnahmekoeffizient Freie Wassersättigung Baustofffeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl, in Abhängigkeit unterschiedlicher Feuchten

Tabelle 5 - Benötigte Messwerte für die numerische Berechnung

Auf die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl muss aus zeitlichen Gründen verzichtet werden. Um die für die numerische Berechnung benötigten Kennwerte zu generieren, werden folgende Werte durch Messungen ermittelt:

- freie Wassersättigung
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Baustofffeuchten in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte

Zusätzlich liefert die Messung des Darrgewichts die benötigten Werte zur Bestimmung der Rohdichte. Die genauen Messverfahren sind in Kapitel 8 erläutert.

6 Identifikation hygroskopisch bedeutsamer Baustoffe

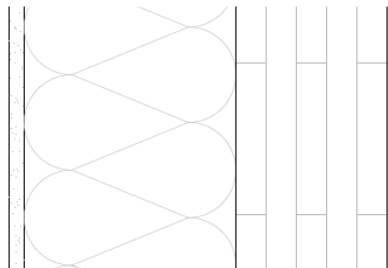
6.1 Wandaufbauten

Nachfolgende Untersuchung identifiziert in insgesamt acht verschiedenen Wandaufbauten die Baustoffe, welche in Abhängigkeit zum Innenraumklima stehen. Es handelt sich bei den Wandaufbauten um Brettsperrholzaufbauten (BSP, drei Stück), Holzrahmenleichtbauaufbauten (HRLB, vier Stück) und Stampflehmwand (SLW, ein Stück). Der genaue Aufbau der einzelnen Bauteile ist in Abb. 17 bis Abb. 19 dargestellt. Die verwendeten Baustoffe und ihre zugehörigen Kennwerte aus Herstellerangaben sind in Anhang B ersichtlich.

Die Holzständer aus Fichte, welche für den Holzrahmenleichtbau notwendig sind, werden nicht betrachtet. Es wird angenommen, dass die dazwischen liegende Holzfaserdämmung (weich) hygroskopisch aktiver ist. Die höhere Aktivität und der höhere Mengenanteil an Holzfaserdämmung (weich) lässt die Annahme zu, dass diese das Feuchteverhalten des gesamten Bauteils dominiert.

Brettsperrholz-Wandaufbauten

BSP 01

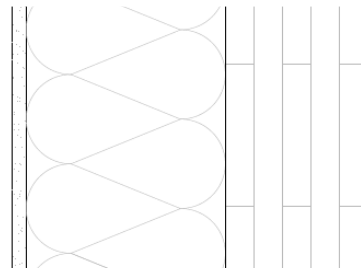


Außenputz, 10 mm

Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

Brettsperrholz, 100 mm

BSP 02



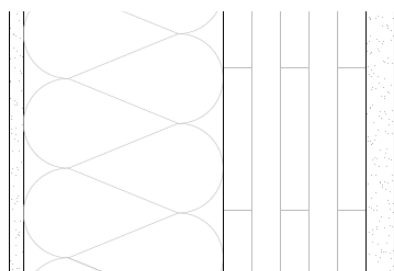
Außenputz, 10 mm

Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

Brettsperrholz, 100 mm

Lasur

BSP 03



Außenputz, 10 mm

Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

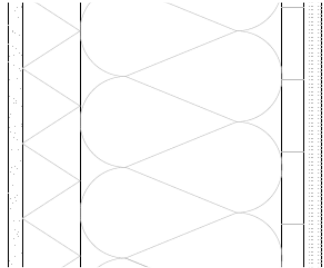
Brettsperrholz, 100 mm

Lehmputz, 20 mm

Abb. 17 - Betrachtete Brettsperrholz-Wandaufbauten

Holzrahmenleichtbau-Wandaufbauten

HRLB 01



Außenputz, 10 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 40 mm

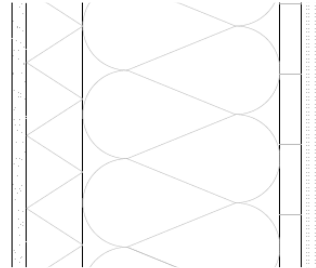
Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

OSB-Platte, 15 mm

Gipskartonplatte 12,5 mm

Dispersionsfarbe

HRLB 02



Außenputz, 10 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 40 mm

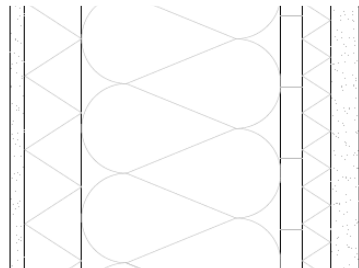
Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

OSB-Platte, 15 mm

Gipskartonplatte 12,5 mm

Kalkfarbe

HRLB 03



Außenputz, 10 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 40 mm

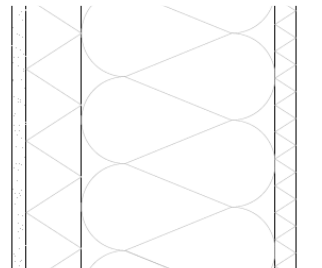
Holzfaserdämmung (weich) 140 mm

OSB-Platte, 15 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 20 mm

Lehmputz, 20 mm

HRLB 05



Außenputz 10 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 40 mm

Holzfaserdämmung (weich), 140 mm

Holzfaser-Putzträgerplatte, 15 mm

Lehmbauplatte, 22 mm

Lehm-Designputz

Abb. 18 - Betachtete Holzrahmenleichtbau-Wandaufbauten

Stampflehm-Wandaufbau

SLW



Außenputz, 10 mm

Holzfaserdämmung (weich), 160 mm

Stampflehm, 150 mm

Abb. 19 - Betrachteter Stampflehm-Wandaufbau

6.2 Abbildung von Brettsperrholz in numerischen Berechnungen

Carstensen [67] und Henschen [68] beschreiben in ihren Masterarbeiten jeweils ein Verfahren zur Abbildung von Brettsperrholz in Simulationen. Zusätzlich ist die Abbildung durch einen anderen Holzwerkstoff denkbar. Daraus ergeben sich die drei in Abb. 20 ersichtlichen Varianten.

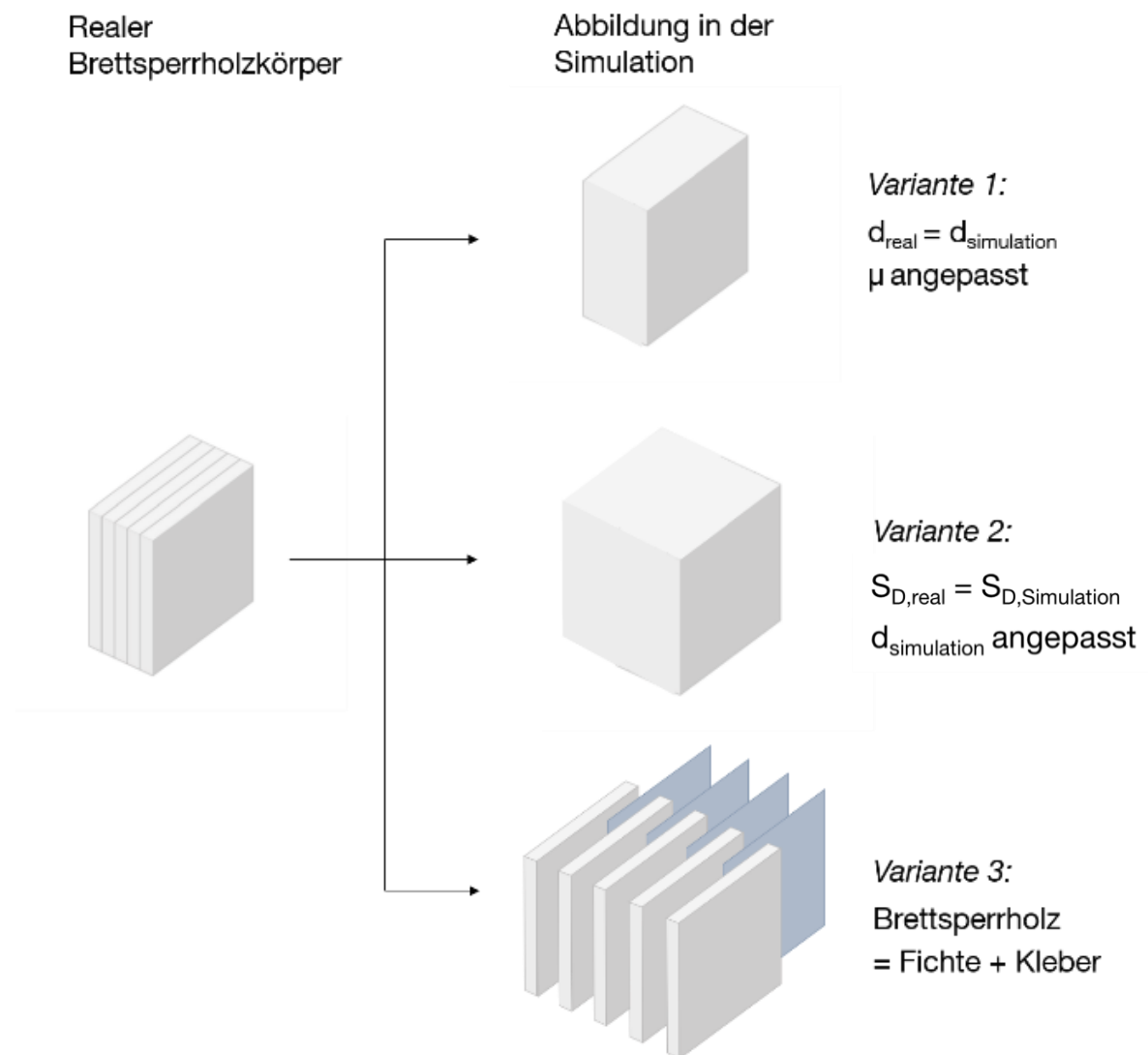


Abb. 20 - Eingabe von Brettsperrholz in ein Simulationsprogramm

Bei Variante 1 erfolgt die Abbildung mittels eines bekannten Holzwerkstoff. Durch das Anpassen der Kennwerte mit Hilfe von Herstellerangaben wird die Abbildung optimiert. Die zur numerischen Berechnung verwendete Bauteildicke $d_{\text{simulation}}$ [mm] entspricht der realen Bauteildicke d_{real} [mm].

Variante 2 beschreibt das Brettsperrholzelement als Baustoff mit den Kennwerten eines Vollholzes. Der zusätzliche Wasserdampfdiffusionswiderstand infolge des Klebers wird durch eine angepasste Baustoffdicke d [mm] berücksichtigt. Ziel ist es die gleiche wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke S_D für die zusätzliche Baustoffdicke und den realen Kleber (Wasserdampfdiffusionswiderstand nach Herstellerangaben) zu bekommen.

$$S_D = \mu_{\text{simulation,Vollholz}} \cdot d_{\text{simulation,Kleber}} = \mu_{\text{Herstellerangaben,Kleber}} \cdot d_{\text{real,Kleber}}$$

$$d_{\text{Simulation,Kleber}} = \frac{\mu_{\text{Herstellerangaben,Kleber}} \cdot d_{\text{real,Kleber}}}{\mu_{\text{simulation}}}$$

$$d_{\text{simulation}} = d_{\text{Brettsperrholz}} + d_{\text{simulation,Kleber}}$$

Formel 16 - Herleitung der Bauteildicke $d_{\text{simulation}}$ [mm]

Variante 3 unterteilt das abzubildende Brettsperrholzelement in die verleimten Schichten aus Fichte. Die Holzelemente lassen sich mit den aus Datenbanken bekannten Kennwerten für Fichte aus bekannten Datensätzen beschreiben. Der Kleber, der die einzelnen Fichteschichten miteinander verbindet, wird ersatzweise als PU-Schicht betrachtet. Die Schichtdicke d [mm] der PU-Schicht ist so angepasst, dass der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-] dem vom Kleber entspricht (Berechnung analog zu Formel 16).

6.3 Durchs Innenraumklima beeinflusste Baustoffe

Das Innenraumklima beeinflusst nicht alle Schichten der in Abb. 17 - Abb. 19 genannten Bauteile gleich. Die Annahme, dass der Einfluss auf die oberflächennahen Materialschichten größer ist als in tieferliegenden Materialien, lässt sich mittels der Simulation der Wärme- und Feuchteverhältnisse im Bauteil überprüfen. Dies wird nachfolgend dargestellt. Grundlage bildet der Jahresverlauf des Klimas in Holzkirchen (Standort des Fraunhofer IBP) und das daraus unter Beachtung der DIN 4108-3 [6] resultierende Innenraumklima. Dieses Modell ist nicht umfassend, sondern wird von den lokalen Klimaverhältnissen modifiziert. Es kann davon ausgegangen werden, dass es Mitteleuropäische Verhältnisse ausreichend definiert.

Für den jeweilige Bauteilaufbau werden die in WUFI hinterlegten Materialdatensätze mit Herstellerangaben ergänzt oder berichtigt. Die verwendeten Materialdaten sind in Anhang B.4 ersichtlich. Eine Ausnahme stellt das Brettsperrholz dar. Für diesen Baustoff sind keine Materialdatensätze in den gängigen Datenbanken verfügbar. Die Herleitung brauchbarer Kennwerte wird in Kapitel 6.2 erläutert. Von den dort dargestellten Varianten, erwies sich die 3. als die geeignetste.

Das Simulationsprogramm erlaubt die Ausgabe in verschiedenen Zeittakten. Für die Betrachtung der Schwankungen innerhalb eines Tages ist eine stündliche Ausgabe sinnvoll. Deshalb wird diese als Ausgabebetakt gewählt und daraus andere Zeittakte auf Tag und Monate gemittelt.

Die gemittelten Monatswerte der relativen Feuchte in den Bauteilen in Abb. 21 und Abb. 22 zeigen die jahreszeitlich bedingten Schwankungen. Der Bereich zwischen dem Schnittpunkt der monatlichen Schwankung der einzelnen Feuchteverlaufslinie und der Innenoberfläche wird als Einflusstiefe des Innenraumklimas interpretiert. Alle Baustoffe, die mit einem beträchtlichen Anteil in diesem Bereich liegen, werden weiter untersucht.

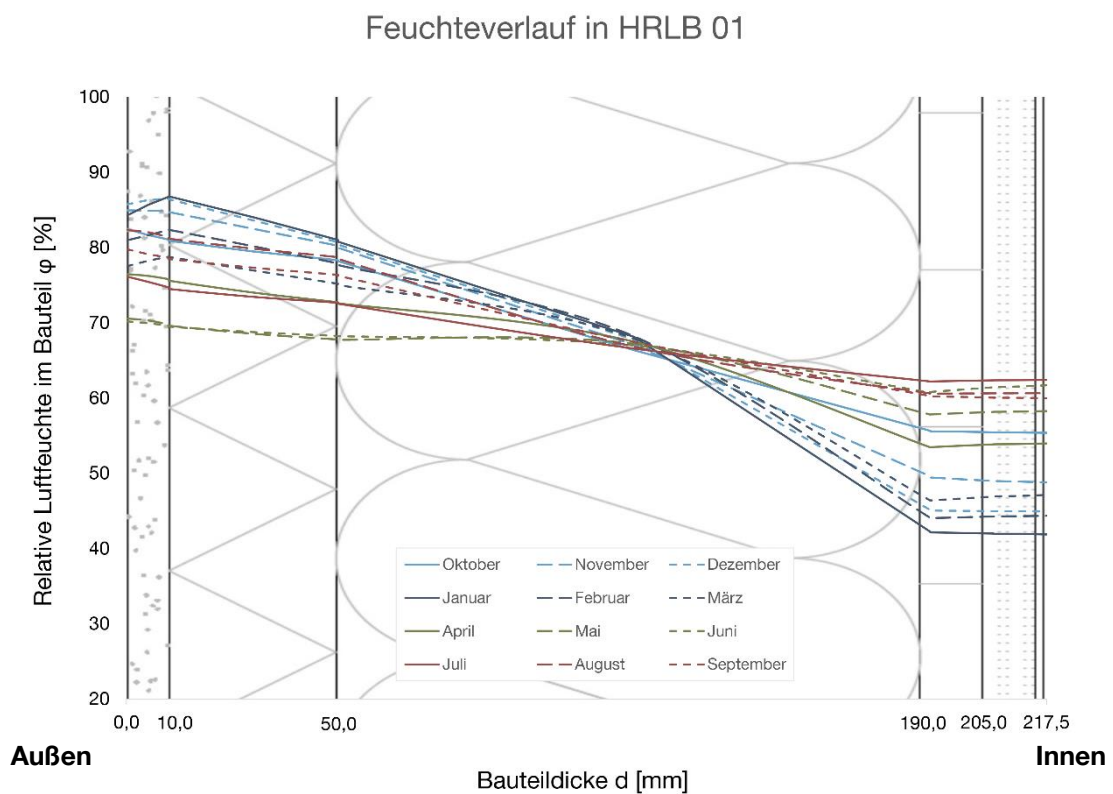


Abb. 21 - relative Luftfeuchte im Bauteil, monatlich gemittelt

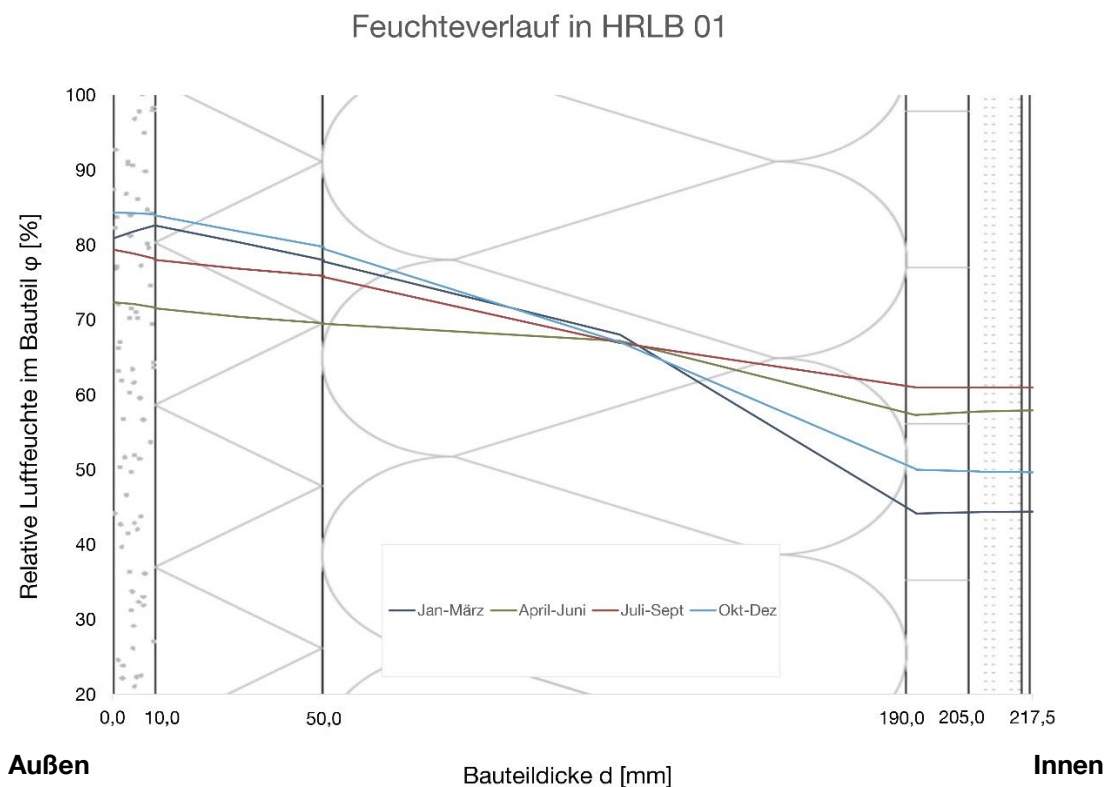


Abb. 22 - relative Luftfeuchte im Bauteil, gemittelt über drei Monate

Gegenüberstellung von einzelnen Tagen und Tageszeiten in einem Monat, ermöglichen die Abschätzung der kurzzeitigeren Schwankungen. Die in Abb. 23 bis Abb. 25 betrachteten Tages- und Tageszeitverläufe zeigt keine gravierende Abweichung von der oben beschriebenen Eindringtiefe und beeinflusst so die Auswahl der Baustoffe nicht.

Die Tages-, Monats- und Jahresschwankungen der relativen Luftfeuchte im Bauteil weiterer untersuchten Wandaufbauten sind in Anhang E ersichtlich.

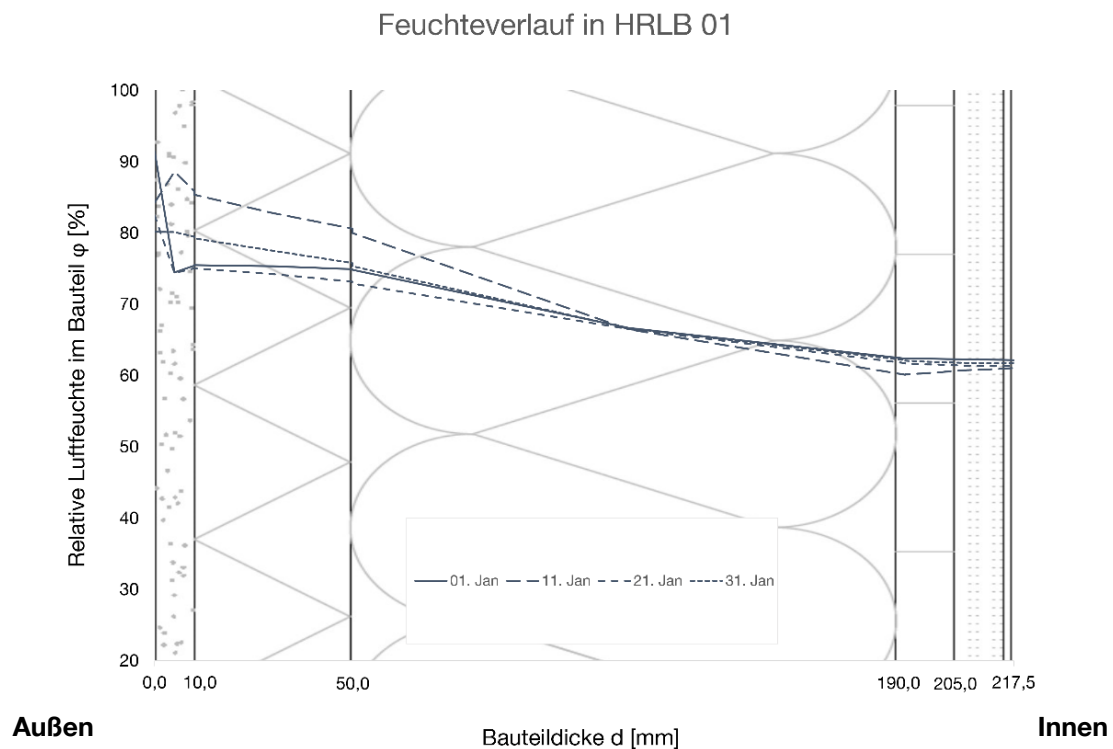


Abb. 23 - relative Luftfeuchte im Bauteil, Januar

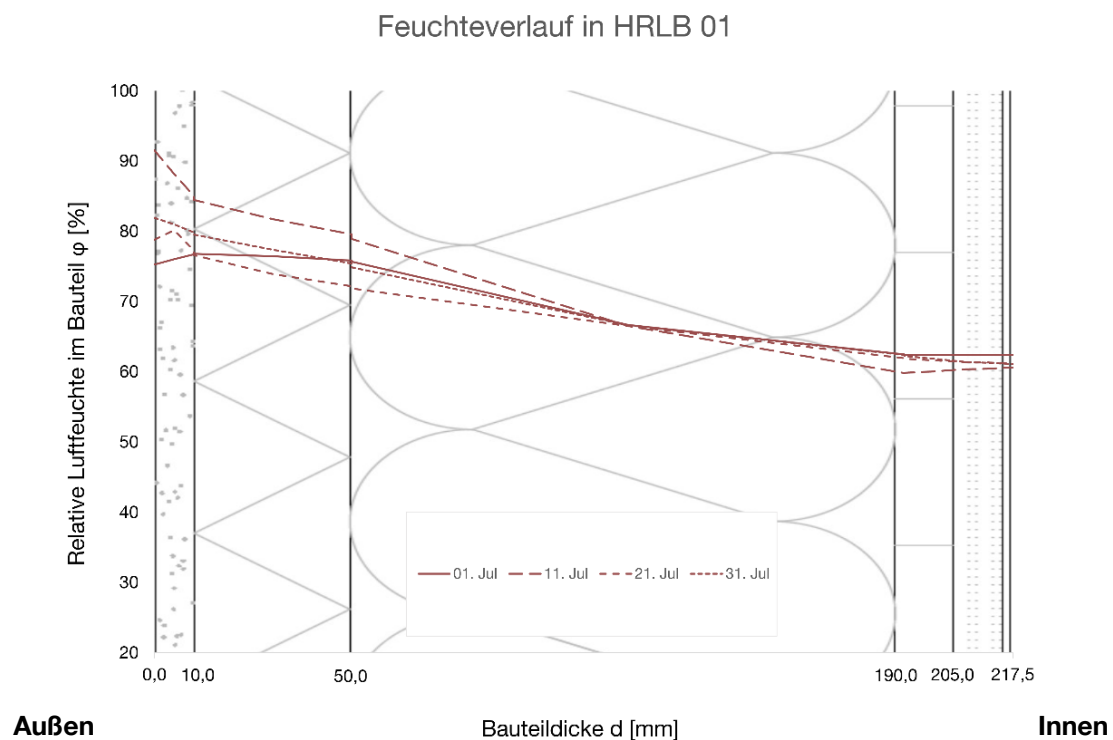


Abb. 24 - relative Luftfeuchte im Bauteil, Juli

Feuchteverlauf in HRLB 01

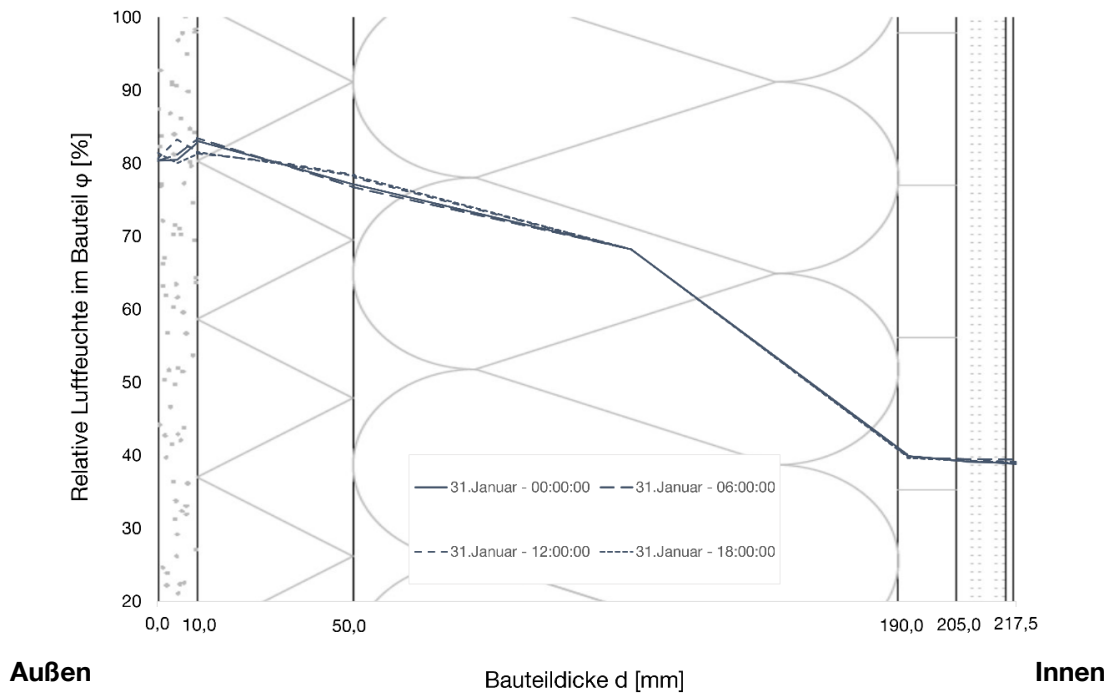


Abb. 26 - relative Luftfeuchte im Bauteil, 31. Januar

Feuchteverlauf in HRLB 01

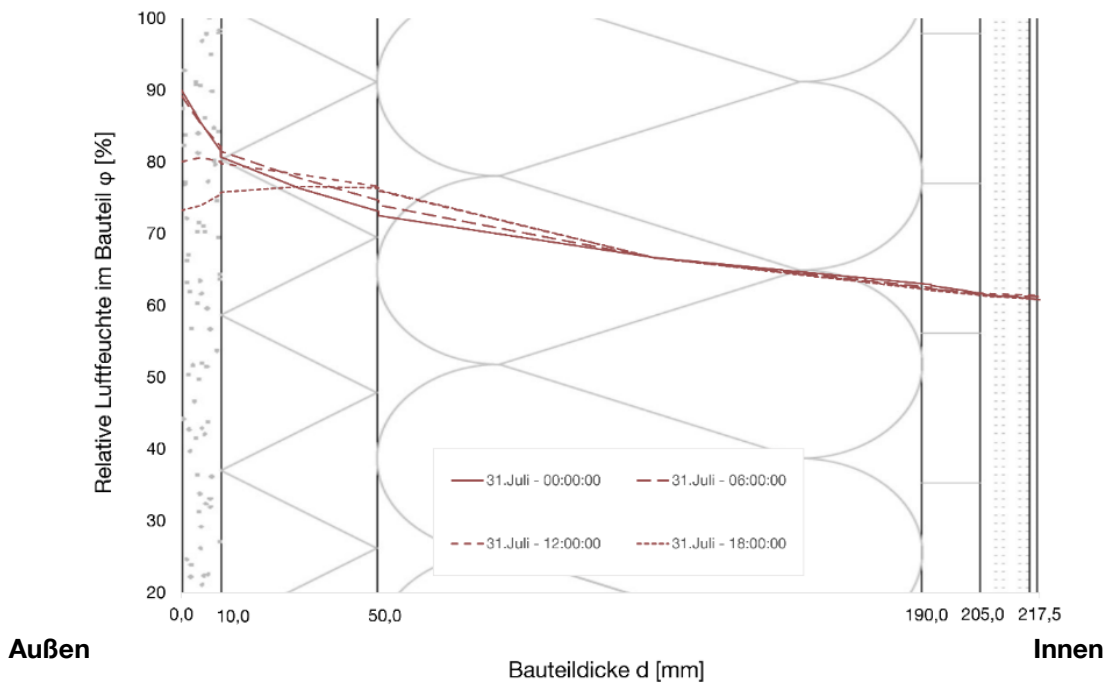


Abb. 25 -relative Luftfeuchte im Bauteil, 31. Juli

Die in Kapitel 6.3 beschriebenen Schwankungen ermöglichen einen ersten Rückschluss auf die Feuchteverhältnisse innerhalb eines Bauteils. Die visuelle Analyse bestätigt die Annahme, dass die Feuchteschwankungen insbesondere die oberflächennahen Baustoffe beeinflussen.

Die weitere Arbeit betrachtet, basierend auf den Simulationsergebnissen und der qualitativen Analyse, die in Tabelle 6 aufgeführten drei Baustoffgruppen mit insgesamt elf Baustoffen.

Holzwerkstoffe	Brettsperrholz fünflagig Brettsperrholz fünflagig mit einseitiger Lasur Holzfaser-Putzträgerplatte Holzfaserdämmung (weich)
Gipswerkstoffe	Gipskartonplatte Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe
Lehmwerkstoffe	Lehmbauplatte Lehmbauplatte mit Lehm-Designputz Lehmputzaufbau mit Lehm-Designputz Stampflehm

Tabelle 6 - Untersuchte Baustoffe

Die OSB-Platte liegt ebenfalls im definierten Einflussbereich des Innenraumklimas, da es bereits vertiefte Untersuchungen zur OSB-Platte vorhanden sind [69], wird diese in den nachfolgenden Messungen nicht betrachtet.

6.4 Zeitabhängige Adsorption und Desorption in den Baustoffen

Durch die in Kapitel 2.2.3 beschriebene Methodik entsteht eine Kurve, die schnell einen Überblick über die Ad- und Desorptionsverhältnisse im Material verschafft. Es lassen sich die Verhältnisse zwischen der für Adsorption und Desorption verwendete Zeit auslesen. Zusätzlich kann eine erste Annahme bezüglich der allgemeinen Form der Ad- und Desorption gemacht werden. Wie Abb. 27 und Abb. 28 beispielhaft für eine Gipskartonplatte zeigen, ist das Verhältnis zwischen Wasserdampfaufnahme und Wasserdampfabgabe nicht gleichförmig. Die Gipskartonplatte nimmt rund 57 % der Stunden im Jahr Wasser auf und gibt rund 43 % der Stunden im Jahr Wasser ab (Lage des **roten** Punkts nicht mittig). Je nach Baustoff und Bauteilaufbau variieren diese Werte, erreichen jedoch maximal ein Verhältnis von 64 % zu 36 % (Holzfaserdämmung (weich) im Stampflehmwandaufbau). Die Verläufe aller Baustoffe und Bauteile befinden sich in Anhang F.

Gipskartonplatte	Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	5005	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:	57%	[h]
		Stunden mit Wasserabgabe:	3754	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:	43%	[h]
	Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde	Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	12,32	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-5,13	[kg/m ²]
	Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material	Maximale Feuchte im Material:	71,95	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	16.12.21 19:00	
		Minimale Feuchte im Material:	28,52	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	15.6.22 17:00	
	Wassermenge	Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	1451,59	[kg/m ² a]

Abb. 27 - Analyse der jährlichen Ad- und Desorption einer Gipskartonplatte

Zusätzlich zeigt die Abb. 28, dass ein Großteil der über den gesamten Jahreszyklus aufgenommen und abgegebenen Wassermenge in verhältnismäßig geringer Zeit stattfindet. Die **grüne** Linie zeigt beispielhaft, dass ungefähr 70% der Wasserdampf-abgabe in rund 1200 Stunden stattfindet. Das bedeutet, dass 70 % der Wasserdampf-abgabe in 30 % der jährlichen Stunden, die insgesamt für Wasserdampf-abgabe benötigt werden (3754 h), erfolgt.

Diese Beobachtung zeigt sich in ähnlicher Form bei allen untersuchten Baustoffen und Bauteilen. Besonders stark jedoch bei den Baustoffen, die an der Innen- und Außenoberfläche des Bauteils liegen.

Folglich tragen kurzzeitige große Feuchtesprünge einen wesentlichen Teil zur Gesamtwasseraufnahme bei. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zusätzlich zu den in Kapitel 5.7 beschriebenen Kennwerten auch kurzzeitige auftretende Phänomene zu betrachten. Eine Möglichkeit bieten die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit, welche einen einmaligen Feuchtesprung darstellt und die Bestimmung des Feuchtepufferwerts, der einen zyklischen Tagesverlauf beschreibt.

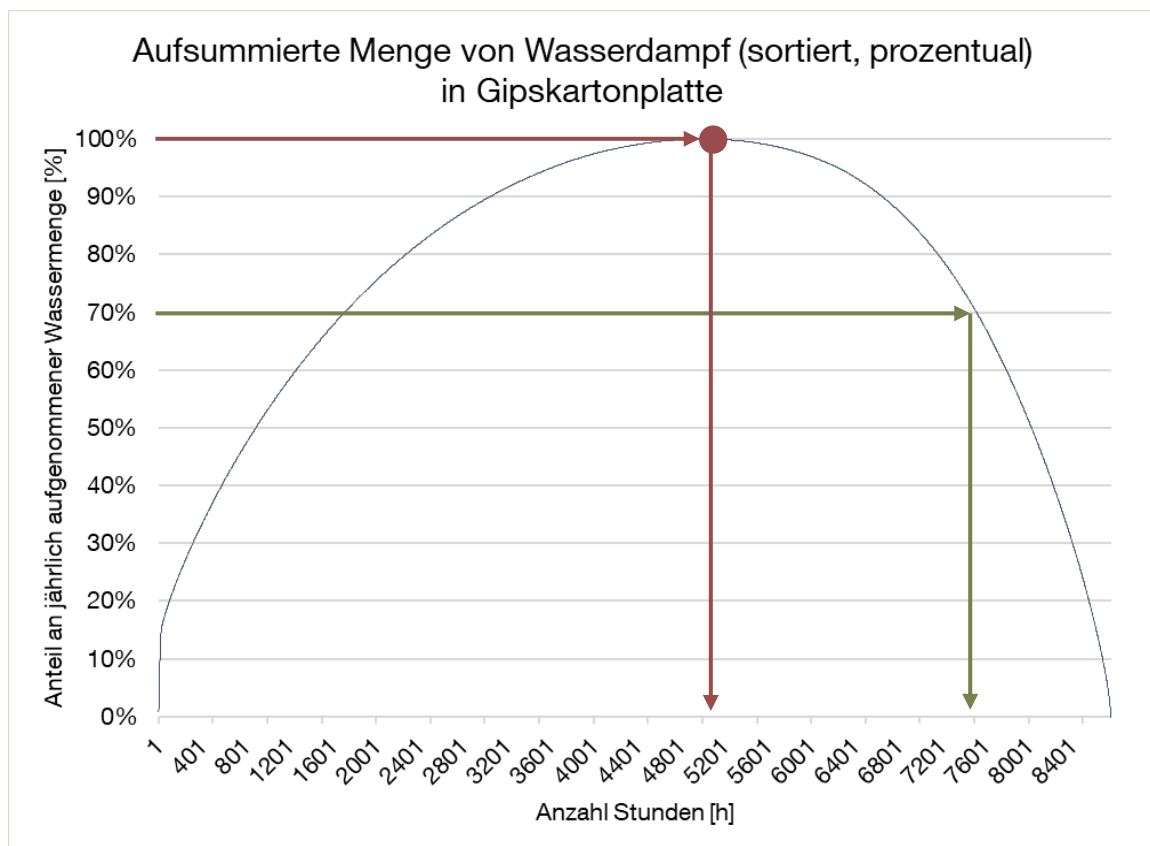


Abb. 28 – Aufsummierte Wassermenge im Verhältnis zur jährlich aufgenommenen Wassermenge

7 Vorbereitungen zur Messung

7.1 Messaufbau

7.1.1 Räumlichkeiten

Für die Messungen steht ein klimatisierter Raum im Materialprüfungsamt der TU München zur Verfügung. Die optimalen Raumbedingungen zur Vorkonditionierung aller Proben liegen laut DIN 12571 [70] bei 23 ± 3 °C Raumtemperatur und 50 ± 5 % relative Luftfeuchte. Aus nicht beeinflussbaren, technischen Gründen herrschen eine mittlere Raumtemperatur von 20 °C und eine relative Luftfeuchte von 60 % vor. Regelmäßige Überprüfung der genannten Bedingungen ergeben Abweichungen bei der Temperatur in Höhe von 19 °C bis 25 °C und bei der relativen Luftfeuchte von 55 % bis 69 %. Die Bedingungen der DIN 12571 sind in einigen Fällen nicht einhaltbar.

Für die Messung der dynamischen Sorption wird auf den Klimaofen in der Meyer-Jens-Halle ausgewichen, da die vorgeschriebenen Abmessungen der Probekörper nicht in die bei den übrigen Messungen verwandten Klimaboxen passen (siehe Kapitel 7.1.3). Der Zugang zur Meyer-Jens-Halle ist nur beschränkt möglich. Dies hat zur Folge, dass ein Messpunkt zur Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit nicht messbar ist.

7.1.2 Klimaboxen

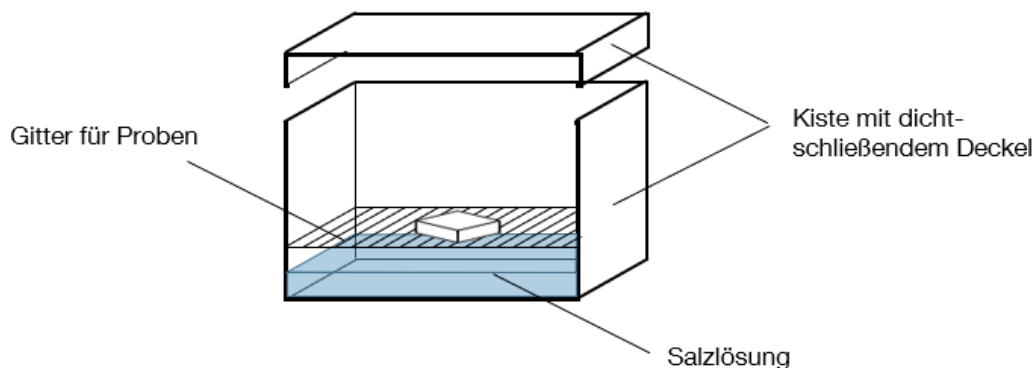


Abb. 29 - Messaufbau

Die Basis für die Messung der Sorptionsisotherme und die Feuchtepufferwirkung bilden sieben mit einem Deckel verschließbare Kunststoffboxen auf 50 cm x 50 cm x 70 cm. Als Auflagefläche für die Proben dienen Roste aus Kunststoff oder Metall die einen Abstand von ungefähr 10 cm vom Boxenboden herstellen. Die erforderlichen relativen Luftfeuchten stellen sich durch die Zugabe der nach DIN 12571 definierten Salzlösungen ein, die zugehörigen Salzlösungen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Die gewünschte relative Luftfeuchte stellt sich bei vollständiger Sättigung der Lösung ein. Die Wassertemperatur ist aufgrund der schwankenden Raumtemperatur nicht konstant. Es erweist sich als praktikabler, der Mischung solange Salz bei zu mischen, bis sich die Sättigung einstellt, als die genauen Salzmenngen abzumessen. Das Einstellen der Sättigung zeigt sich durch das Auftreten von ungelöstem Salz. Eine leichte Untersättigung infolge des Temperaturanstiegs ist möglich. Regelmäßige Überprüfungen der Messbedingungen ergeben relativen Luftfeuchten die innerhalb der zulässigen $\pm 5\%$ Luftfeuchteteranzen liegen. Nach DIN 12571 sind drei bis fünf Zentimeter Pegelhöhe für die Salzlösung notwendig. Dies garantiert, dass sich die geforderten relativen Luftfeuchten einstellen und die Probestücke einen genügenden Abstand zur Salzlösung aufweisen. Abb. 29 zeigt den schematischen Messaufbau und Abb. 30 die Messeinrichtung.

relative Luftfeuchte	Formel	Gesättigte Lösung
33 \pm 5 %	MgCl ₂ * 6 H ₂ O	Magnesiumchlorid
43 \pm 5 %	K ₂ CO ₃	Kaliumcarbonat
60 \pm 5 %	*)	
75 \pm 5 %	NaCl	Natriumchlorid
80 \pm 5 %	KBr	Kaliumbromid
85 \pm 5 %	KCl	Kaliumchlorid
93 \pm 5 %	KNO ₃	Kaliumnitrat
99 \pm 5 %	destilliertes Wasser	
*) Herrschendes Raumklima, keine Klimabox mit Salzlösung notwendig		

Tabelle 7 - Salze zur Herstellung der relativen Luftfeuchten



Abb. 30 – Messeinrichtung Klimaboxen

7.1.3 Probenherstellung

Die zu prüfenden Baustoffe sind in Tabelle 6 definiert. Die Baustoffe liegen in unterschiedlichen Ausgangsformen vor. Die in Plattenform vorliegenden Holzwerkstoffe können leicht in das gewünschte Format zugeschnitten werden. Sie werden vom Hallen-Personal nach Anweisungen zugeschnitten. Die Holzlasur wird selbstständig entsprechend der Herstelleranleitung aufgebracht.

Die Gipswerkstoffe liegen ebenfalls in Plattenform vor. Sie können selbsttätig mit einem Cuttermesser händisch zugeschnitten werden. Die Lehm- und Lehm-Designputz liefert der Hersteller in den gewünschten Formaten. Den Stampflehm liefert der Hersteller in regelmäßigen sechseckigen Formaten von 10 cm Seitenlänge. Die sich aus der Struktur ergebende mangelnde Schnittfestigkeit lässt keinen Zuschnitt zu.

Der Lehmputzaufbau wird selbst hergestellt. Anhang C.1 zeigt den Herstellungsprozess. Die Grundbaustoffe liefert der Hersteller. Im Folgenden wird der Aufbau des Baustoffes genauer erläutert. Der Lehmunterputz entsteht in einer Schalung in einer Höhe von 15 Millimeter. Zur Stabilisierung sind zwei gitterförmige Glasfaserarmierungen eingebracht. Auf dem getrockneten Unterputz wird einseitig der circa drei Millimeter dicke Lehmoberputz freihändig aufgetragen. In diesem Produktionsstadium geht der Baustoff zum Hersteller, der dort den Designputz aufträgt und die Formate zuschneidet.

Die Formate ergeben sich abhängig von der geplanten Messung und den entsprechenden DIN-Vorgaben. Aus technischen Gründen gibt es vielfältige Abweichungen davon. Aufgrund der besseren Ausnutzung des rechteckigen Formats der Klimaboxen bieten

sich in allen Fällen auch rechteckige Formate der Baustoffproben an. Dies kann, wie bereits erwähnt, beim Stampflehm nicht eingehalten werden. Die Probedicken ergeben sich aus den gelieferten Grundformaten. In einzelnen Fällen ist es möglich diese zu reduzieren, wenn sich im gesamten Material eine konstante Feuchte einstellt. Bilder der Proben finden sich in Anhang C.2 und Anhang C.3.

Formate für die Messung der Sorptionsisotherme

Die Probenoberfläche orientiert sich an der DIN 12571 und beschreibt die größte Fläche des Formates. Bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme entspricht dies quadratischen Oberflächen. Die DIN 12571 schreibt mindestens drei Probestücke vor. Die Messung umfasst jeweils vier Probestücke eines Baustoffes, um zusätzliche Sicherheit zu gewinnen. Die Anzahl der Stampflehmproben weicht aufgrund des größeren Formates und dem beschränkten Platzangebot in der Klimabox ab. Die Probendicke der Holzfaserdämmung und der Brettsperrholzproben sind angepasst, um die Zeit bis zur Ausgleichsfeuchte zu verringern. Die minimale Probendicke ist beschränkt durch die technischen Möglichkeiten und der, in der DIN 12571 vorgegebenen Mindestmaße von 10 g [70].

Die Probekörper und ihre Formate sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Eigene Proben-Nr.	Material	Oberfläche [m²]	Probendicke [mm]	Exponierte Seiten	Probenanzahl [Stk.]
S-1	Gipskartonplatte	0,01	12,5	alle	4
S-2	Holzfaser- Putzträgerplatte	0,01	20	alle	4
S-3	Holzfaserdämmplatte, weich	0,01	40	alle	4
S-4	Lehmputz- aufbau	0,01	19	alle	4
S-5	Lehmbau- platte	0,01	20	alle*	4
S-9	Brettsperrholz	0,03	10	alle	4
S-11	Stampflehm	0,03	40	alle	3

Tabelle 8 - Formate für Sorptionsisotherme

Formate für die Messung der freien Wasseraufnahme

Die Proben liegen mit der exponierten Fläche im Wasser. Die Probenoberfläche orientiert sich an der DIN EN ISO 15148, die eine Fläche von 0,01 m² vorschlägt. Es handelt sich um quadratische Formate. Stampflehm lässt dies aus bekannten Gründen nicht zu. Die Flächen, die ins Wasser ragen und kein Wasser aufnehmen sollen, sind mit einem Klebeband versiegelt, welches einen S_D-Wert von 28 m aufweist [71] (Abb. 31).



Abb. 31 - Holzfaserdämmung (weich) mit durch Klebeband versiegelten Seiten

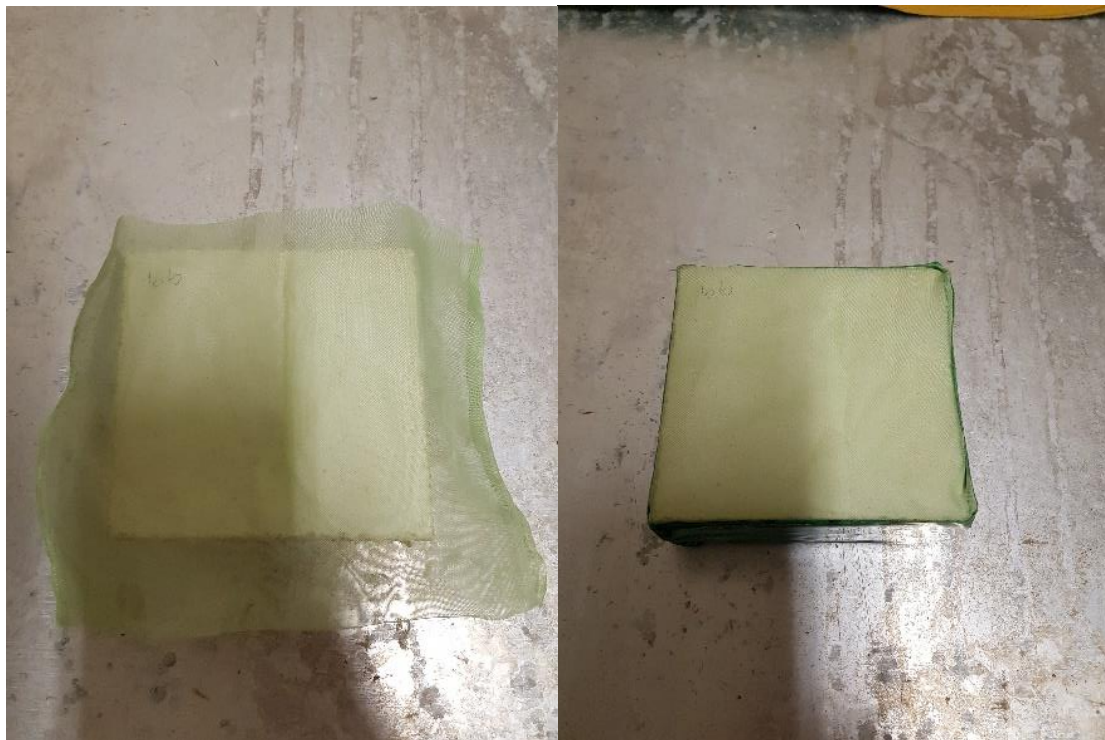


Abb. 32 - Lehmplatte mit Designputz-Probe mit aufgebrachtem textilem Stabilisierungsmaterial

Eine vollständige Versiegelung ist nur bei absolut glattem Material möglich. Ein unkontrollierter Wasserzutritt an den Rändern ist durch die Unebenheiten der Materialien nicht zu verhindern. Erste Messungen zeigen bei den Lehmwerkstoffen, dass sich durch den Wasserkontakt feinkörniges Material auslöst. Um diesem Effekt entgegen zu wirken wird die exponierte Fläche mit einem dünnen, feingewobenen aber gänzlich durchlässigen Material abgedeckt. Der überständige Saum wird zur Befestigung unter das Klebeband geschlagen (siehe Abb. 32). Die Masse des Klebebandes als auch die des textilen Stabilisierungsmaterials sind bestimmt und von der jeweiligen Massen der Probekörper abzuziehen [33].

Die Probekörper und ihre Formate sind in Tabelle 9 ersichtlich.

Eigene Proben-Nr.	Material	Oberfläche [m ²]	Proben-dicke [mm]	Exponierte Seiten	Proben-anzahl [Stk.]
F-1	Gipskartonplatte	0,01	12,5	alle	4
F-2	Holzfaser- Putzträgerplatte	0,01	20	alle	4
F-3	Holzfaserdämmplatte, weich	0,01	40	alle	4
F-4	Lehmbauplatte	0,01	22	alle	4
F-5	Lehmputzaufbau	0,01	19	alle	4
F-6	Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz	0,01	25	alle	4
F-7	Gipskartonplatte mit Kalkfarbe	0,01	12,5	alle	4
F-8	Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe	0,01	12,5	alle	4
F-9	Brettsperrholz	0,01	100	alle	4
F-10	Brettsperrholz mit Lasur	0,01	100	alle	4
F-11	Stampflehm	0,03	40	alle	3

Tabelle 9 - Formate für die Messung der freien Wasseraufnahme

Formate für die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit

Die DIN 18947 – Anhang A [72] sieht eine exponierte Fläche von 0,1 m² vor. Vereinzelt Baustoffe, wie beispielsweise die Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe, sind nur begrenzt verfügbar. Deshalb wird die exponierte Fläche für alle Baustoffe auf 0,09 m² reduziert, um die verfügbaren Baustoffe optimal auszunutzen. Es handelt sich um rechteckige Formate. Stampflehm lässt dies aus den genannten Gründen nicht zu. Es ergibt sich so eine markante, aber unvermeidliche Abweichung von der DIN 18947. Alle nicht exponierten Flächen sind mit einem Klebeband und einer dampfbremsenden Folie, welche jeweils einen S_D-Wert von mindestens 28 Meter aufweisen [71, 73], versiegelt (siehe Abb. 33). Die Massen des Klebebands und der Folie sind bestimmt und von den Massen der Probekörper abzuziehen.



Abb. 33 - Versiegelte Brettsperrholzproben für die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit

Die Probekörper und ihre Formate sind in Tabelle 10 ersichtlich.

Eigene Proben-Nr.	Material	Oberfläche [m ²]	Proben- dicke [mm]	Exponierte Seiten	Probenanzahl [Stk.]
D-1	Gipskartonplatte	0,09	12,5	1	4
D-2	Holzfaser- Putzträgerplatte	0,09	100	1	4
D-3	Holzfaser- dämmplatte, weich	0,09	20	1	4
D-4	Lehmputz- aufbau	0,09	19	1	4
D-5	Lehmbau- platte	0,09	22	1	4
D-6	Lehmputz- aufbau mit Designputz	0,09	25	1	4
D-7	Gipskarton- platte mit Kalkfarbe	0,09	12,5	1	4
D-8	Gipskarton- platte mit Dispersionsfarbe	0,09	12,5	1	4
D-9	Brettsperr- holz	0,09	100	1	4
D-10	Brettsperr- holz mit Lasur	0,09	100	1	4
D-11	Stampflehm	0,03	40	1	4

Tabelle 10 - Formate für die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit

Formate für die Messung der Feuchtepufferwirkung

Die Probenoberflächen orientieren sich am Nordtest Protocol [34] und beziehen sich auf die exponierte Fläche. Das Nordtest Protocol schlägt eine Fläche von $0,01 \text{ m}^2$ vor. Es handelt sich um quadratische Formate. Stampflehm lässt dies aus genannten Gründen nicht zu. Die nicht exponierten Flächen sind mit einem Klebeband, welches einen S_D -Wert von 28 Meter aufweist, versiegelt (Siehe Abb. 34). Alle Probekörper und Abmessungen sind in Tabelle 11 aufgeführt.



Abb. 34 - seitlich versiegelte Gipskartonprobe mit Kalkfarbe für Feuchtepuffermessung

Eigene Proben-Nr.	Material	Oberfläche [m²]	Proben- dicke [mm]	Exponierte Seiten	Proben- anzahl [Stk.]
MBV-1	Gipskartonplatte	0,01	12,5	alle	4
MBV-4	Lehmbauplatte	0,01	22	alle	4
MBV-5	Lehmputzaufbau	0,01	19	alle	4
MBV-6	Lehmbauplatte mit Designputz	0,01	25	alle	4
MBV-7	Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe	0,01	12,5	alle	4
MBV-8	Gipskartonplatte mit Kalkfarbe	0,01	12,5	alle	4
MBV-9	Brettsperrholz	0,01	100	alle	4
MBV-10	Brettsperrholz mit Lasur	0,01	100	alle	4
MBV-11	Stampflehm	0,03	40	alle	3

Tabelle 11 – Formate für die Messung der Feuchtepufferwirkung

7.1.4 Messgeräte und ihre Genauigkeiten

Feuchte- und Temperaturmessung

Die relativen Luftfeuchten in den Boxen sind konstant zu halten und regelmäßig zu überprüfen. Die Überprüfung erfolgt mit dem Hygrofox von Scantronik. Das Gerät zeigt die aktuell herrschende relative Luftfeuchte mit einer Messgenauigkeit von $\pm 4\%$ (bei 30 % bis 80 % relative Luftfeuchte und 25 °C) und die Temperatur mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1\text{ °C}$ in den Klimaboxen an [74]. Da nur beschränkt Geräte vorhanden sind, sind die meisten Geräte nicht fix angebracht, wie in Abb. 35, sondern lagern zusammen mit den Proben in den Boxen. Dies bedeutet, dass für das Ablesen des Gerätes das Öffnen der Box notwendig ist. Um den Einfluss des Raumklimas auf das Klima in der Box zu minimieren, erfolgte das Ablesen synchron zur Messwertermittlung.



Abb. 35 - Fix installiertes Feuchte- und Temperaturmessgerät

Das Messverhalten der Hygrofox-Geräte ist träge. Abb. 36 zeigt die Messwerte von vier Hygrofox-Geräten nach 12 Stunden, die zum gleichen Zeitpunkt einem Klima von 69 % relativer Luftfeuchte ausgesetzt wurden. Es dauert bis zu 48 Stunden, bis alle Geräte annähernd den gleichen Messwert zeigen. Es stehen keine anderen Geräte zur Verfügung. Zur Sicherheit bleiben die Geräte bis zu drei Tage in der jeweiligen Klimabox. Dies führt zu einer Einschränkung der Messkapazität pro Zeiteinheit.



Abb. 36 - Abweichungen der Messgeräte

Waage

Alle zu ermittelnden Messwerte basieren auf der Feststellung der Masseänderung. Dies setzt voraus, dass eine genügend genau Waage zur Verfügung steht. Im Messraum selbst befindet sich keine Waage, die nächst gelegene Waage befindet sich rund eine Gehminute entfernt. Ihre Messgenauigkeit ist $\pm 0,01$ Gramm (Abb. 37).



Abb. 37 - Waage

7.2 Messungenaugigkeiten

7.2.1 Zulässige Schwankungen von Temperatur und Feuchte

Um die Einflüsse von wechselnden Temperaturen und relativen Luftfeuchte abzuschätzen, ist für eine weiche Holzfaserdämmung der Verlauf der Wassergehalte im Baustoff nach einem Feuchtesprung von 50 % auf 80 % relative Luftfeuchte simuliert. Die Verläufe sind in Abhängigkeit von der DIN 18947 erlaubten Grenzwerten, ± 5 % relative Luftfeuchte und ± 3 °C, numerisch ermittelt.

Die Abb. 38 zeigt die Wassergehalte bei maximal und minimal zulässiger Temperatur. Die Varianz der Temperatur hat nur geringen Einfluss auf den Wassergehalt im Baustoff. Die Abb. 39 zeigt einen wesentlich deutlicheren Einfluss des maximal und minimal erlaubten Sprungs innerhalb der relativen Luftfeuchtetoleranzen. Abb. 40 zeigt die ungünstigsten Kombinationen von zulässigen Temperaturen und relativen Luftfeuchten. Es ist bemerkenswert, wie stark dadurch die Wasseraufnahme nach 12 h variiert.

Im Hinblick auf die eigene Messanordnung ist nur die Temperaturamplitude relevant, da die relative Luftfeuchte in den Klimaboxen unabhängig von den Schwankungen des Raumklimas ist. Die Salzlösungen gewährleisten eine konstante relative Luftfeuchte.

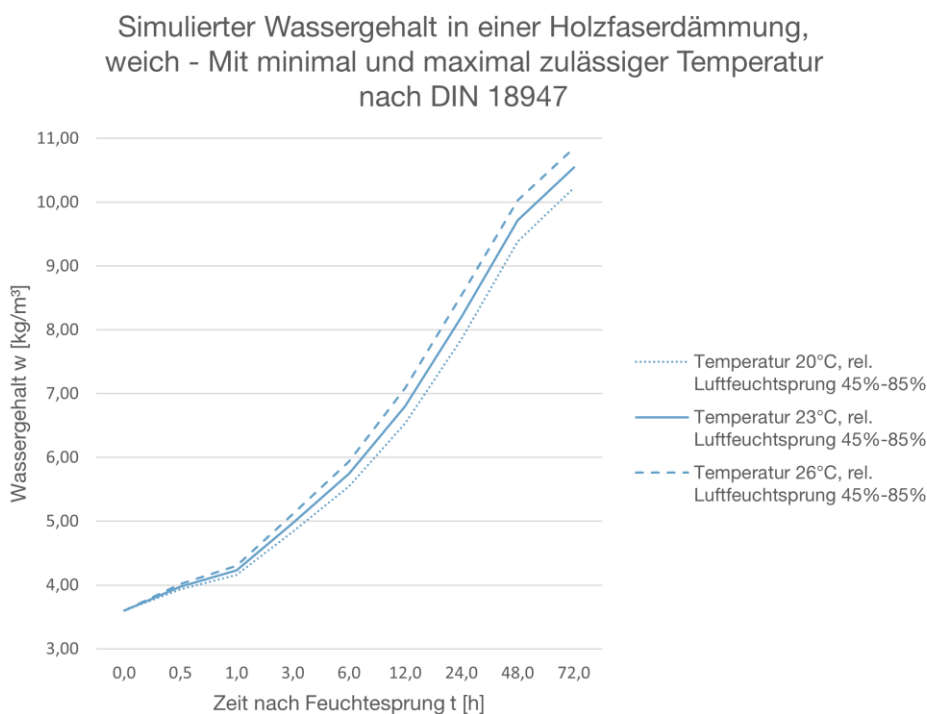


Abb. 38 - Simulation des Wassergehalts in einer Holzfaserdämmung - mit minimal und maximal zulässiger Temperatur nach DIN 18947

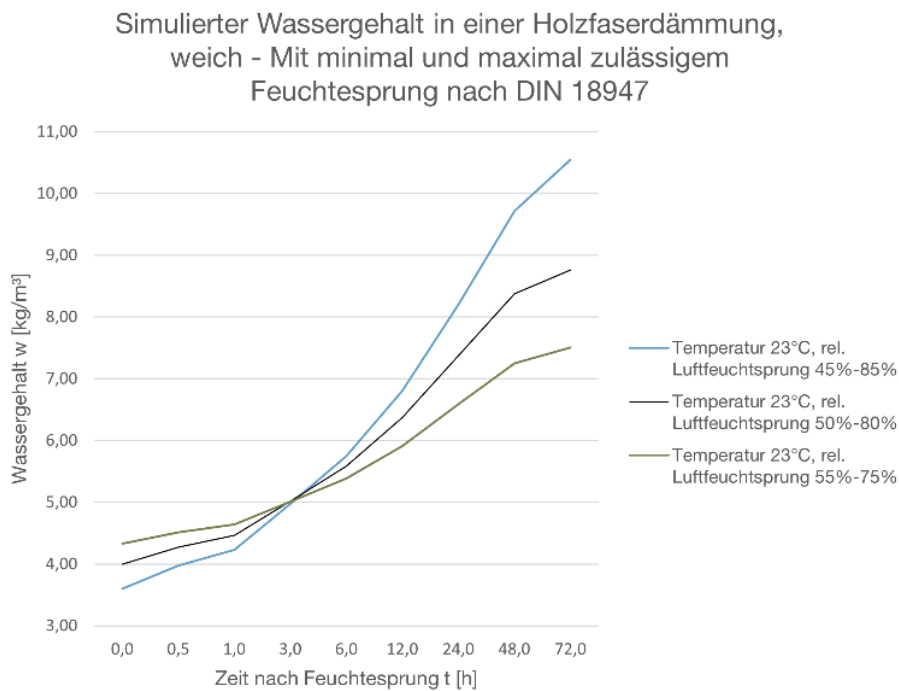


Abb. 39 - Simulierter Wassergehalt in einer Holzfaserdämmung (weich) - mit minimal und maximal zulässigem Feuchtesprung nach DIN 18947

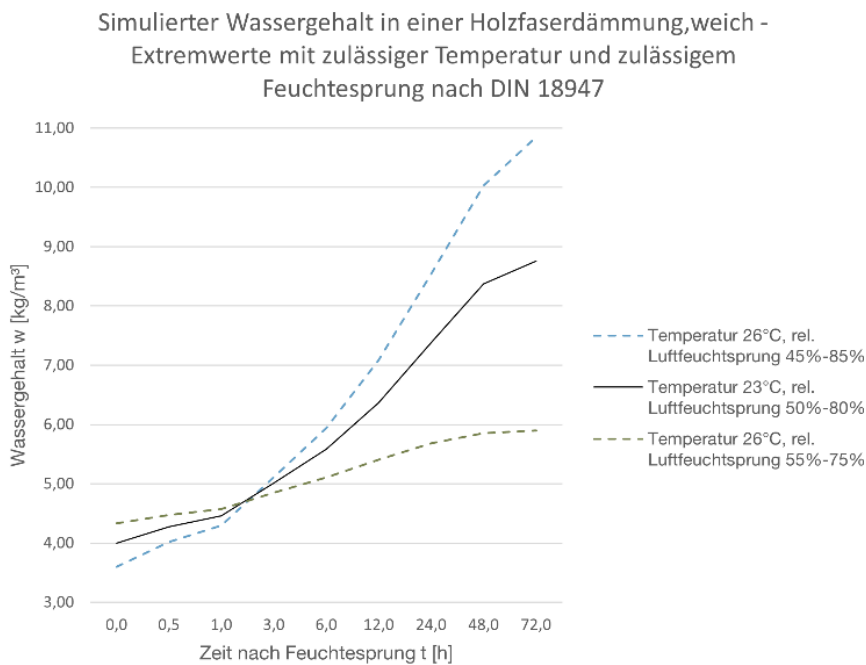


Abb. 40 - Simulierter Wassergehalt in einer Holzfaserdämmung (weich) - Extremwerte mit zulässiger Temperatur und zulässigem Feuchtesprung nach DIN 18947

7.2.2 Feuchteverlust infolge des Wiegeprozesses

Zur Abschätzung des unkontrollierten Feuchteverlusts infolge des Wiegeprozesses, der unter normalen Raumluftverhältnissen stattfindet, kommt das im Folgenden beschriebene Verfahren zum Einsatz. Das Probestück wird in der Klimabox zur Waage getragen und direkt vor Ort aus der Box auf die Waage aufgelegt. Zwischen Klimabox und Raumklima herrscht im betrachteten Fall der größte mögliche Wasserdampfpartialdruckunterschied (Klimabox, relative Luftfeuchte von 99 % und Umgebung ungefähr 59%), welcher infolge des Transportweges auftreten kann. Als Versuchsmaterial kommt die Gipskartonplatte zum Einsatz, da diese die schnellste Reaktion auf auftretende Luftfeuchteänderungen zeigt. Bei einer Materialmasse von 20 g ergibt sich bereits nach einer Minute eine Masseabnahme von 0,01 g, was 0,05 Masse-% entspricht, die dann leicht progressiv in Abhängigkeit zur Expositionsdauer ansteigt. Da der Messvorgang eine zweiminütige Entnahme aus der Box bedingt ist im ungünstigsten Fall mit einer Masseänderung von 0,2 % zu rechnen. Da in den übrigen Materialien eher kleinere Masseänderungen zu erwarten sind, scheint dieser Messfehler hinnehmbar.

7.2.3 Eingeschränkte Luftzirkulation

Die Luftzirkulation hat einen Einfluss auf den Wärmeübergangswiderstand der Baustoffoberfläche. Die Luftgeschwindigkeit an der Baustoffoberfläche wird nicht gemessen. Folglich kann der genaue Wärmeübergangswiderstand nicht bestimmt werden. Dieser wird im Rahmen dieser Arbeit für alle Simulationen auf den Standardwiderstandswert für Außenbauteile entsprechend der DIN 4108-3 festgesetzt.

7.3 Erwartungswerte

Alle in Kapitel 8 beschriebenen Messverfahren und das Verhalten der in Kapitel 6 bestimmten Baustoffe werden vorgängig numerisch bestimmt. Dies dient der Plausibilisierung der Messwerte. Treten Auffälligkeiten auf, können Messungen gegebenenfalls abgebrochen und wiederholt werden. Diese generierten Werte können nach Abschluss aller Messungen dazu dienen anhand der qualitativen Messungen aufzuzeigen, ob durch die neu bestimmten Simulationsparameter eine Annäherung der Simulation an die Realität geschieht (siehe Kapitel 10.4).

8 Messverfahren

8.1 Bestimmung der Sorptionsisotherme

Die in Kapitel 3.3.3 beschriebene Sorptionsisotherme wird entsprechend der DIN 12521 mittels der in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Klimaboxen bestimmt [70]. Es werden nur die unbeschichteten Baustoffe getestet, da die Beschichtung keinen Einfluss auf die Ausgleichsfeuchte hat.

In der Tabelle 12 sind die eingestellten relativen Luftfeuchten sowie die einbezogenen Baustoffe aufgelistet. Die relativen Luftfeuchten entsprechen mehrheitlich den von der DIN 12521 vorgeschriebenen Luftfeuchten. Die DIN 12521 sieht eine Messung bei 53 % relative Luftfeuchte vor, für die jedoch das entsprechende Salz nicht zur Verfügung gestellt werden konnte. Als Ersatz dienen Messungen bei 43 % und 60 % relativer Luftfeuchte.

relative Luftfeuchte	Einbezogene Proben
33 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
43 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
60 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
75 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
85 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
93 ± 5 %	S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-11
99 - 5 %	S-1

Tabelle 12 - Übersicht der gemessenen Probekörpern und relativen Luftfeuchten zur Bestimmung der Sorptionsisotherme

Nach dem ersten Versuch wird auf die Messung bei 99 % Luftfeuchte verzichtet, da der gemessene Baustoff vor Erreichen der Ausgleichsfeuchte verschimmelt war. Der Anteil des Pilzmyzels auf die Gesamtmassezunahme ist nicht bestimmbar (Abb. 41).

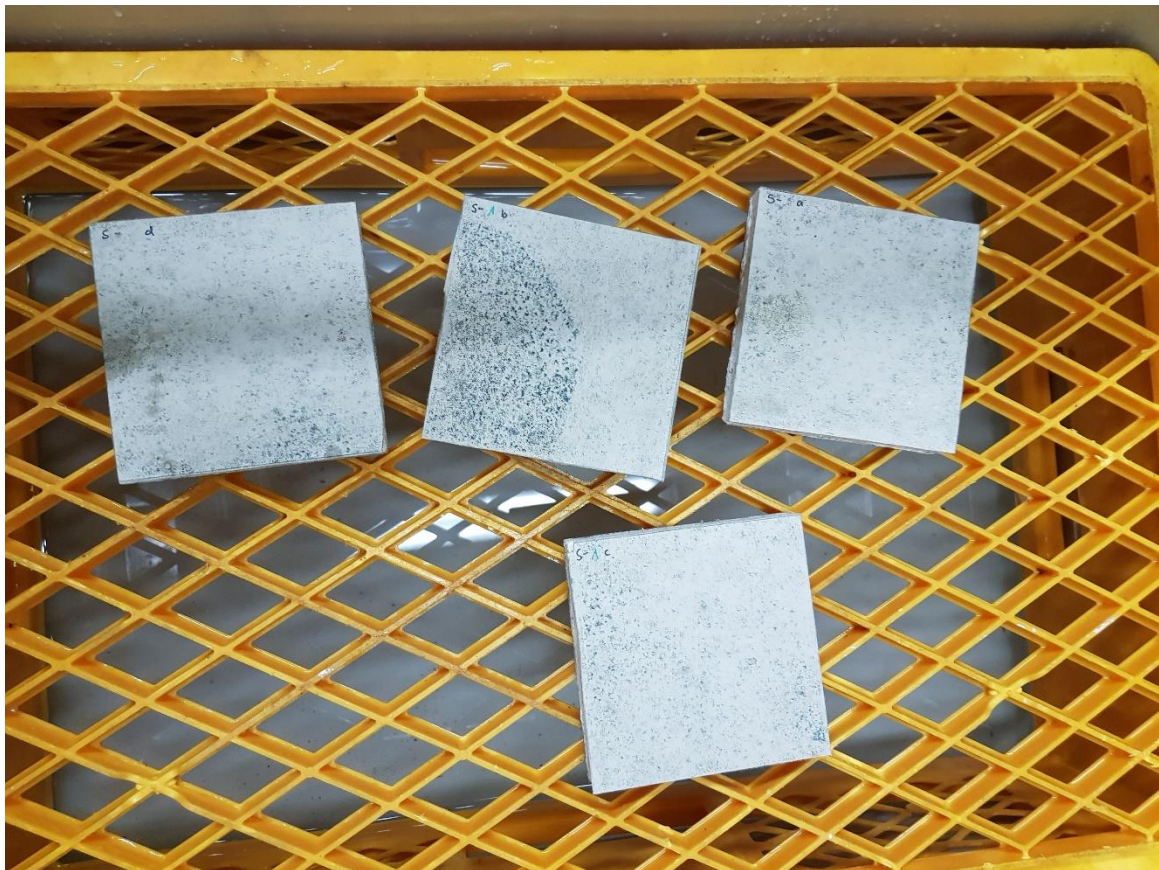


Abb. 41 – Verschimmelte Gipskartonplatte-Probekörper bei 99 % relative Luftfeuchte

Zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte lagern die Probekörper bei einer konstanten relativen Luftfeuchte so lange in den Boxen bis zwei aufeinanderfolgende Messungen im Abstand von jeweils mindestens 24 Stunden eine geringere Masseänderung als 0,02 Masse-% aufweisen. Die Dokumentation der Massezunahme beziehungsweise -abnahme erfolgt durch regelmäßiges Wiegen der Probekörper (siehe Abb. 42). Als Einstieg in die Messreihe ist es erforderlich die Probekörper auf eine relative Luftfeuchte zu konditionieren. Diese erfolgt durch entsprechend lange Lagerung im klimatisierten Laborraum bei 60 % relativer Luftfeuchte. Die erste Messung der Adsorptionsisotherme ist folglich bei 75 % relativen Luftfeuchte möglich (Abb. 42). Nach Erreichen der höchsten zu messenden Ausgleichsfeuchtestufe schreitet das Verfahren rückwärts. So bestimmen sich die Punkte auf der Desorptionsisotherme. Bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte bei 33 % Luftfeuchte wird aufsteigend 60 % relative Luftfeuchte gemessen. Abschließend kommen die Proben zur Feststellung des Darrgewichtes in den Darrofen. Dies gewährleistet, dass allfällige Beschädigung oder Zerstörung der Probekörper durch hohen Wärmeeintrag, erst bei abgeschlossener Messung auftritt. Der gesamte Messablauf ist in Abb. 42 dargestellt.

Die unter Kapitel 7.2.2 erwähnten Messfehler durch verzögertes Messen und Zurücksetzen der Probe sind auch hier zu erwarten.

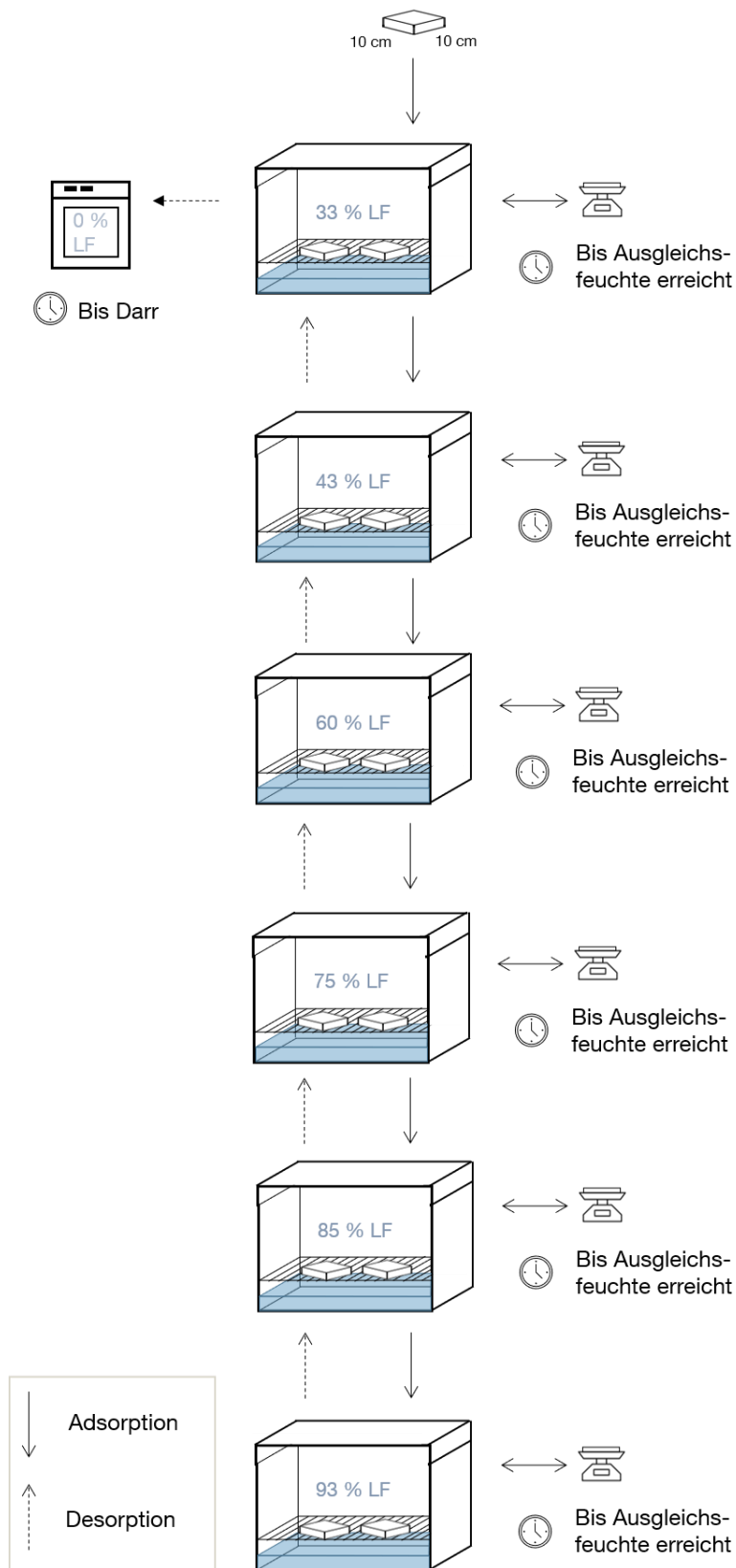


Abb. 42 - Messablauf bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme

8.2 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizient

Der in der DIN 15148 definierte Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Wasseraufnahme infolge von Kapillarkräften [27].

Die DIN 15148 schreibt eine Konditionierung bei 50 % relativer Luftfeuchte vor. Wie aus Kapitel 8.1 bekannt ist, steht diese relative Luftfeuchte nicht zur Verfügung. Ersatzweise erfolgt die Konditionierung bei 60 % relative Luftfeuchte. Diese erfolgt entsprechend dem unter Kapitel 8 beschriebenen Verfahren. Die Probekörper werden in ein ausreichend großes, mit destilliertem Wasser gefülltes Behältnis eingetaucht, sodass eine unversiegelte Fläche nach unten zeigt. Die in einem Wasserbad von 10 mm Pegelhöhe liegenden Probekörper müssen einen Abstand zum Behältnisboden von 5 mm aufweisen. Diesen Abstand stellen drei untergelegte metallische Muttern vom Typ M6 der entsprechenden Höhe her. Die Grundfläche der Muttern beträgt ungefähr 45 mm². Die Versiegelung infolge der Muttern dürfte gering sein. Die Fläche von 135 mm² entspricht etwa 1,34 % der exponierten Fläche. Es ist auch Feuchteeintritt im Bereich der Auflagefläche zu erwarten. Sich daraus ergebende Fehler werden vernachlässigt.

Das Wiegen erfolgte entsprechend dem in der DIN 15148 vorgegebenen Zeittakt (5min, 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h). Die Messung ist vorzeitig beendet, wenn gegenüber der benetzten Fläche liegenden Oberfläche Wasser austritt.

Die unter Kapitel 7.2.2 erwähnten Messfehler durch verzögertes Messen und Zurücksetzen der Probe sind auch hier zu erwarten.

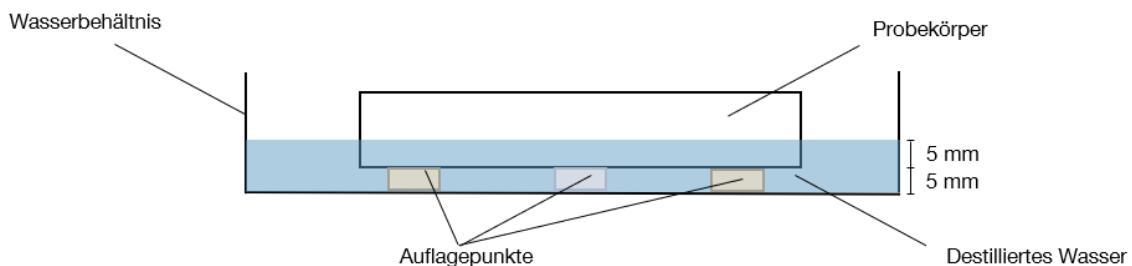


Abb. 43 - Messaufbau bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

8.3 Bestimmung der freien Wassersättigung

Die DIN 16535 [65] schreibt eine Konditionierung bei 50 % relativer Luftfeuchte vor. Wie aus Kapitel 8.1 bekannt ist, steht diese relative Luftfeuchte nicht zur Verfügung. Wie oben beschrieben erfolgt diese bei 60 % relative Luftfeuchte. Alle Probekörper werden analog zum Verfahren für Wärmedämmstoffe in der DIN 16535 vollständig in destilliertes Wasser eingetaucht. Große Metallmutter halten die aufschwimmenden Probekörper auf dem Behältergrund. Die in der DIN 16535 beschriebene minimale Gesamteintauchzeit von 28 Tagen wird nicht eingehalten. Stattdessen erfolgen, wie im Kapitel 8.1 beschrieben,

Messungen im mindestens 24 Stundentakt bis die Massezunahme unter 0,02 Masse-% liegt. Die unter Kapitel 7.2.2 erwähnten Messfehler durch verzögertes Messen und Zurücksetzen der Probe sind auch hier zu erwarten.

Für die stark saugenden Lehmbaustoffe ist die freie Wassersättigung bereits bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (Kapitel 8.2) möglich. Ist die der benetzten Fläche gegenüberliegende Oberfläche vollständig durchfeuchtete, wird dies als freie Wassersättigung gewertet.

8.4 Ermittlung der dynamische Sorptionsfähigkeit

Die Grundlage zur Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit eines Materials liefert die DIN 18947 im Anhang A.1 – Wasserdampfadsorption [72]. Die Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfadsorption von Lehmputzmörtel fest. Die Vorgehensweise lässt sich auf andere Baustoffe übertragen. Eine Einteilung in die von der Norm vorgeschlagenen Wasserdampfadsorptionsklassen wird nicht vorgenommen. Gemessen werden die Masseänderungen des auf 50 % relativer Luftfeuchte vorkonditionierten Probekörpers nach einem relativen Luftfeuchtesprungs auf 80 % Luftfeuchte. Die Messungen erfolgen im folgenden Zeittakt von 0,5 h, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h.

Die DIN 18947 sieht eine Konditionierung bei 50 % relativer Luftfeuchte vor. Die Konditionierung auf 50 % Luftfeuchte findet in einem Klimaschrank statt (vgl. Kapitel 7.1.1), der für die erforderliche Konditionierung nur über das Wochenende zur Verfügung steht. Es wird davon ausgegangen, dass die bereits auf 60 % vorkonditionierten Probekörper (wie in Kapitel 8.1) den geforderten Zustand von 50 % relativer Luftfeuchte in dieser Zeit erreichen. Die Messung muss am darauffolgenden Montag erfolgen. Der Feuchtesprung erfolgt automatisch um 5.30 Uhr.

Der Klimaschrank ist der Autorin nicht eigenständig zugänglich. Die Messperiode muss sich deshalb am Arbeitstag (6.00 – 17.30 Uhr, 11,5 h) des Bedienungspersonals orientieren. Die vorgeschriebene Messperiode erstreckt sich über 12 h. Zwangsweise muss eine Messung wegfallen. Unter der Annahme, dass der Wassergehalt der vorkonditionierten Probekörper nur noch leicht sinkt, fiel die Entscheidung auf die erste Messung zur Stunde 0 zu verzichten. Alternativ ist der Verzicht auf die letzte Messung zur Stunde 12 eine Möglichkeit.

Die unter Kapitel 7.2.2 erwähnten Messfehler durch verzögertes Messen und Zurücksetzen der Probe sind auch hier zu erwarten.

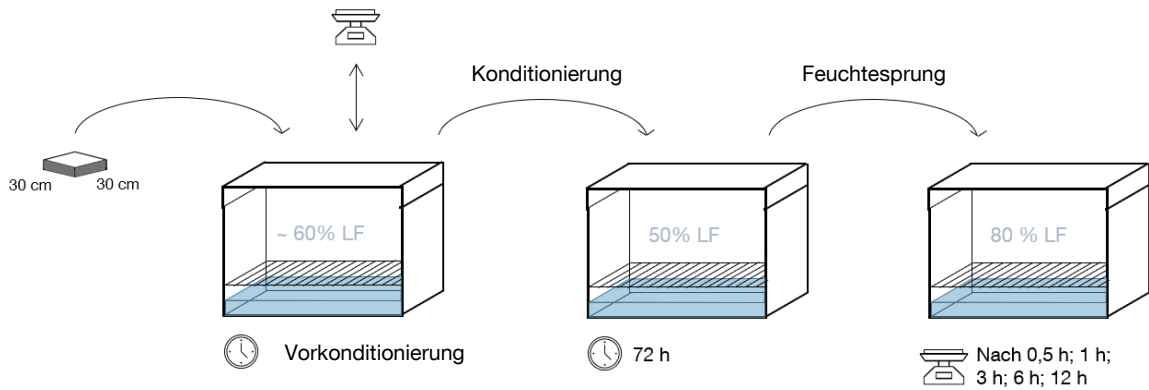


Abb. 44 - Messablauf bei der Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit

8.5 Feuchtepufferwirkung

Die Grundlage für die Intervallmessung und Bestimmung der Feuchtepufferzahl (MBV) ist das vom Nordtest Protocol [34] festgelegte Testprotokoll. Es sollen Masseänderungen infolge von periodischen relativen Luftfeuchteänderungen dargestellt werden. Die Lagerung der Probekörper von 8 Stunden bei 75 % relativer Luftfeuchte und anschließend 16 Stunden bei 33 % relativer Luftfeuchte bildet einen Standard-Tageszyklus in einem Wohnraum ab. Der Zyklus ist in Abb. 45 dargestellt. Es werden nur die Feuchtepufferwerte der Baustoffe an der Innenoberfläche bestimmt, da die Tagesschwankungen kaum Einfluss auf die tieferliegenden Schichten nehmen.

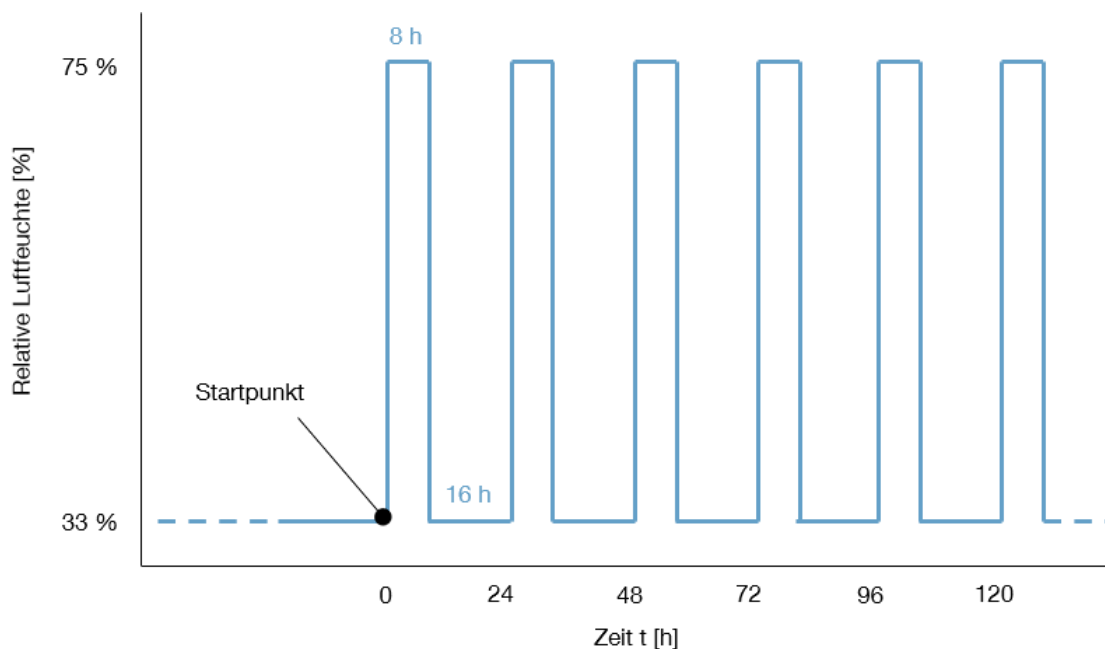


Abb. 45 - Nordtest, Feuchtezyklus

Zur Lagerung der Probekörper dienen die in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Klimaboxen. Diese weisen aufgrund der entsprechenden Salzlösung die erforderlichen relativen Luftfeuchten auf. Die Probekörper lagern zunächst bei 33 % relativer Luftfeuchte bis zur Ausgleichsfeuchte. Diese gilt als erreicht, wenn die Massenzunahme oder -abnahme der Probekörper bei zwei Messungen im Abstand von jeweils 24 Stunden weniger als 0,02 Masse-% beträgt. Anschließend startet die Messung mit dem oben beschriebenen, periodischen relativen Luftfeuchtenwechsel. Die Messung erfolgt am Ende der jeweiligen Periode, also nach 8 oder 16 h. Nach dem Wiegen werden die Probekörper in die Box mit der alternativen relativen Luftfeuchte umgesetzt (siehe Abb. 46). Die Messung gilt dann als beendet, wenn bei zwei Messzyklen in Folge die Masseamplitude kleiner als 5 % ist.

Die unter Kapitel 7.2.2 erwähnten Messfehler durch verzögertes Messen und Zurücksetzen der Probe sind auch hier zu erwarten

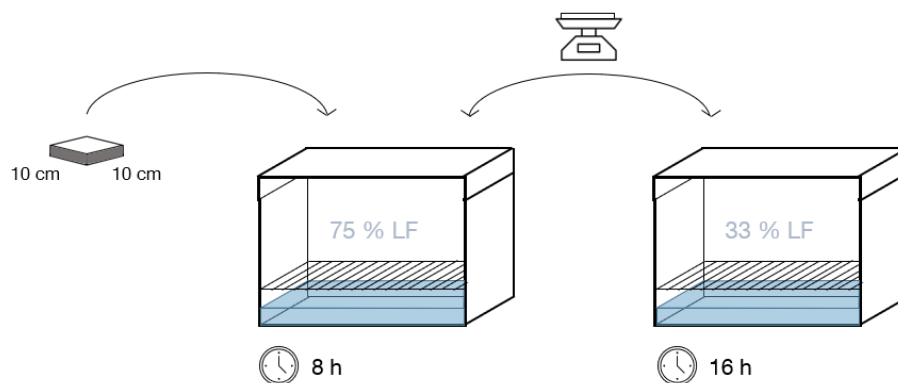


Abb. 46 - Messablauf bei der Bestimmung der Feuchtepufferwirkung

9 Messergebnisse

9.1 Sorptionsisotherme

Die nachfolgenden Abb. 47 und Abb. 48 zeigen beispielhaft die Sorptionsisothermen für eine Gipskartonplatte und eine Lehmbauplatte. Die jeweils dargestellten Messpunkte verstehen sich als arithmetische Mittel aus vier Messungen (Stampflehm hatte nur 3 Messungen). Die entsprechenden Messprotokolle finden sich im Anhang G.2. Die Standardabweichungen über alle Baustoffe und Messungen hinweg betragen rund 1 % in Relation zum Darrgewicht. Die Standardabweichungen bewegen sich zwischen 0,04 % (Stampflehm) und 3 % (Lehmbauplatte). Bei keinem Messpunkt lag die Standardabweichung über 4,8 % (Lehmbauplatte, Adsorptionsmessung 83 % rel. Luftfeuchte). Mit Ausnahme von der Gipskartonplatte musste aus Zeitgründen auf einzelne Messungen verzichtet werden (siehe Messprotokoll).

Die Lehmbauplatte zeigt eine deutliche Hysterese (Abb. 48). Dieses Muster fehlt bei der Gipskartonplatte in Abb. 47 gänzlich. Adsorption und Desorption verlaufen bei der Gipskartonplatte deckungsgleich.

Bis 93 % relativer Luftfeuchte findet bei beiden Baustoffen keine auffällige Massezunahme statt. Danach zeigt sich eine sprunghafte Massezunahme.

Die Adsorptions- und Desorptionsisothermen zeigen normalerweise kontinuierlich aufsteigende oder absteigende Verläufe. Die Holzfaserwerkstoffe (S-2, S-3) weichen davon bei einzelnen Messungen ab. Abb. 49 zeigt dies beispielhaft für den Baustoff Holzfaser-Putzträgerplatte. Beim 75 % relativer Luftfeuchte liegt der Messpunkt weit unter dem aus dem Verlauf des zu erwartenden Wertes. Die Standardabweichung des Messpunktes zeigt mit 1,4 % des Darrgewichtes keine Auffälligkeiten. Der Messpunkt stellt den Startpunkt der Messreihe dar. Der Endpunkt der Messreihe, der ebenfalls bei 75 % relative Luftfeuchte liegt, fügt sich harmonisch in den Verlauf ein und zeigt mit 0,9 % Standardabweichung keine auffällige Varianz. Dies gilt auch für den benachbarten Messpunkt bei 85 % relativer Luftfeuchte mit 1,3 % Standardabweichung.

Aus der Bestimmung der Sorptionsisothermen ergeben sich die in Anhang G.2 ersichtlichen materialspezifischen, massebezogenen Wassergehalte im Bereich von 33 % bis 93% relativer Luftfeuchte, welche für die numerische Berechnung des hygrothermischen Verhaltens notwendig sind. Zusätzlich kann der für die Approximation nach Holm et al. [66] relevante massebezogene Wassergehalt bei 80 % relative Luftfeuchte bestimmt werden.

Der maximale Wassergehalt bei 99 % errechnet sich aus der Messung der freien Wassersättigung (Anhang G.3).

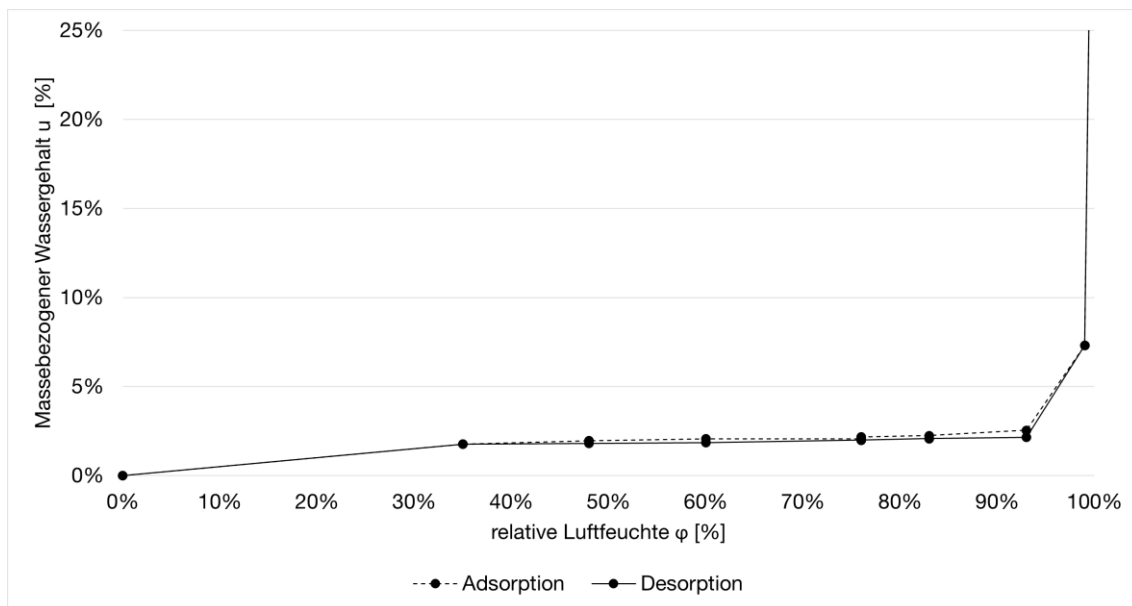


Abb. 47 - Sorptionsisotherme / Gipskartonplatte

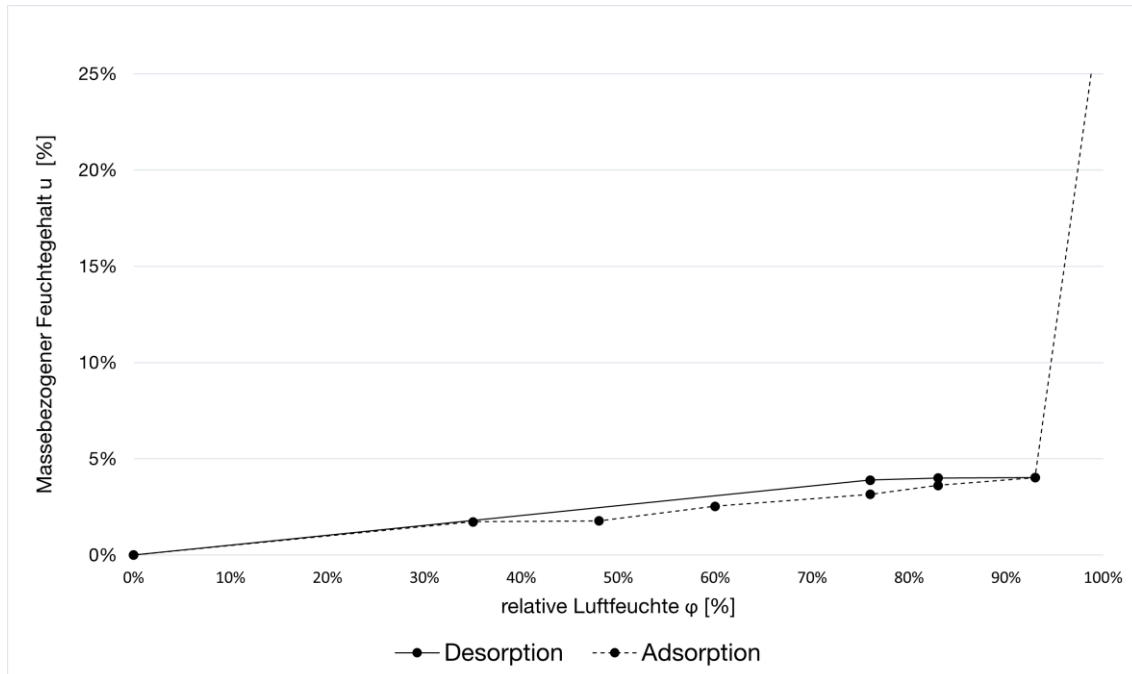


Abb. 48 - Sorptionsisotherme / Lehmbauplatte

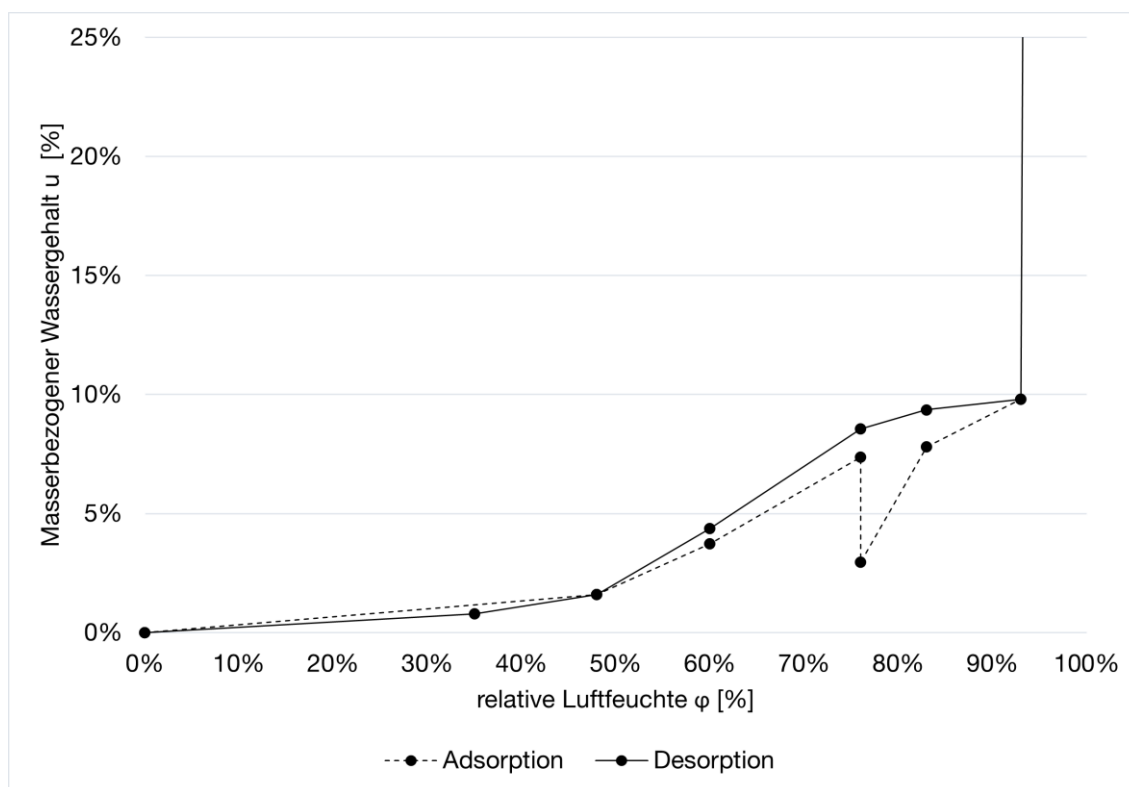


Abb. 49 - Sorptionsisotherme / Holzfaser-Putzträgerplatte

Aus dem Darrgewicht und der Abmessung der Probekörper lassen sich zusätzlich die in Tabelle 13 aufgelisteten Rohdichten errechnen (Anhang G.1).

Baustoffgruppe	Baustoff	Rohdichte [kg/m³]
Gipswerkstoffe	Gipskartonplatte	585,12
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe	585,12
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe	585,12
Holzwerkstoffe	Holzfaserdämmung (weich)	44,78
	Holzfaser-Putzträgerplatte	248,93
	Brettsperrholz	421,87
	Brettsperrholz mit Lasur	421,87
Lehmwerkstoffe	Lehmbauplatte	1467,23
	Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz	1467,23
	Lehmputzaufbau mit Lehmdesignputz	1710,75
	Stampflehm	2404,10

Tabelle 13 – Rohdichten

9.2 Wasseraufnahmekoeffizient

Abb. 50 zeigt beispielhaft die Verläufe der freien Wasseraufnahme für eine Gipskartonplatte und Brettsperrholz. Diese beiden Baustoffe stellen die Extreme dar. Die übrigen Baustoffe liegen dazwischen (Siehe Anhang G.3).

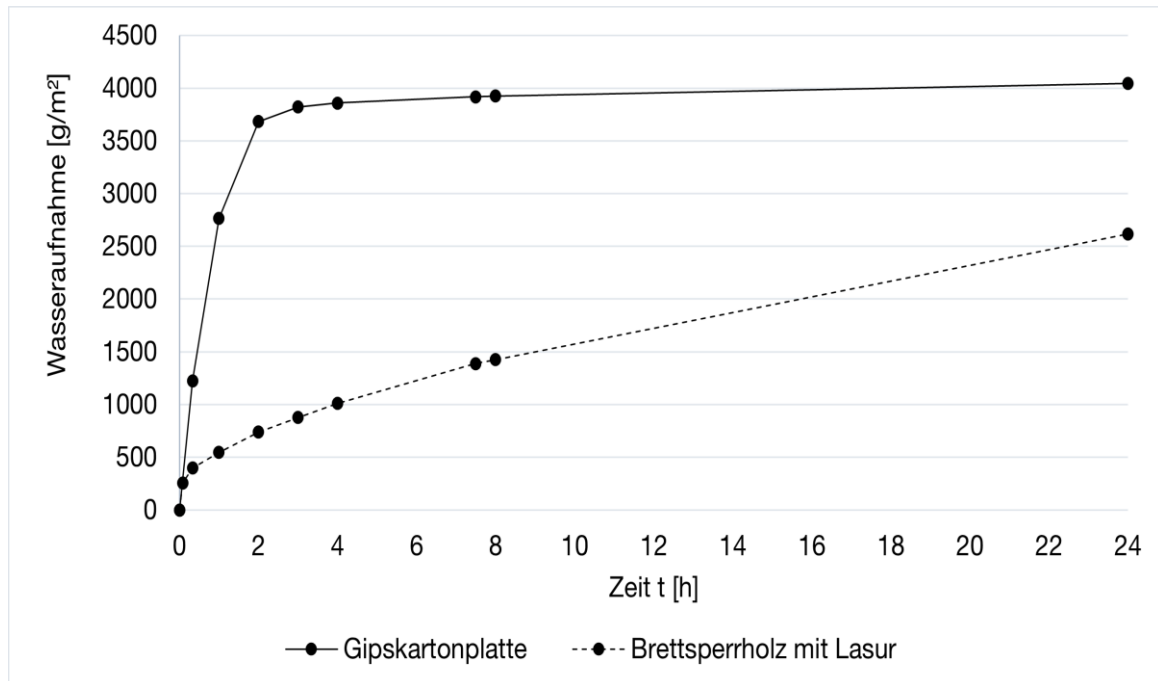


Abb. 50 - freie Wasseraufnahme verschiedener Baustoffe

Die Standardabweichung über alle Baustoffe und Messungen hinweg beträgt bezogen auf die mittlere freie Wasseraufnahme 10 %. Auffällig ist hier die Gipskartonplatte mit 3 % und die Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe mit 25 %. Abb. 51 und Abb. 52 bringen dies zum Ausdruck. Hier ist neben dem Mittelwert sowohl der minimale als auch der maximale Wert von vier Messungen dargestellt. Dies zeigt eklatant die Varianz bei Gipskarton mit Kalkfarbe, die sich jedoch mit zunehmender Sättigung reduziert. Siehe Messprotokoll im Anhang G.3).

Als technisch problematisch erwiesen sich die Lehmbaustoffe. Wie bereits in Kapitel 7.1.3 erwähnt, kommt es zu erheblichen Masseverlusten durch Auslösung von feinem Material, sodass Messreihen wiederholt werden müssen. Abb. 53 stellt die abgebrochene und die vollständige Messreihe gegenüber. Bei der vollständigen Messreihe vermeidet ein stabilisierendes Textil Masseverluste. Es zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung der paarigen Werte. Ähnliches gilt für die anderen Lehmwerkstoffe. Bei Stampflehm erfolgte die Messung von Anfang an mit stabilisierendem Textil.

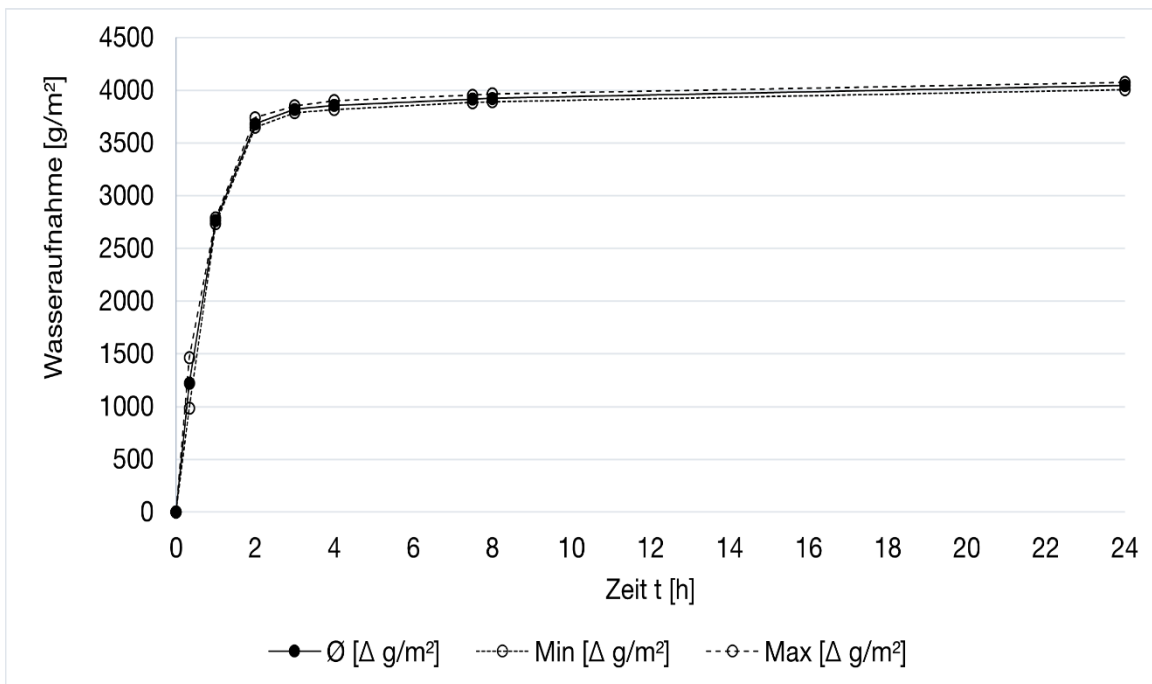


Abb. 51 - freie Wasseraufnahme / Gipskartonplatte

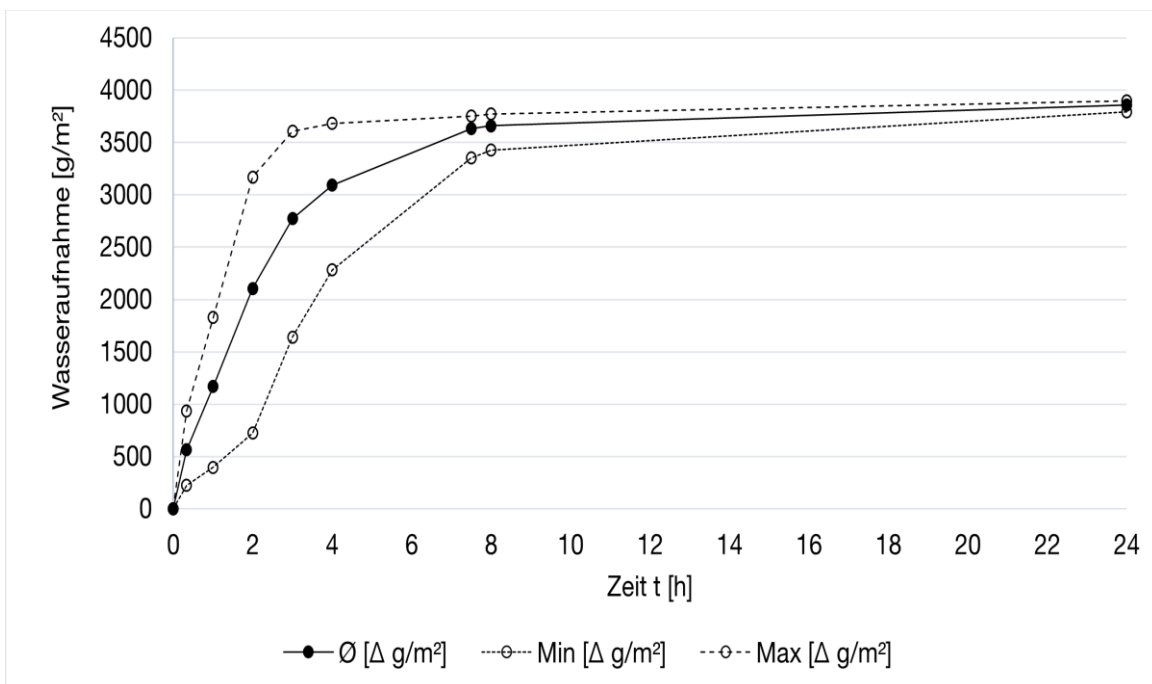


Abb. 52 - freie Wasseraufnahme / Gipskartonplatte mit Kalkfarbe

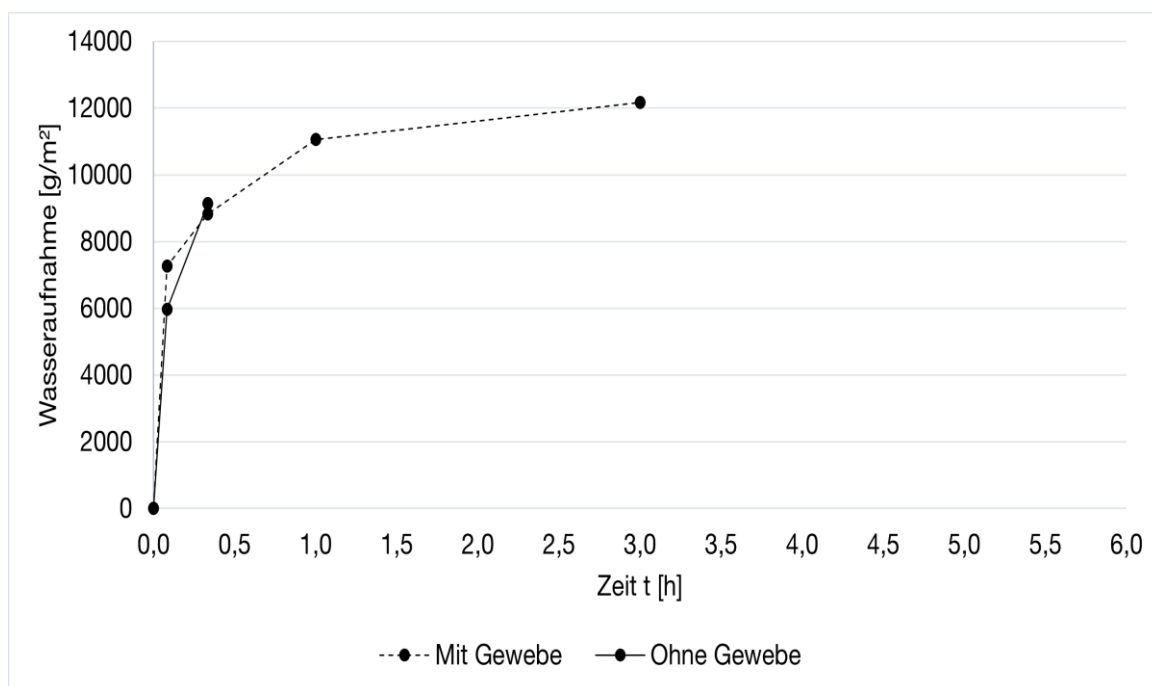


Abb. 53 - freie Wasseraufnahme / Lehmplatte mit und ohne Stabilisierungsgewebe

Aus den gemessenen Werten errechnen sich die in Tabelle 14 ersichtlichen Wasseraufnahmekoeffizienten.

Baustoffgruppe	Baustoff	Wasseraufnahme- koeffizient [kg/(m²·s^{0,5})]
Gipswerkstoffe	Gipskartonplatte	0,014
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe	0,013
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe	0,013
Holzwerkstoffe	Holzfaserdämmung (weich)	0,001
	Holzfaser-Putzträgerplatte	0,038
	Brettsper Holz	0,010
	Brettsper Holz mit Lasur	0,009
Lehmwerkstoffe	Lehmbauplatte	0,071
	Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz	0,080
	Lehmputzaufbau mit Lehmdesignputz	0,038
	Stampflehm	0,124

Tabelle 14 - Wasseraufnahmekoeffizienten

9.3 Dynamische Sorptionsfähigkeit

Die Standardabweichung über alle Baustoffe und Messungen hinweg beträgt 17 % auf die mittlere Massezunahme bezogen. Die geringste Standardabweichung zeigt die Holzfaser-Putzträgerplatte mit 5 % und die größte Stampflehm mit 35 %. Abb. 54 und Abb. 55 bringen dies zum Ausdruck.

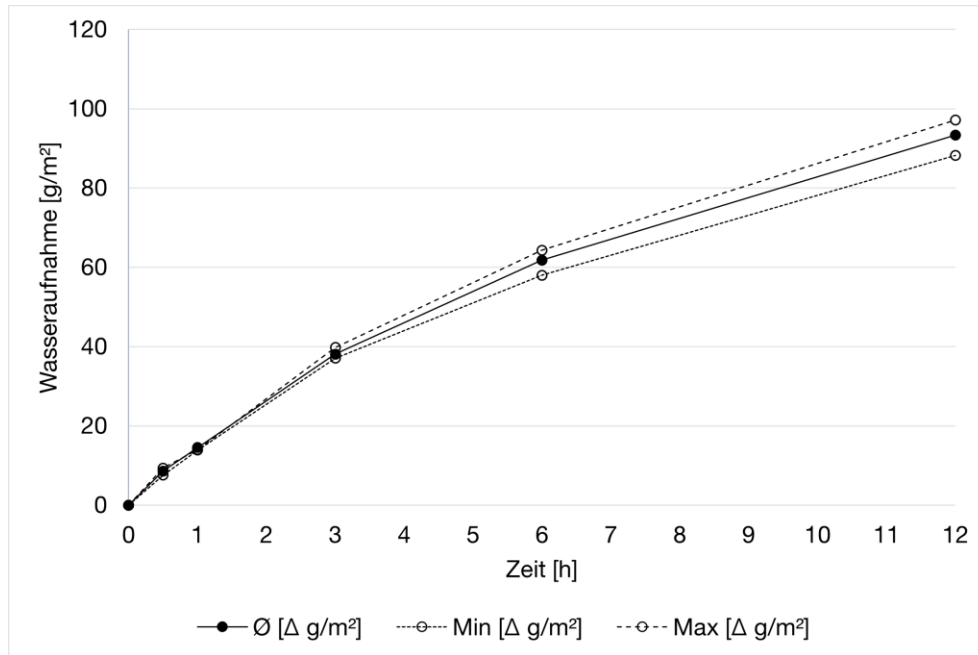


Abb. 54 - dynamische Sorption / Holzfaser-Putzträgerplatte

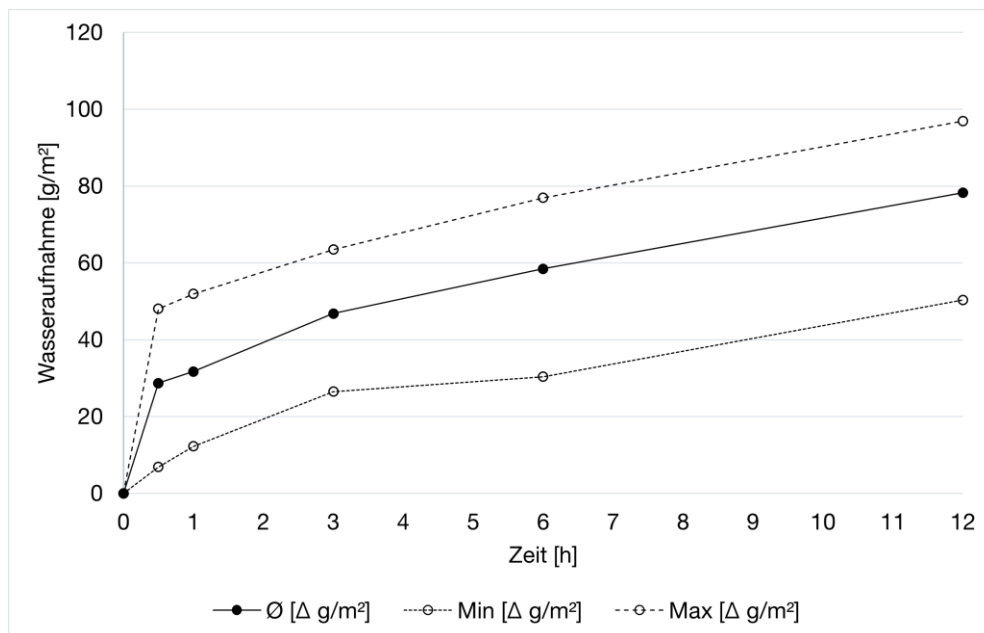


Abb. 55 - dynamische Sorption / Stampflehm

Die Darstellungen leiden daran, dass zum Zeitpunkt null aus logistischen Gründen auf eine Messung verzichtet wird. Dieser Wert muss nachträglich konstruiert werden. Dazu dienen Regressionsrechnungen mit den Mittelwerten der jeweiligen Messreihen (Methodik beschrieben in Kapitel 2.2.2). Als Regressionsmodelle kommen die in der Tabelle 15 beschriebenen Funktionen zum Einsatz. Die Funktion mit der besten Übereinstimmung dient der Bestimmung der Ausgangsmasse.

Funktion 1	Logarithmische Funktion	$y(x) = a + \frac{b}{(x)} + c * \ln(x + d)$
Funktion 2	Hyperbeltangens	$y(x) = a + b * \tanh(c * x + d)$
Funktion 3	Wurzelfunktion	$y(x) = a + \frac{b}{\sqrt{c + d * x^2}}$

Tabelle 15 – Verwendete Regressionsmodell

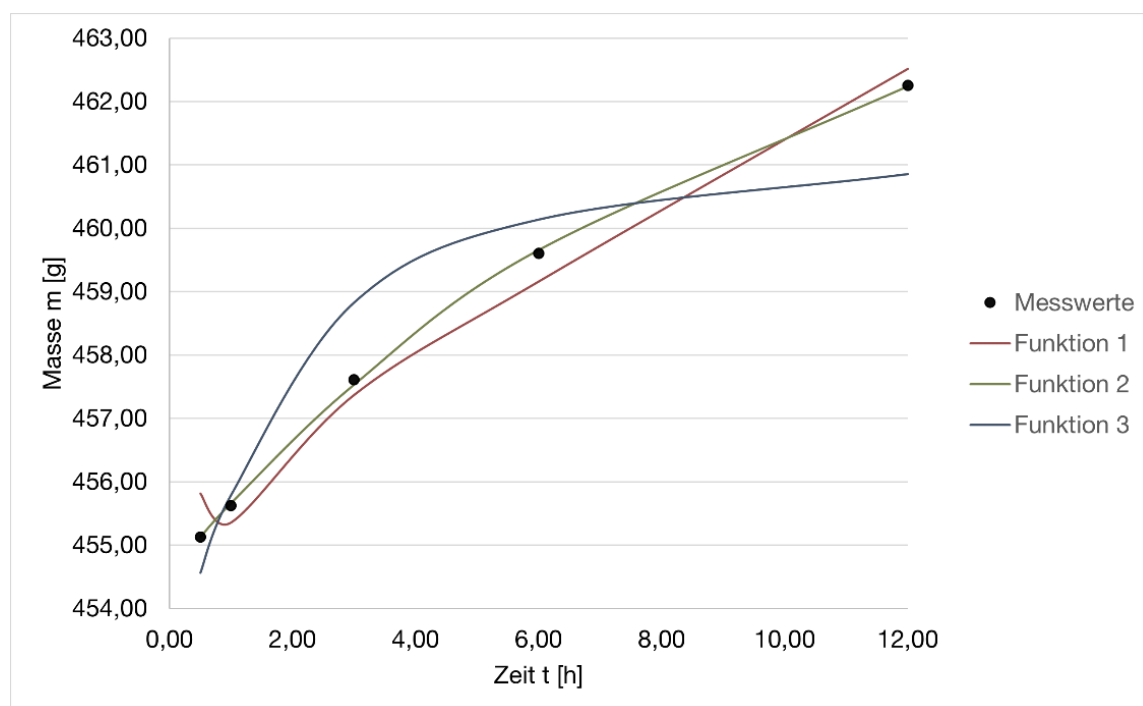


Abb. 56 - Regressionsanalyse bei der Holzfaser-Putzträgerplatte

Abb. 56 zeigt am Beispiel der Holzfaser-Putzträgerplatte die Vorgehensweise. In diesem Fall zeigt die Funktion 2 eine nahezu vollständige Übereinstimmung mit der Lage der Messpunkte. Aus den Regressionsgleichungen lassen sich die Startpunkte rechnerisch bestimmen. Die jeweils berechneten Korrelationskoeffizienten der Regressionsgleichungen liegen in allen Fällen über 0,9 (siehe Anhang G.4). Korrelationskoeffizient 1,0 bedeutet vollständigen funktionalen Zusammenhang zwischen gemessenen und gerechneten Werten. Die numerische Berechnung der dynamischen Sorption plausibilisiert die mittels der Regressionsanalyse ermittelten Werte (Anhang J.1).

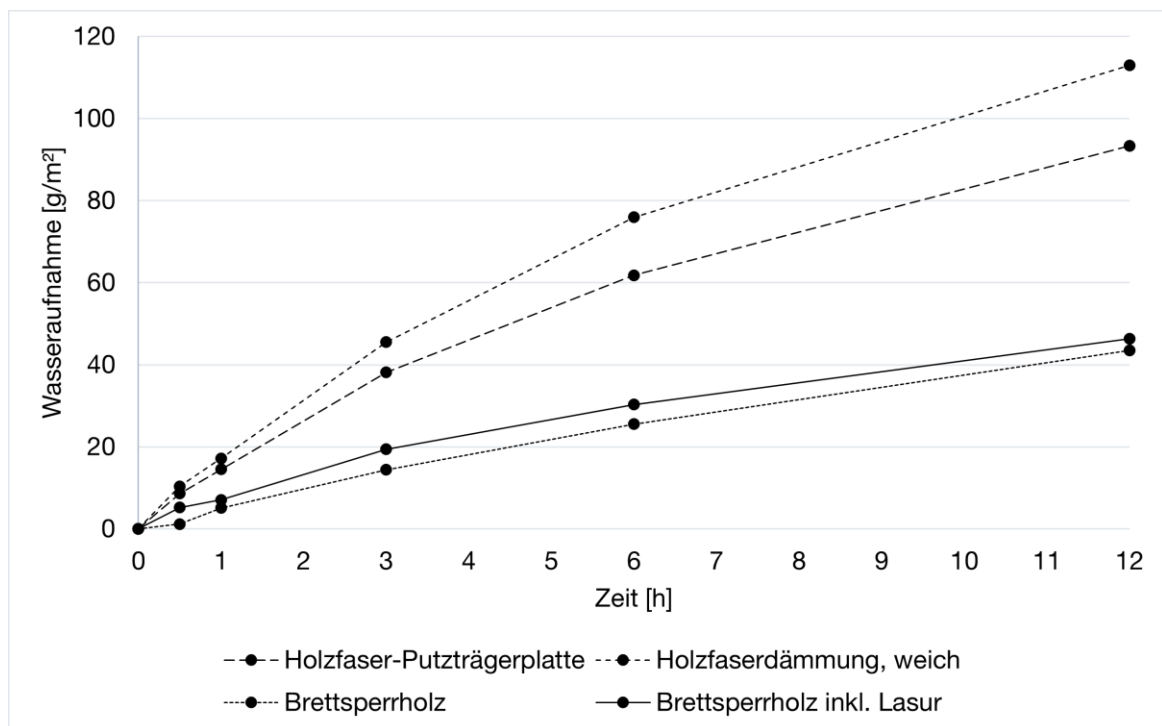


Abb. 57 - freie Wasseraufnahme der Holzwerkstoffe

Abb. 57 zeigt beispielhaft die freie Wasseraufnahme der Holzwerkstoffe. Die Verläufe aller Baustoffe sind sich in ihrem Charakter ähnlich. Es kommt zu keiner Überschneidung der Kurven. Unterschiede ergeben sich lediglich im Wasseraufnahmevermögen. Die Wasseraufnahme aller weiteren Baustoffe ist in Anhang G.4 ersichtlich.

9.4 Feuchtepuffervermögen

Die Standardabweichung über alle Baustoffe und Messungen hinweg beträgt 10 % auf die mittlere Massezunahme bezogen. Die geringste Standardabweichung zeigt die Lehmbauplatte mit Designputz mit 2 % und die größte Stampflehm mit 33 %. Abb. 58 und Abb. 59 bringen dies zum Ausdruck.

Abb. 60 zeigt beispielhaft für die Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtung die Charakteristik der Messwerte. Es gibt keine Überschneidungen. Am austauschfreudigsten ist die unbeschichtete Gipskartonplatte, am trägsten die Gipskartonplatte mit Kalkfarbe. Die Darstellung der restlichen Baustoffe findet sich im Anhang G.5.

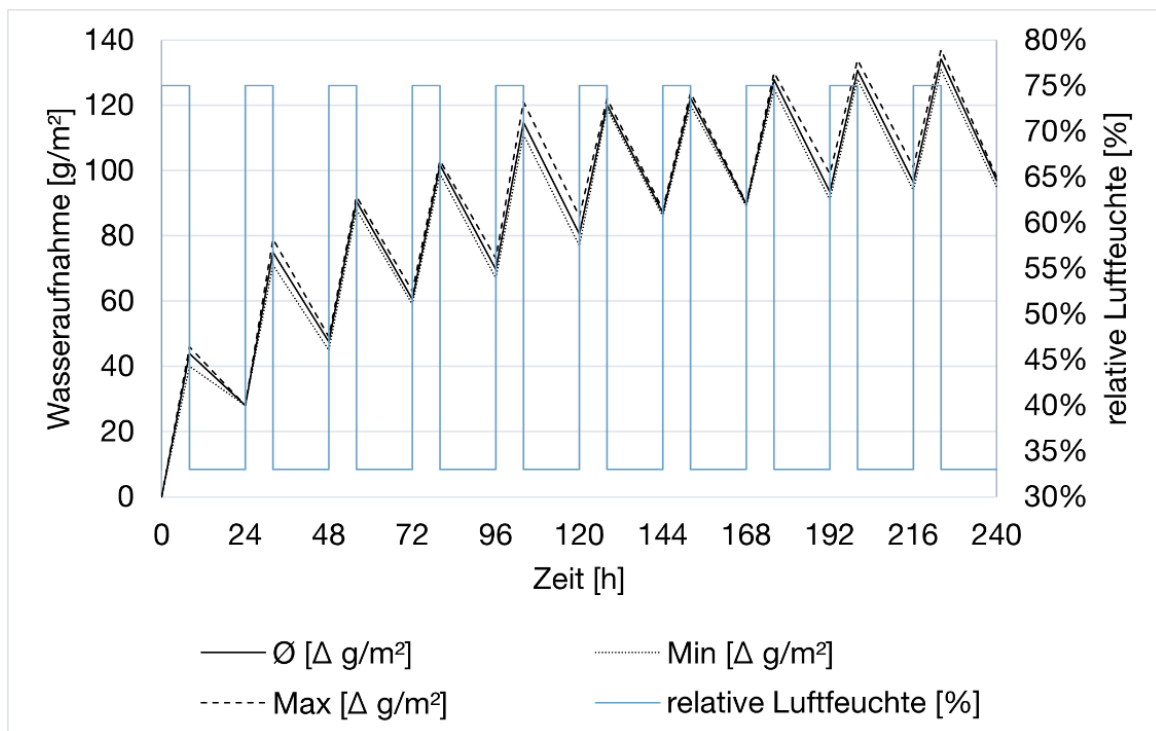


Abb. 58 - Feuchtepufferverhalten von einer Lehmbauplatte mit Designputz

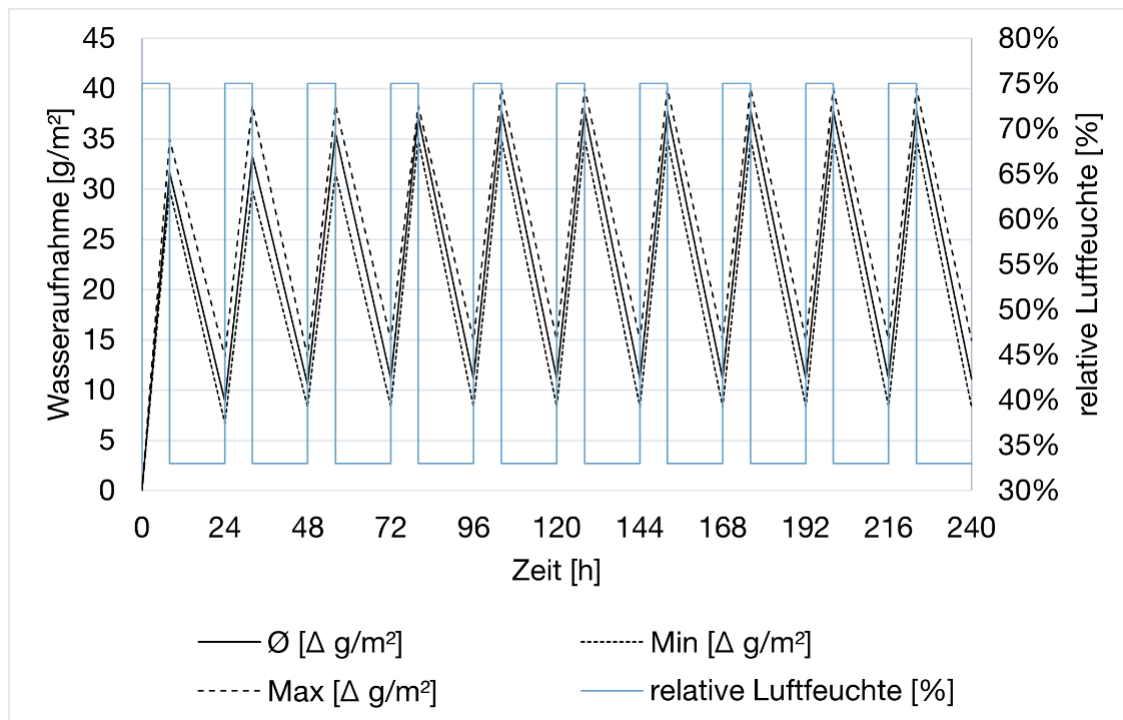


Abb. 59 - Feuchtepufferverhalten von Stampflehm

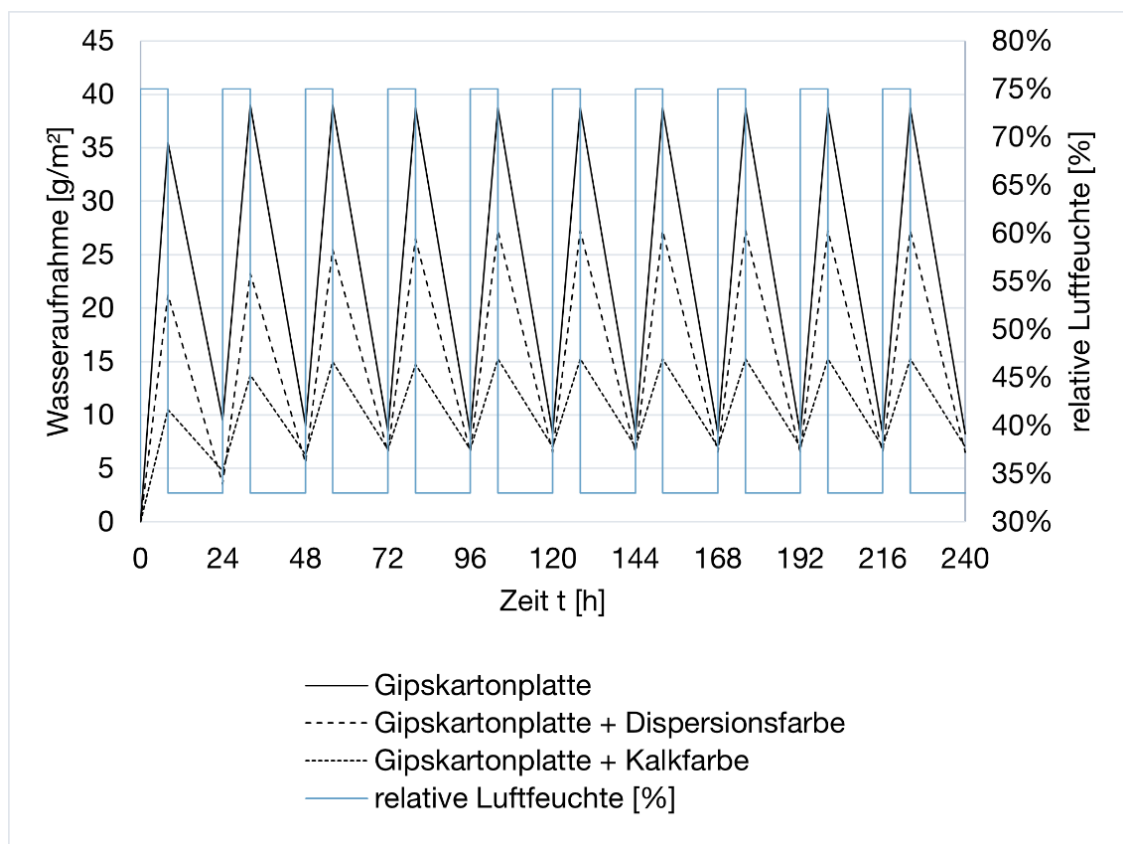


Abb. 60 - Feuchtepufferverhalten einer Gipskartonplatte mit und ohne Beschichtung

Die mittels Formel 14 errechneten Feuchtepufferwerte (MBV) der einzelnen Baustoffe sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Baustoffgruppe	Baustoff	Feuchtepufferwert [kg/m²·%RH]
Gipswerkstoffe	Gipskartonplatte	0,73
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe	0,49
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe	0,20
Holzwerkstoffe	Brettsper Holz	0,70
	Brettsper Holz mit Lasur	0,61
Lehmwerkstoffe	Lehm bauplatte	1,23
	Lehm bauplatte mit Lehm designputz	0,89
	Lehmputz aufbau mit Lehm designputz	0,90
	Stampflehm	0,63

Tabelle 16 - Feuchtepufferwerte der untersuchten Baustoffe

10 Diskussion

10.1 Material und Messtechnik

10.1.1 Probekörper

Abmessungen der Probekörper

Aus nicht selbst beeinflussbaren Gründen lagen die Probekörper in unterschiedlichen Abmessungen vor. Insbesondere zeigt sich das in den Stampflehmproben, die in sechseckiger statt quadratischer Form geliefert werden. Auch den nicht maschinell hergestellten Proben (beispielsweise Lehmputzaufbau) ist mit einem gewissen Maß an Vorsicht zu begegnen. Selbst fachmännisch hergestellte Baustoffe, wie beispielsweise eine Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe, weisen noch eine verhältnismäßig große Varianz auf. Eine höhere Homogenität der Proben führt zu einer kleineren Varianz in den Messungen.

Optimale Probenanzahl

Für alle durchgeführten Messung definieren die verwendeten DIN-Normen und Protokolle die Mindestanzahl an Probekörper mit drei Stück. Aus Sicherheitsgründen verwendet diese Arbeit eine Probenanzahl von vier Stück und überschreitet damit die geforderte Stückzahl. Für die meisten Baustoffe und Verfahren erscheint dies aufgrund der beobachteten Standardabweichung ausreichend. Es treten Fälle auf, wie beispielsweise bei der Feuchtepuffermessung und der Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit von Stampflehm, wo die Standardabweichung bis zu 35 % des Mittelwertes betragen kann. Insgesamt zeigt sich, dass die industriell gefertigten Baustoffe eine größere Homogenität aufweisen als die handwerklich hergestellten. Bei Baustoffen, bei denen höhere Inhomogenitäten zu erwarten sind, bietet sich eine Erhöhung der Probekörperanzahl, zum Beispiel auf zehn Stück, an. So ist der Mittelwert weniger Zufälligkeiten ausgesetzt und zuverlässiger.

Feuchteverhalten von Lehmbaustoffen

Wie in Kapitel 7.1.3 beschrieben, weisen die Lehmbaustoffe ein empfindliches Verhalten gegenüber hohen Feuchten auf. Dies führt nicht nur bei direktem Kontakt mit Wasser zu Problemen, sondern bereits bei hohen relativen Luftfeuchten. Während der Messung zur Bestimmung der Sorptionsisotherme zeigt sich, dass eine zusätzliche Stabilisierung des



Abb. 61 - Seitliche Stabilisierung der Lehmbauplatte mit Klebeband

Materials bei hohen Luftfeuchten notwendig sein kann. Um Materialverluste und damit unkontrollierte Masseverluste zu vermeiden, lohnt es sich die Lehmprobekörper an der Mantelfläche entlang mittels eines Klebebands zu stabilisieren (Abb. 61). Das Klebeband hat keinen Einfluss auf die Ausgleichsfeuchte. Die Masse des Klebebands ist bestimmt und muss bei der Bestimmung der Masse-zunahme gegengerechnet werden.

Chemisorption beim Darren

Es gibt keine Möglichkeit direkt festzustellen, ob sich beim Darren in den Baustoffen gebundenes Wasser löst. Bei Gipskarton löst sich das chemisch gebundene Kristallwasser ab rund 130 °C. Dieser Wert stellt keinen Fixpunkt dar, es ist möglich, dass sich bereits früher gebundenes Wasser löst [75]. Der errechnete Rohdichtewert aus dem Darrgewicht der Gipskartonplatte liegt deutlich unter dem vom Hersteller angegebenen Wert. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich Kristallwasser im Darrofen bei 103 °C gelöst hat. Folglich ist für die Bestimmung der Sorptionsisotherme die Rohdichte vom Hersteller zur Berechnung des Probekörpergewichts bei 0 % relative Luftfeuchte benutzt worden.

In den Holzwerkstoffen kann es bei hohen Temperaturen ebenfalls zur Chemisorption und damit Verdampfen von gebundenem Wasser kommen. Die Rohdichtewerte der Holzfaserverwerkstoffe liegen nur knapp unterhalb der Herstellerangabe, deshalb wird hier auf eine neue Berechnung des Trockengewichtes verzichtet. Die Brettsperrholzproben weichen stärker ab. Dies ist aber überwiegend auf die reduzierte Masse durch die vom Hersteller nicht vorgesehenen Lüftungsausschnitte für die thermische Aktivierung zurück zu führen (Siehe Abbildung Brettsperrholz in Anhang C.2).

10.1.2 Seitliche Abdichtung

Für die seitliche Abdichtung der Proben gibt es in den Normen kein einheitlich beschriebenes Verfahren. Es fehlt ein bestimmtes Qualitätsmaß für die Dichtigkeit, wie beispielsweise ein einzuhaltender S_D -Wert. Die ermittelten Werte sind somit immer auch von der gewählten Abdichtung abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit treten in diesem Zusammenhang Messungen auf, die unplausible Werte liefern. Die Abb. 62 stellt eine Messung unter Verwendung eines Klebebands mit S_D -Wert von 4,5 m (1) [76] und eine zweite Messung unter Verwendung eines Klebebands mit einem S_D -Wert von 28 m (2) [71] gegenüber. Die Standardabweichung beträgt in der Messung 1, 53 % und in der Messung 2, 21 % (Siehe Messprotokoll Anhang G.5). Der Unterschied in den Amplituden und der Standardabweichung ist signifikant.

Eine genaue Definition des einzuhaltenden S_D -Wertes für Abdichtungen der Probekörper in den DIN Normen kann dazu beitragen die Abweichungen weiter einzuschränken.

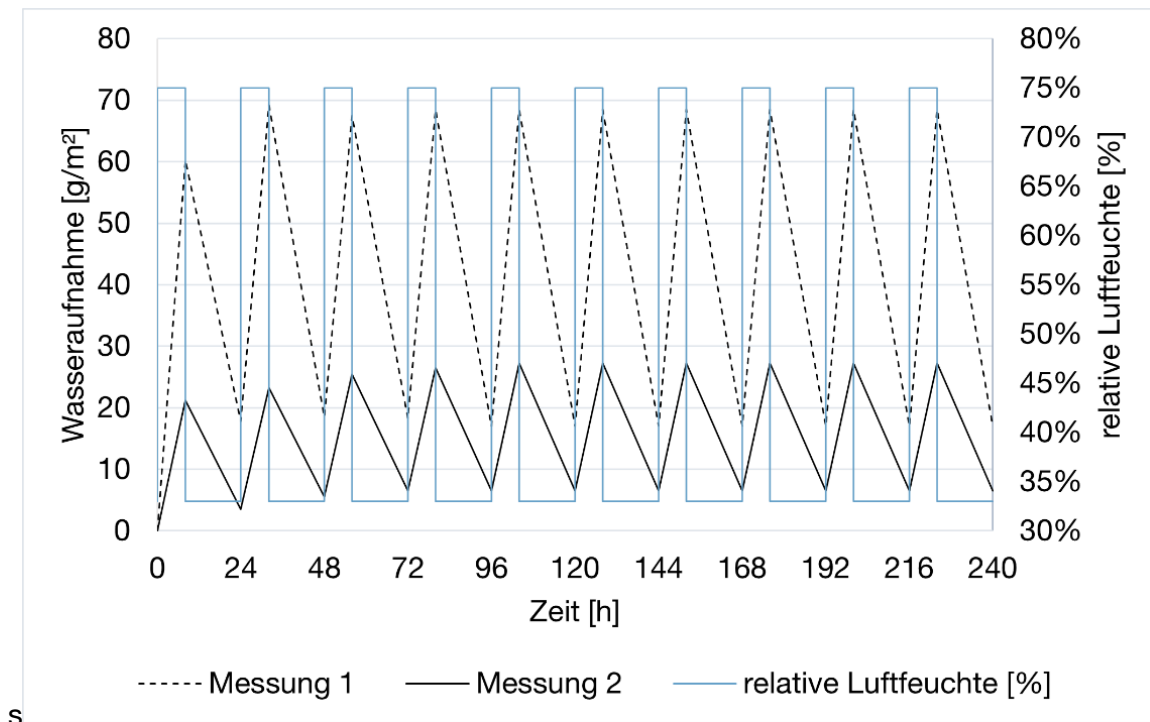


Abb. 62 - Feuchtepufferwirkung / Einwirkung des Klebebands bei Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe

10.1.3 Klimamodell

Das aus DIN 4108-3 errechnete Innenraumklima ist nur bedingt aussagekräftig. Künzel [8, 32] zeigt, dass sich damit die jahreszeitlich bedingten Schwankungen gut abbilden lassen, aber kurzzeitige und vor allem tageszeitliche Schwankungen kritisch zu betrachten sind. Daraus ist ersichtlich, dass sich das in Kapitel 6.3 beschriebene

Verfahren nur eingeschränkt eignet, um die Einflusstiefe des Innenraumklimas abzuschätzen. Um noch aussagekräftiger Einflusstiefen zu ermitteln, ist es möglicherweise notwendig eigene Klimadaten für einen Tageszyklus zu generieren oder auf andere Tagesklimamodelle zurückzugreifen. Dies hat zur Folge, dass sich die Auswahl der untersuchten Baustoffe ändern könnte.

10.2 Darstellung der Sorptionsisotherme in numerischen Berechnungen

10.2.1 Ermittlung der Sorptionsisotherme zur Beschreibung der gemessenen Punkte

Die numerische Berechnung verzichtet einfachheitshalber auf die Darstellung der Hysterese. Rechnerisch werden Adsorptions- und Desorptionswerte dadurch vernachlässigt. Eine vereinfachte Funktion zwischen Adsorption- und Desorptionsverlauf für die weitere Verwendung in den numerischen Berechnungen ist deshalb bei Baustoffen mit ausgeprägter Hysterese wünschenswert. Eine Möglichkeit die Ad- und Desorptionspunkte auf eine Funktion zu beziehen, bietet die in Kapitel 2.2.2 beschriebene Methode zur Regressionsanalyse

Abb. 63 stellt beispielhaft die Sorptionsisotherme von einer Holzfaserdämmung (weich) dar (Messpunkte). Drei in der Literatur vorgeschlagen Regressionsmodelle approximieren die Sorptionsisotherme, ohne die Hysterese zu berücksichtigen (Siehe Kapitel 4.1). Zusätzlich ist auch eine kubische Funktion (x^3) dargestellt.

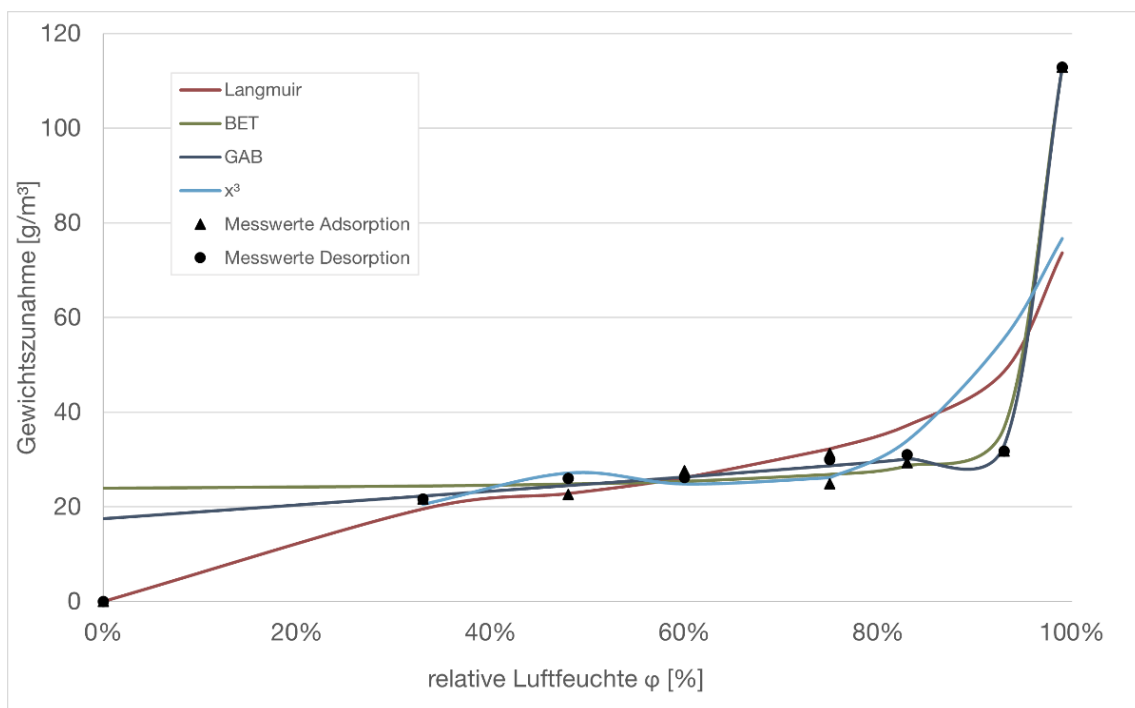


Abb. 63 - Regressionsmodelle der Sorptionsisotherme, Gipskartonplatte

Die GAB-Funktion erbringt im beschriebenen Falle und auch bei den übrigen Baustoffen den besten Ausgleich zwischen Ad- und Desorptionsmesswerten. Das Bestimmtheitsmaß für alle Baustoffe liegt über 0,95 und ist höher als die Bestimmtheitsmaße der anderen Funktionen. Die größten Abweichungen ergeben sich bei sehr tiefen relativen Luftfeuchten. Diese treten in Realität nur selten auf, deshalb sind Abweichungen in diesen Bereichen hinnehmbar. Eine Gewichtung der einzelnen Stützpunkte in den Regressionsmodellen in Anlehnung an die Verteilung der Häufigkeit der auftretenden relativen Luftfeuchte (normalverteilt) kann deshalb von Vorteil sein. Die Regressionsmodelle aller Baustoffe befinden sich im Anhang I.

10.2.2 Gegenüberstellung verschiedener Ansätze

Die weiteren Darstellungen basieren auf der GAB-Funktion. Unter den betrachteten Baustoffen zeigen die Holzfaserdämmung (weich) und die Holzfaser-Putzträgerplatte die ausgeprägteste Hysterese. Weshalb die Holzfaserdämmung (weich) hier beispielhaft behandelt wird.

Die Abb. 64 zeigt die numerisch berechnete Materialfeuchteentwicklung durch den Sprung der relativen Luftfeuchte von 50 % auf 80 %. Die folgenden vier vereinfachenden Darstellungen der hysteresischen Sorptionsisotherme werden gewählt:

- Das Baustoffverhalten wird nur mittels der Messwerte für die Adsorption beschrieben (Adsorption).
- Das Baustoffverhalten wird nur mittels der Messwerte für die Desorption beschrieben (Desorption).
- Die Messwerte für Ad- und Desorption werden gemittelt (Gemittelt)
- Wie in Kapitel 10.2.1 beschrieben wird mittels der Regressionsanalyse eine Sorptionsisotherme zwischen Ad- und Desorptionsmesswerten gefittet (Gefittet).

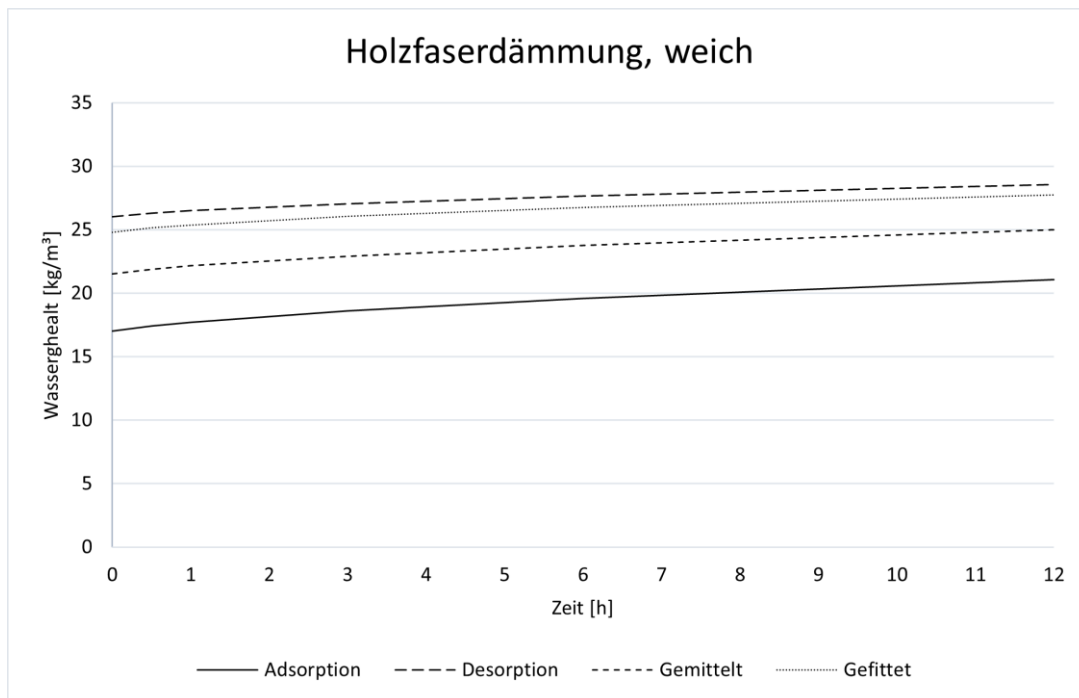


Abb. 64 – Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaserdämmung (weich) über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation

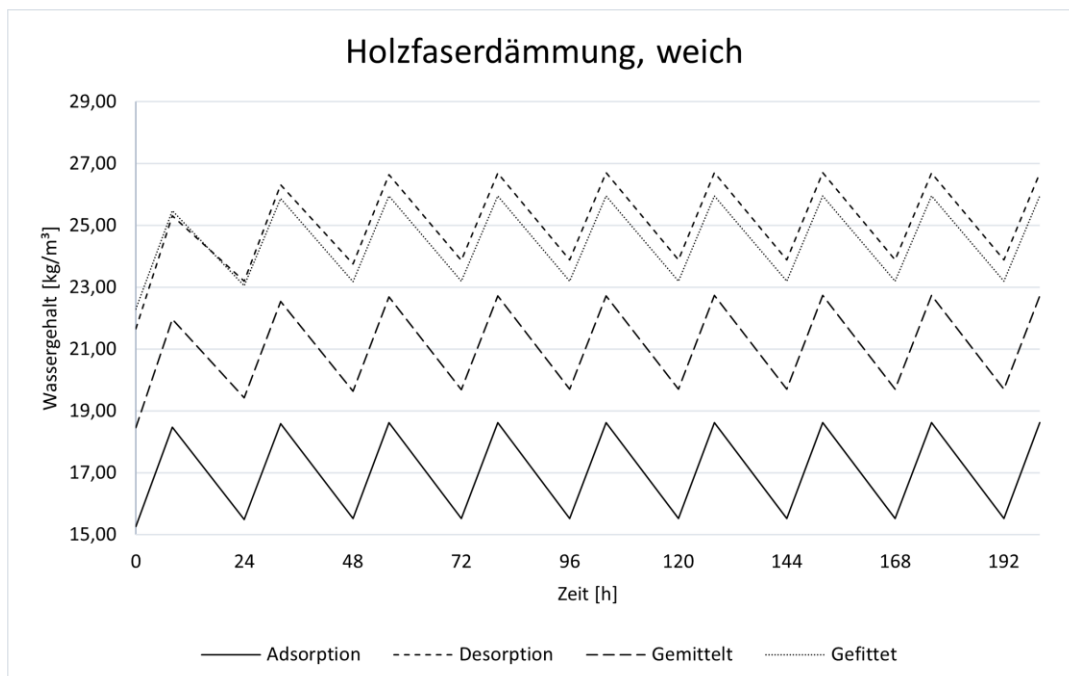


Abb. 65 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaserdämmung (weich) eines vereinfachten Tagesverlaufs nach dem Nordtest Protocol mittels Simulation, Holzfaserdämmung (weich)

Die sich aus 1) und 2) ergebende Wasseraufnahme stellt die Extremata dar. 3) und 4) zeigen den Versuch, einen Ausgleich zwischen Adsorption und Desorption zu finden. Dies gelingt durch Mitteln der gemessenen Werte am besten. In der Abb. 64 ist ersichtlich, dass bei einer Holzfaserdämmung (weich) die Regressionskurve eher die Desorption abbildet.

Abb. 65 zeigt die Materialfeuchteentwicklung im gleichen Baustoff infolge von zyklischen Sprüngen der relativen Luftfeuchte in Tagesintervallen entsprechend dem Nordtest Protocol. Die gefittete Linie bildet eher die Desorption im Material ab. Damit bestätigen sich die in Abb. 64 getroffenen Annahmen.

Abb. 66 zeigt die berechnete Materialfeuchteentwicklung unter den gleichen Voraussetzungen wie oben für eine Holzfaser-Putzträgerplatte. Verlauf und Lage der auf der Basis von GAB gefitteten Kurve weichen hier sogar noch stärker ab.

Abb. 67 stellt am Beispiel einer Gipskartonplatte die Materialfeuchteentwicklung für ein wenig hysteretisches Material dar. In diesem Fall spielen die für die numerische Berechnung verwendeten Kennwerte nur eine untergeordnete Rolle, da nur kleine absolute Unterschiede in der Zunahme des Wassergehalts auftreten. Verlauf von gemittelten Werten, gefitteten Werten, Adsorptions- und Desorptionswerten bewegen sich zwischen 1,4 kg/m³ und 1,5 kg/m³.

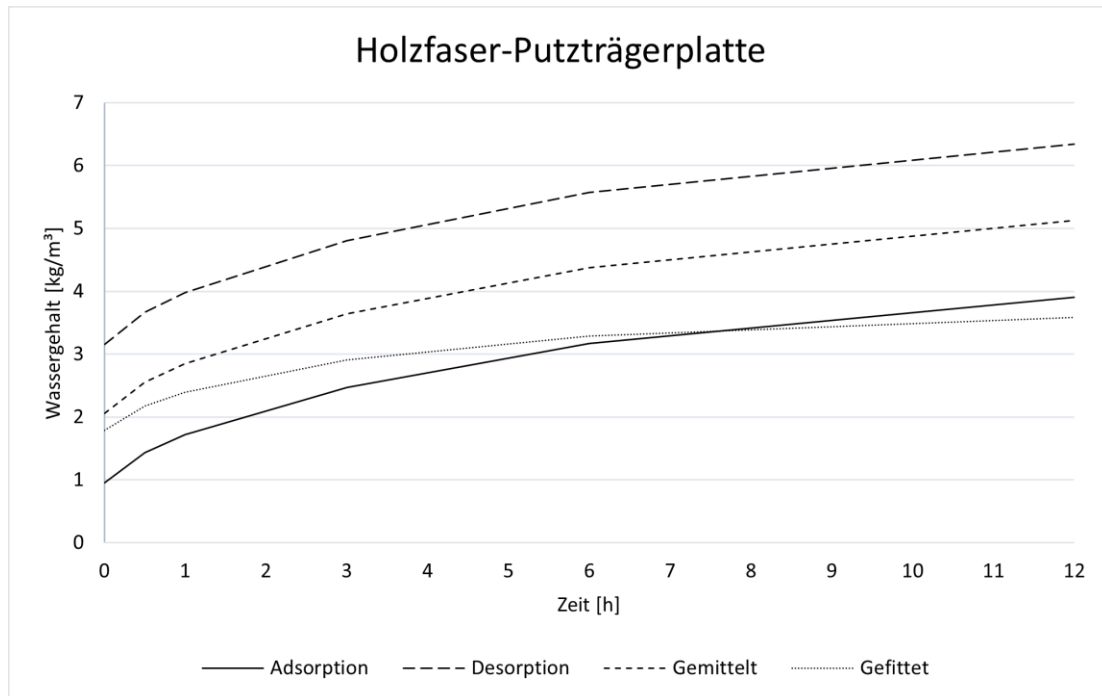


Abb. 66 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaser-Putzträgerplatte über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation

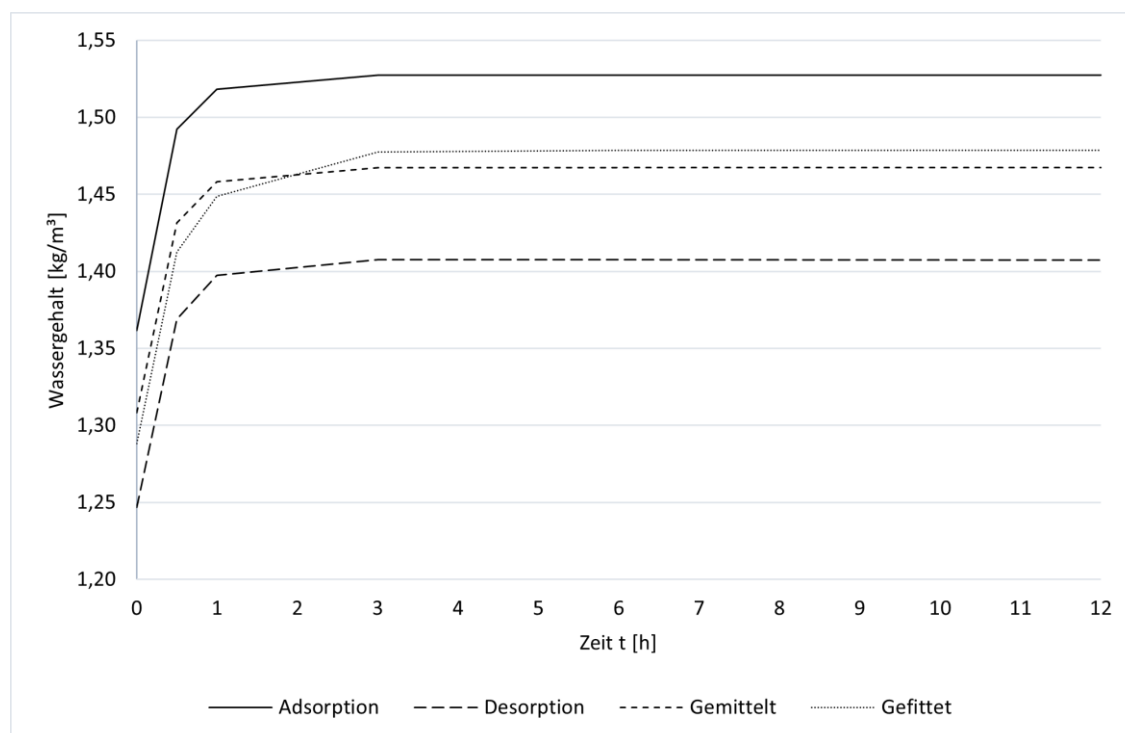


Abb. 67 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Gipskartonplatte über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation

Insgesamt zeigt sich, dass die Bestimmung der Kennwerte für die numerische Berechnungen besonders bei Baustoffen mit einer starken Hysterese problematisch sein kann. Die Empfehlung basierend auf den oben gewonnen Erkenntnissen ist, die Adsorption- als auch die Desorptionskurve zu bestimmen und mit arithmetisch gemittelten Werten aus beiden zu arbeiten. Bei Baustoffen, die bekanntermaßen kaum hysteresisches Verhalten zeigen, kann die Messung vereinfacht werden. Es ist nur die Bestimmung von einem Feuchteverlauf (Adsorption oder Desorption) notwendig.

10.3 Vorschlag zur Erzeugung verbesserter Kennwerte für die numerische Berechnung

Die in dem vorangegangenen Kapitel gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich der Sorptionsisotherme liefern die Grundlage für das weitere Vorgehen. Die gemittelte Sorptionsisotherme sowie die in Kapitel 9.1 und 9.2 ermittelten Kennwerte stellen die Grundlage für die Arbeit mit dem Simulationsprogramm dar.

Abb. 68 zeigt für Stampflehm gemessene Werte des Wassergehaltsänderung im Bauteil bei zyklisch Tagesschwankungen. Dieser steht der numerische berechnete Verlauf gegenüber, der sich unter Verwendung von aus den Kapitel 5.4 Datenbanken entnommenen Kennwerten ergibt (Numerische Berechnung - Erwartungswerte).

Außerdem ist der simulierte Verlauf dargestellt, der sich auf der Basis von Messwerten optimierten Kennwerte (Numerische Berechnung-Optimierte Kennwerte) ergibt.

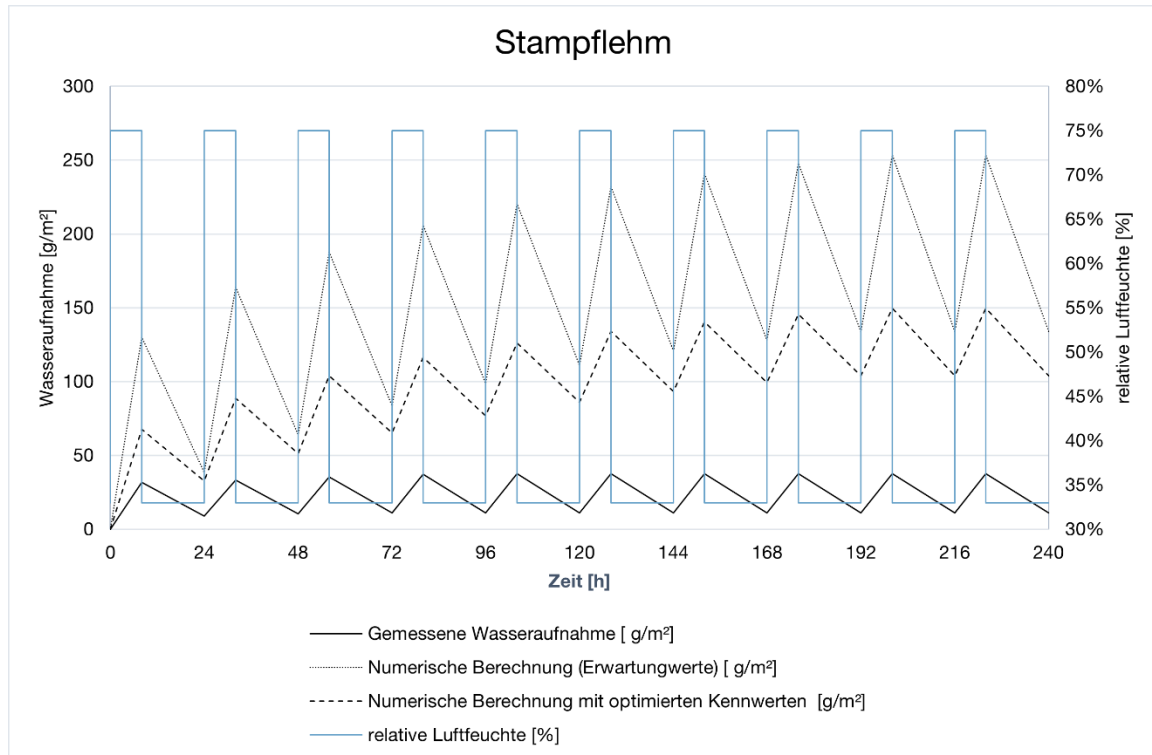


Abb. 68 – Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Stampflehm

Die Verläufe beider Simulationen liegen über dem gemessenen Verlauf. Der Grundwassergehalt, der sich einstellt, liegt bei beiden deutlich höher. Die numerische Berechnung mit den neu ermittelten Kennwerten nähert sich den gemessenen Werten aber an. Die Amplituden infolge der Tagesschwankung übertreffen bei der Standard-simulation die Amplitude der gemessenen Schwankung um ein Vielfaches. In diesem Hinblick zeigt die optimierte Simulation eine wesentlich bessere Übereinstimmung.

Die hier beschriebene Charakteristik zeigt sich bei den meisten Baustoffen. Auffällige gute und schlechte Übereinstimmungen sind Abb. 69 und Abb. 70 ersichtlich. Beim Lehmputzaufbau in Abb. 69 stimmt der mit optimierten Kennwerten berechnete Verlauf nahezu vollständig mit dem Messverlauf überein.

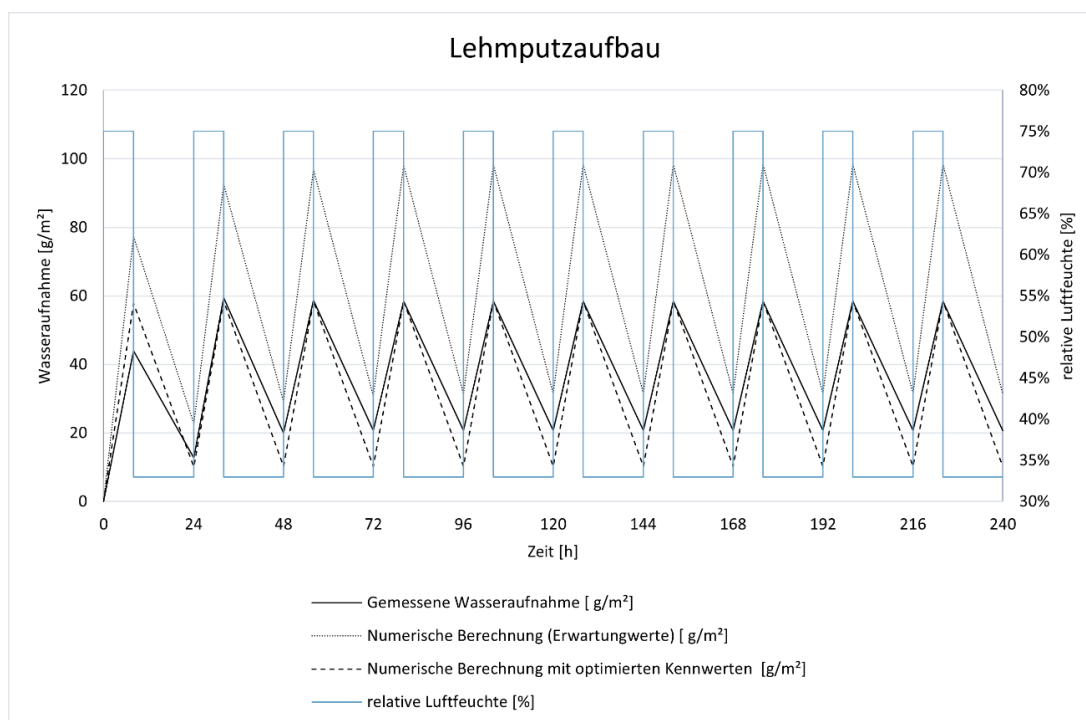


Abb. 69 - Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Lehmputzaufbau

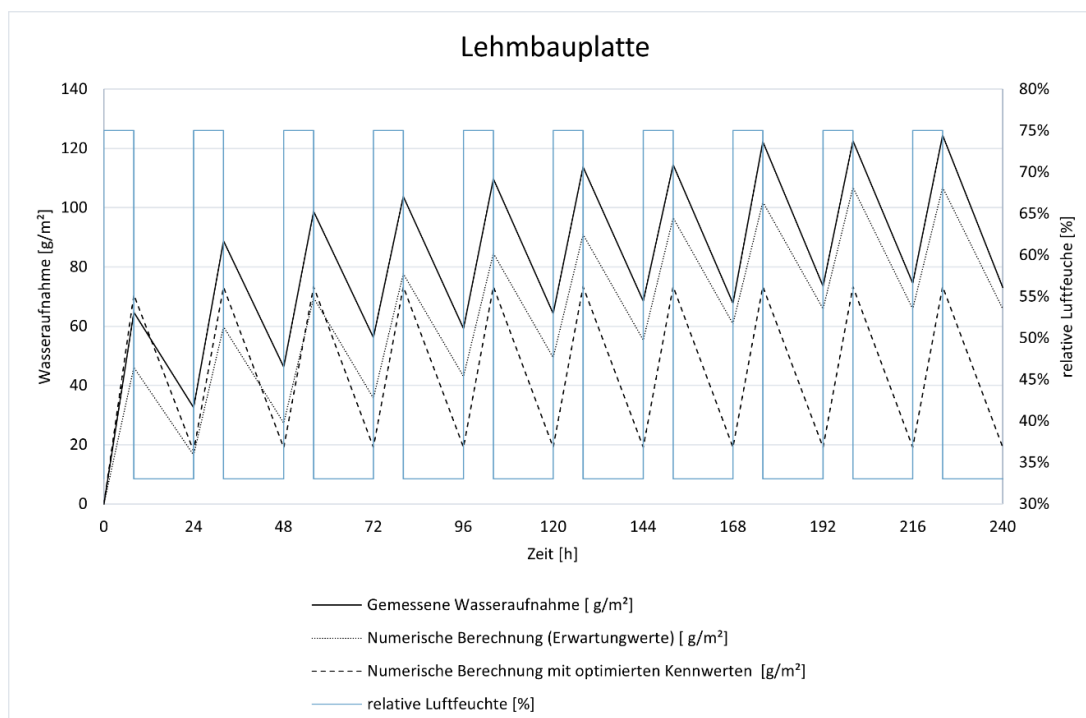


Abb. 70 - Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Lehmbauplatte

Wie in Abb. 70 für eine Lehmbauplatte ersichtlich, stimmt der mit den in Datenbanken verfügbaren Kennwerte, berechnete Verlauf mit dem gemessenen Verlauf überein. Eine größere Abweichung zeigt sich lediglich in der Amplitude. Der Verlauf des Grundwassergehaltes der Berechnung mit den optimierten Kennwerten weicht deutlich von den Messwerten ab. Dafür entspricht die Amplitude sehr gut der der Messwerte.

Unvollkommene Anpassungen und Auffälligkeiten wie sie oben dargestellt sind, erklären sich möglicherweise durch die Varianz von Parametern, die nicht beachtet werden. Es ist denkbar, dass die in der Simulation verwendeten Wärmeübergangswiderstand die Verhältnisse in den Boxen, in der wenig Luftzirkulation auftritt, unzureichend darstellen.

Wie die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 5.6 zeigt, hat die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl einen Einfluss auf die Feuchteverhältnisse im Baustoff. Diese kann aus zeitlichen Gründen nicht erfasst werden. Die Berücksichtigung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl kann möglicherweise zur weiteren Optimierung der Simulation beitragen.

10.4 Zeitliche Abhängigkeit der Feuchteaufnahme hygroskopischer Baustoffe

10.4.1 Gegenüberstellung der freie Wasseraufnahme

Abb. 71 stellt die freie Wasseraufnahme aller Holzwerkstoffe gegenüber. Bei keinem der Holzwerkstoffe wird die Messung vorzeitig abgebrochen, weil Wasser auf der, der benetzten Fläche gegenüberliegenden Oberfläche austritt. Es zeigen sich allerdings deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Verarbeitung des Materials. Die Holzfaserdämmung (weich) ist sehr saugstark, wenn sie in direktem Kontakt mit Wasser steht. Die genaue aufgenommene Wassermenge zu bestimmen erweist sich als schwierig, da beim Entfernen der Probekörper aus dem Wasserbehältnis zum Wiegen große Mengen an ungebundenem Wasser direkt wieder aus dem Probekörper auslaufen. Die gemessene Wassermenge ist folglich stark abhängig von der Probekörperbehandlung bei der Entfernung aus dem Wasser. Dies erklärt den nicht linearen Verlauf der Massezunahme von Holzfaserdämmung (weich).

Die auf Teilen der Brettsperrholzproben aufgebraute Lasur scheint nur einen kleinen Einfluss auf die freie Wasseraufnahme zu haben. Die Holzfaser-Putzträgerplatte nimmt insgesamt am wenigsten Wasser auf. Es kann somit ausgeschlossen werden, dass die freie Wasseraufnahme direkt mit der gesamt Rohdichte zusammenhängt. Vielmehr zeichnet sich ab, dass die Verarbeitungsform großen Einfluss hat. Im Vergleich zu den anderen Baustoffen zeigen die Baustoffe mit Ausnahme der Holzfaserdämmung (weich) eher eine geringe Massezunahme infolge der Wasseraufnahme.

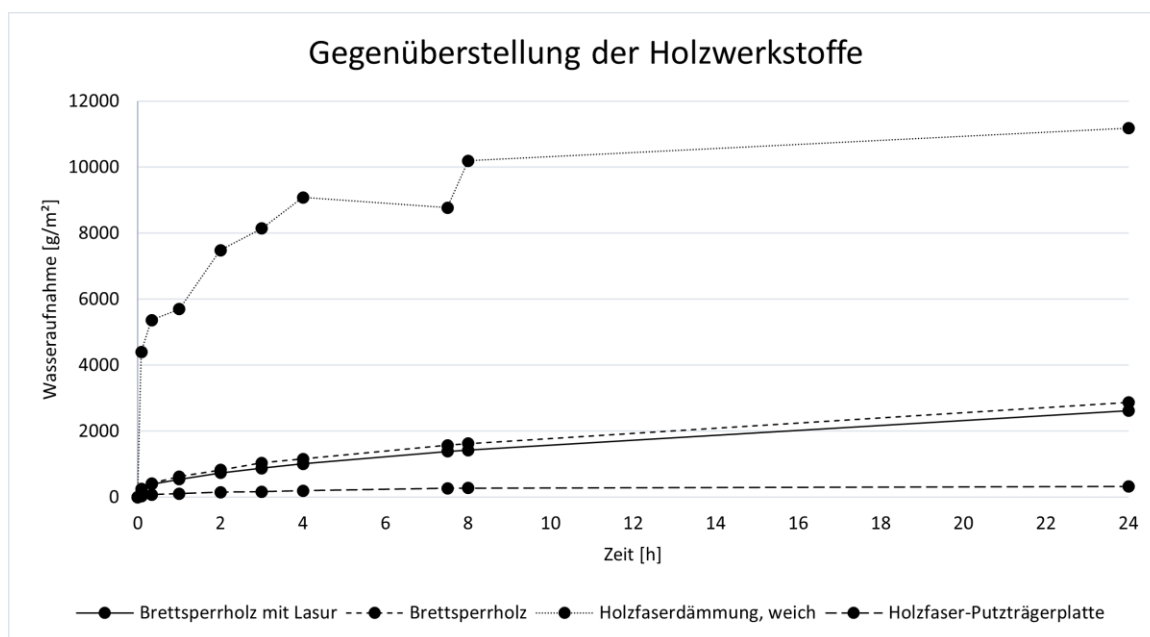


Abb. 71 - freie Wasseraufnahme von Holzwerkstoffen

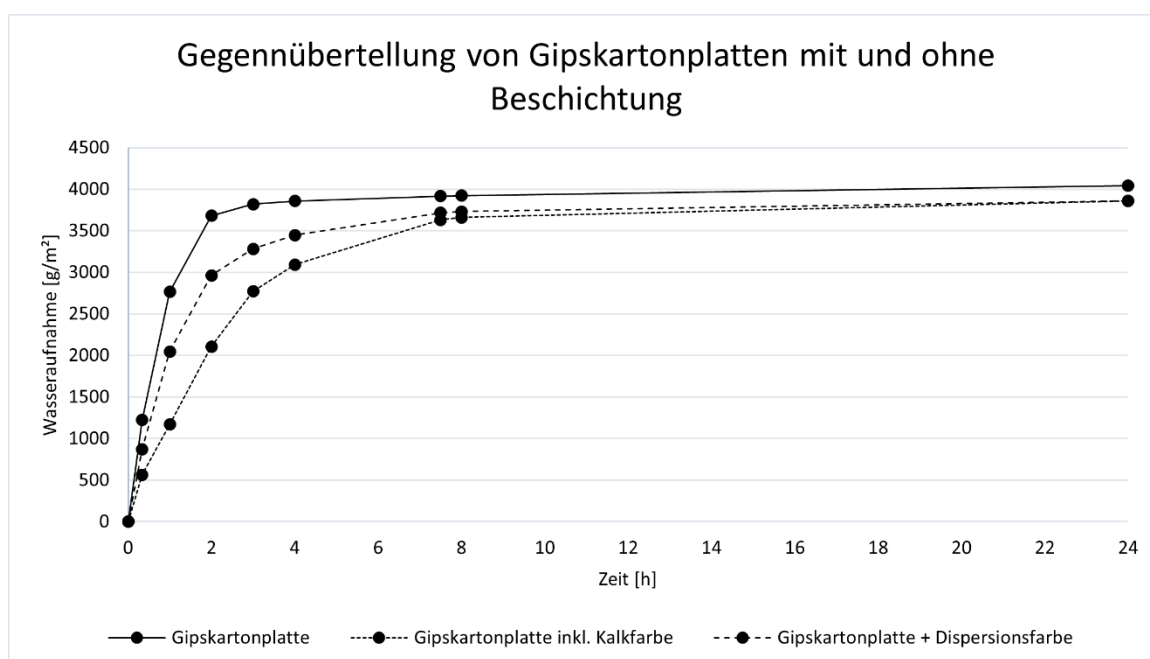


Abb. 72 - freie Wasseraufnahme von Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtungen

Die Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtungen in Abb. 72 zeigen deutlich, dass die Geschwindigkeit der freien Wasseraufnahme stark von der Oberflächengestaltung abhängt. Die Kalkfarbe scheint einen höheren S_D -Wert aufzuweisen (siehe auch Kapitel 10.4.2 und 10.4.3) und folglich wird die Wasseraufnahme stärker verzögert als bei der Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe. Die insgesamt aufgenommene freie Wassermenge gleicht sich jedoch im Verlauf der Messung stärker an.

Die Lehmstoffe nehmen das Wasser sehr schnell auf. Bereits nach fünf Minuten tritt bei nahezu allen Baustoffen bereits Wasser auf der, der benetzten Fläche gegenüberliegenden Oberfläche auf. Die Messung läuft trotzdem weiter bis zur vollständigen Durchfeuchtung des Baustoffes. Folglich muss die in Abb. 74 dargestellte Gesamtwasseraufnahme der Lehmstoffe differenziert betrachtet werden. Die Massenänderung ist durch die vollständige Durchfeuchtung auch abhängig von der Probekörperdicke. Es ist sinnvoll, zusätzlich die Massezunahme bei Sättigung in Abhängigkeit des Volumens zu betrachten, siehe hierzu Tabelle 17.

Baustoffgruppe	Baustoff	Volumenbezogene Massezunahme [kg/m ³]
Lehmwerkstoffe	Lehmputzaufbau	363,42
	Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz	553,44
	Lehmbauplatte	523,57
	Stampflehm	276,61

Tabelle 17 - Volumenbezogene Massezunahme infolge der freien Wasseraufnahme von Lehmwerkstoffen

Die Lehmbauplatte mit Designputz zeigt einen leicht verzögerten Masseanstieg infolge der Oberflächengestaltung. Ihre höhere Gesamtwassermenge ist auf die zusätzliche Probekörperdicke infolge des Putzes (3 mm) zurückzuführen.

Alle Lehmstoffe verlieren durch die große Feuchteaufnahme ihre Stabilität. Es löst sich Material aus den Proben und die Formstabilität ist nicht mehr gegeben, sodass sie sich bereits durch leichten Druck verformen lassen (Abb. 73).



Abb. 73 - Formverlust bei vollständig durchfeuchteten Lehmwerkstoffen

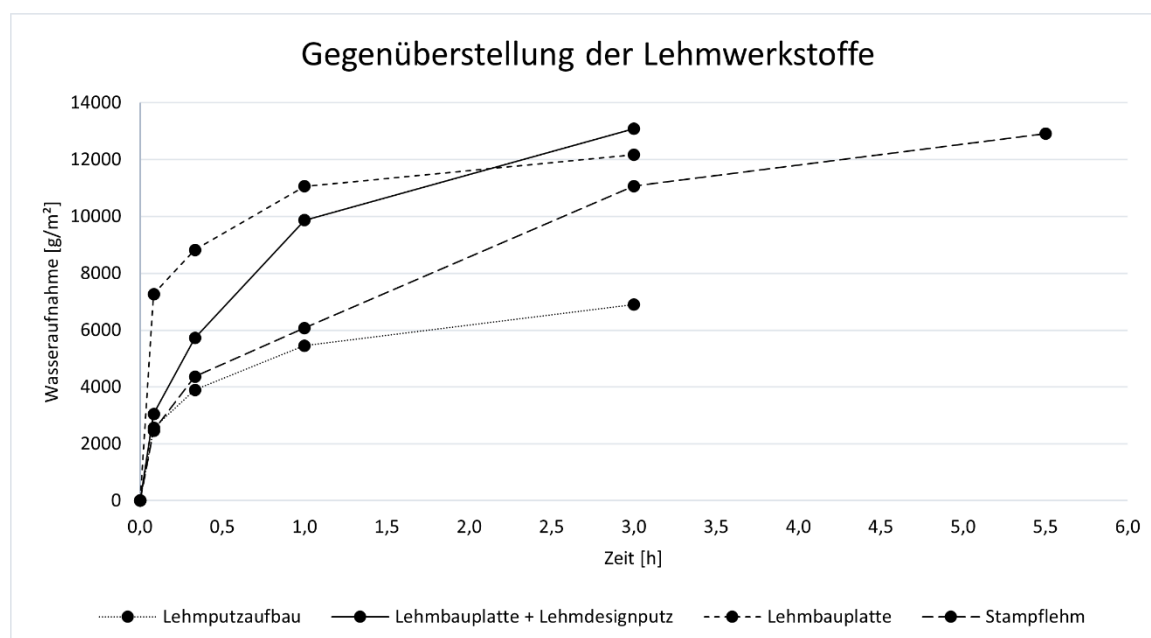


Abb. 74 - freie Wasseraufnahme von Lehmbaustoffen

10.4.2 Gegenüberstellung der dynamische Sorptionsfähigkeit

Die Massezunahme infolge des Feuchtesprungs verläuft bei allen Baustoffen ähnlich. Sie unterscheiden sich nur in ihrer insgesamt aufgenommenen Wassermenge. An den Kurvenformen zeigt sich, dass der Hauptanteil der gesamthaft aufgenommenen Wassermenge innerhalb von wenigen Stunden erfolgt. Beschichtungen scheinen die Feuchtaufnahme in diesen Stunden zu hemmen.

In der Abb. 75 sind die verschiedenen Holzwerkstoffe gegenübergestellt. Bei den Brettsperrholzprobekörpern zeigt die Lasur eine leichte Verzögerung bezüglich der Feuchtaufnahme, die sich aber im Verlauf der Messdauer nahezu ausgleicht. Es zeigt sich, dass die Feuchtaufnahme auch abhängig von der vorherrschenden relativen Luftfeuchte ist. Die Holzfaserdämmung (weich) nimmt zwar wie in Kapitel 10.4.1 weiterhin am meisten Feuchte auf, die in Abb. 75 ersichtlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Holzwerkstoffe sind allerdings weniger gravierend als in Abb. 71. Die Holzfaser-Putzträgerplatte zeigt, entgegen der in Kapitel 10.4.1 beobachteter Wasseraufnahme, eine schnellere und höhere Feuchtaufnahme bei 80 % relative Luftfeuchte als die Brettsperrholzkörper.

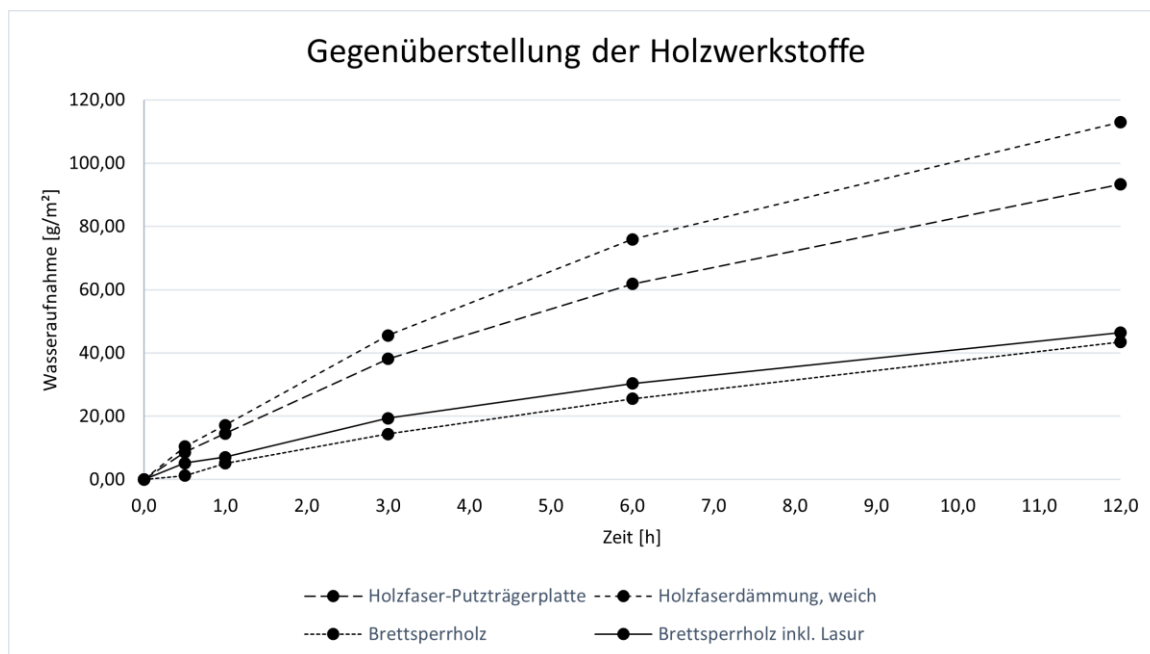


Abb. 75 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Holzwerkstoffen

Bei den Lehmwerkstoffen (Abb. 76) zeigt sich ebenfalls, dass die Beschichtung insbesondere in den ersten Stunden Einfluss auf die Massezunahme hat. Der Lehmdesignputz verlangsamt die Feuchtaufnahme deutlich. Der Lehmputzaufbau mit Designputz und die Lehmbauplatte mit Designputz scheinen nach einem anfänglichen Unterschied parallel zu verlaufen. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die Lehmdesignputz die Geschwindigkeit der Feuchtaufnahme maßgeblich beeinflusst.

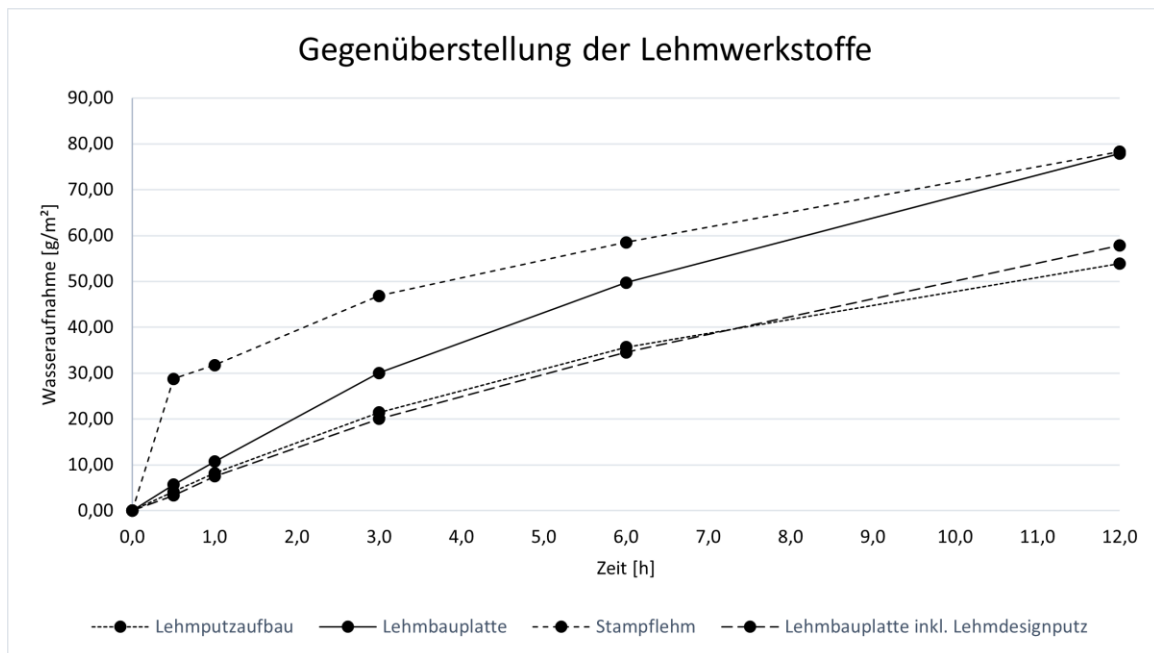


Abb. 76 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Lehmwerkstoffen

Bei den Gipskartonplatten in Abb. 77 hemmt die Kalkfarbe den Feuchteanstieg stärker als die Dispersionsfarbe. Dies kann ein Hinweis auf einen höheren aufsummierten S_D -Wert der Kalkfarbe inklusive Grundierung sein.

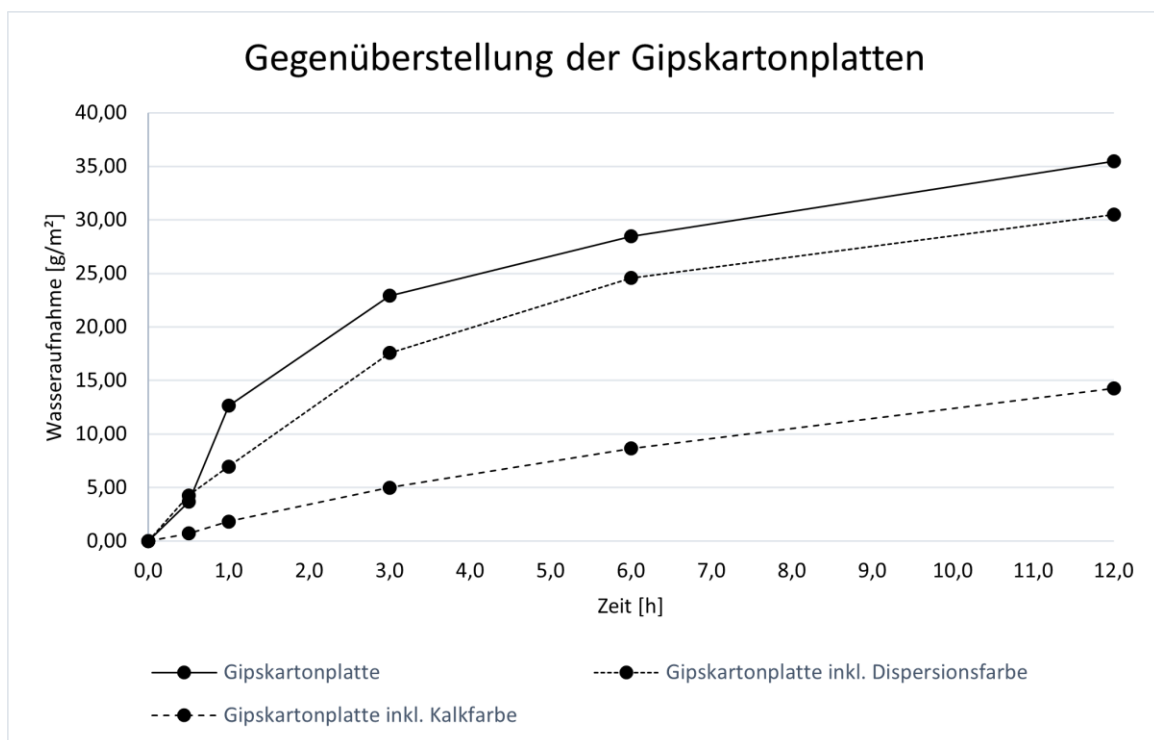


Abb. 77 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Gipskartonplatten

10.4.3 Gegenüberstellung der Feuchtepufferwirkung

Im Rahmen des Nordtest Protocols wurde die Messung des Feuchtepufferwerts für eine Gipskartonplatte an unterschiedlichen Standorten und mit verschiedenen, möglichen Messaufbauten durchgeführt (Round Robin Test) [34]. Für den in Kapitel 8.5 beschriebenen Messaufbau resultierte in dem Round Robin Test ein Feuchtepufferwert von 0,70. Die Messungen in Kapitel 9.4 ergeben für die unbeschichtete Gipskartonplatte einen Feuchtepufferwert von 0,73 kg/m²·%RH. Das entspricht einer Abweichung von rund 4 % gegenüber dem Round Robin Test-Resultat für einen ähnlichen Messaufbau. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Messaufbau damit ausreichend genaue Resultate liefert. Einzige Einschränkung ist die leicht ansteigende relative Luftfeuchte infolge des Öffnens der Klimaboxen. Zu Beginn liegen die relativen Luftfeuchten bei 34 % und 76 %. Im Verlauf der Messung über zehn Tage steigen diese auf maximal 39 % und 79 % an.

Die in Kapitel 9.4 ermittelten Feuchteverläufe infolge der tageszyklisch auftretenden Feuchtesprünge, bestätigen die von Ramos et al. [56] für Gipskartonplatten gewonnenen Erkenntnisse. Durch die Beschichtung nimmt die Amplitude des Wassergehaltes und damit die Feuchtepufferzahl deutlich ab. Eine unbehandelte Gipskartonplatte weist einen Feuchtpufferwert von 0,73 kg/m²·%RH auf gegenüber 0,49 kg/m²·%RH für eine Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe beziehungsweise 0,20 kg/m²·%RH für eine mit Grundierung und Kalkfarbe. Der in der Literatur vorgeschlagene S_D-Wert für eine Dispersionsfarbe liegt normalerweise höher als der einer Kalkfarbe [77]. Dem widersprechen die in Abb. 78 gezeigten Feuchteverläufe.

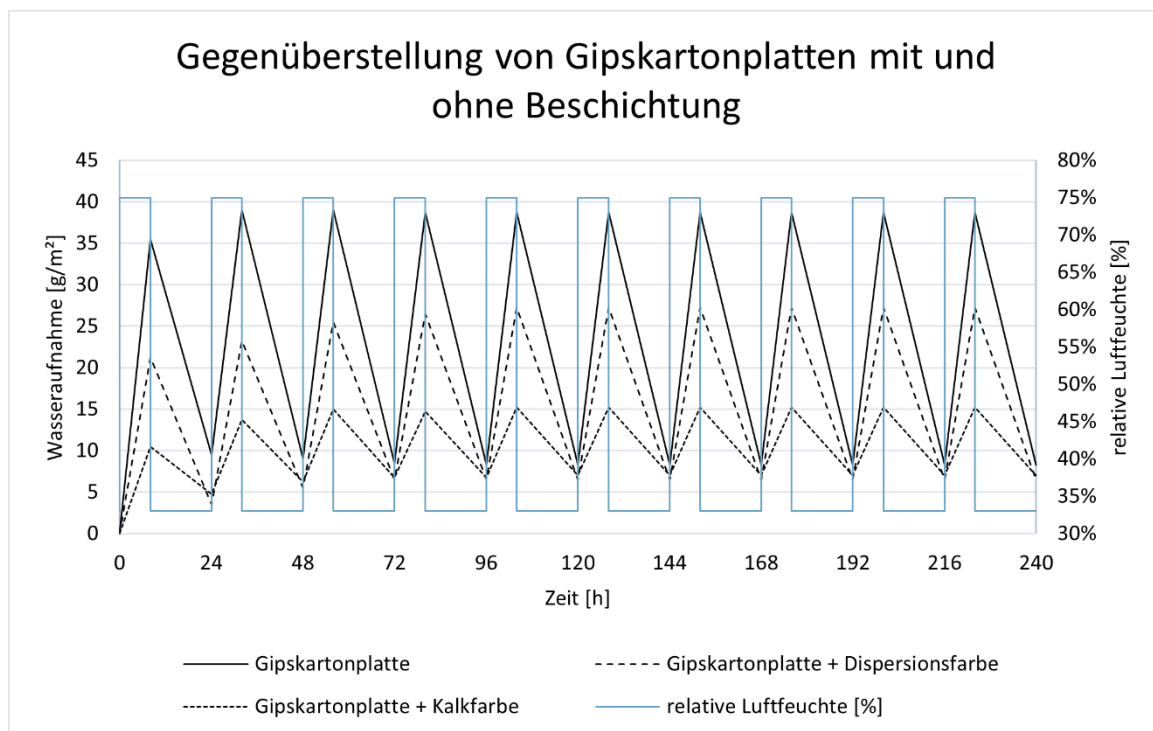


Abb. 78- Vergleich der Massezunahme von Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtung

Die Amplitude der Gipskartonplatte mit Kalkfarbe ist deutlich kleiner als die der Dispersionsfarbe. Ausschlaggebend hierfür kann die verwendete Grundierung sein. Als Grundierung für die Gipskartonplatte kam eine handelsüblicher Tiefengrund ohne speziell ausgewiesenen S_D -Wert zum Einsatz, während als Vorbereitung für die Kalkfarbe eine Grundierung mit einem S_D -Wert von $< 0,17$ m zum Einsatz kam. Diese weist einen deutlich höheren Widerstand auf. Ramos et al. zeigen in ihrer Arbeit, dass der Einfluss der Grundierung nicht unerheblich sein kann.

Die in vorangegangenen Forschungen gewonnenen Erkenntnissen zum Einfluss der Beschichtung auf die Feuchtepufferwirkung einer Gipskartonplatte lassen sich auf neue Baustoffe übertragen. Wie in Abb. 79 ersichtlich, zeigt sich bei Brettsperrholz eine Reduktion der Wassergehaltsamplitude infolge einer aufgetragenen Holzlasur. Die Reduktion des Feuchtepufferwerts beträgt rund 13 % von 0,70 auf 0,61 kg/m²·%RH.

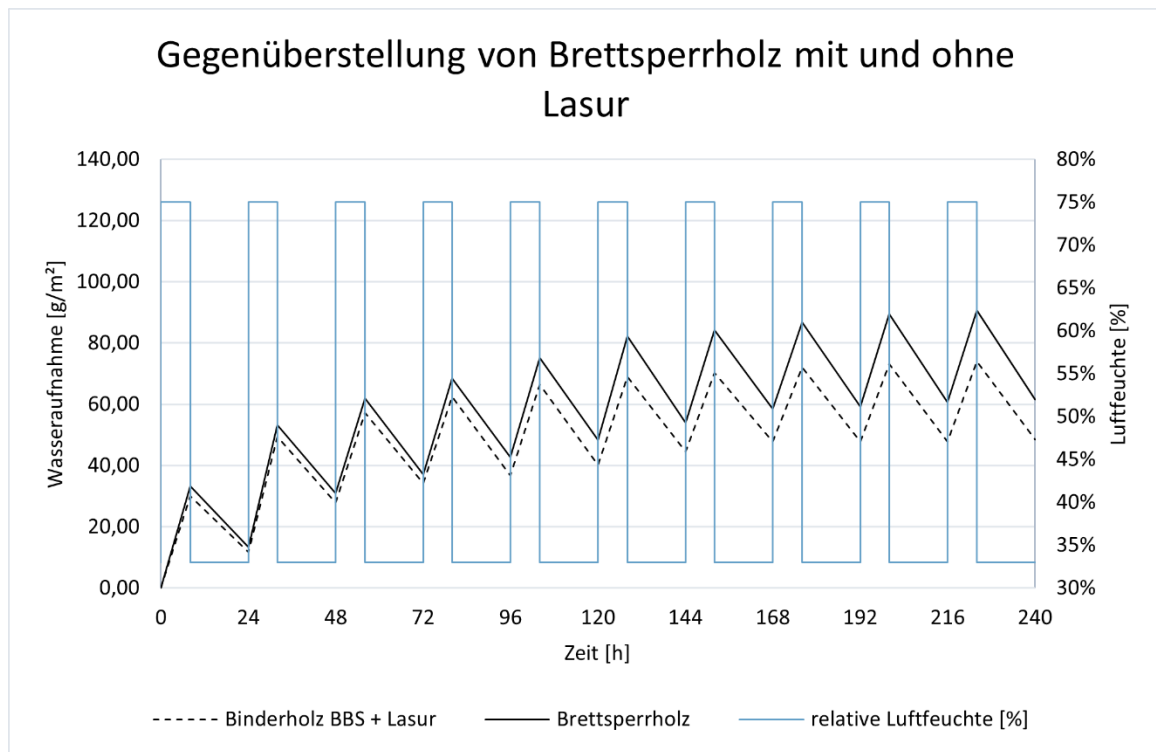


Abb. 79 – Vergleich der Massezunahme von Brettsperrholz mit und ohne Lasur

Der Einfluss der Beschichtung zeigt sich noch deutlicher beim Vergleich verschiedener Lehmwerkstoffe in Abb. 80. Die Lehmbauplatte und der Lehmputzaufbau weisen bei gleicher Beschichtung mit Designputz trotz unterschiedlicher Trägermaterialien den nahezu gleichen Feuchtepufferwert von rund $0,90 \text{ kg/m}^2 \cdot \%RH$ auf. Der Designputz scheint die resultierende Amplitude und damit den Feuchtepufferwert zu definieren. Wo hingegen die Gesamtmassezunahme vom Trägermaterial abhängig ist. Die Lehmbauplatten mit und ohne Designputz zeigen einen ähnlichen Verlauf, während die dichteren Lehmputz- und Stampflehmaufbau eine deutlich niedrigere Gesamtmassezunahme zeigen.

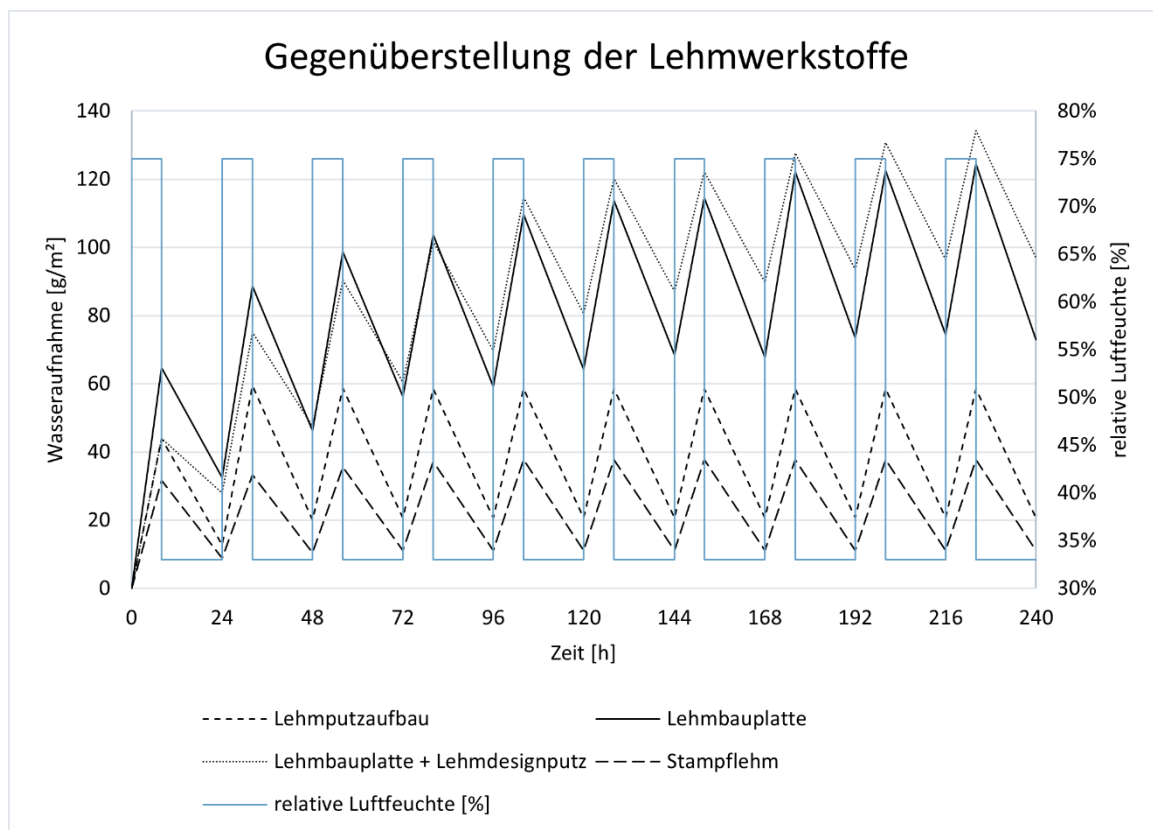


Abb. 80 – Vergleich der Massezunahme von Lehmwerkstoffe

Betrachtet man die Feuchtepufferwerte und dynamische Sorptionsfähigkeit, scheint es zwischen den beiden Verläufen einen Zusammenhang zu geben. Je schneller die Feuchte aufgenommen wird, desto höher ist die Amplitude des Feuchtepufferwerts (vergleiche Abb. 77 und Abb. 80). Das bedeutet, dass die hygrothermischen Potenziale eines Baustoffes abhängig von der dynamischen Sorptionsfähigkeit eines Baustoffes sind.

10.5 Vorschlag für ein zeitlich optimiertes Messverfahren

Für die Beurteilung der hygroskopischen Aktivität der Baustoffe haben sich alle durchgeführten Messungen als relevant erwiesen. Mit den in Kapitel 8.1 bis Kapitel 8.3 ermittelten Kennwerte lassen sich die Baustoffe für die numerische Berechnung mittels Simulationsprogrammen genauer beschreiben. Die Messungen in Kapitel 8.4 und Kapitel 8.5 charakterisieren das Baustoffverhalten bei kurzzeitig auftretenden Zyklen, deren Relevanz in Kapitel 6.4 aufgezeigt wird. Bei der Gegenüberstellung der benötigten Luftfeuchten für die einzelnen Messverfahren in Tabelle 18 fällt auf, dass alle Messungen mit den gleichen relativen Luftfeuchten auskommen. Kapitel 9.3 zeigt zusätzlich, dass sich einzelne, fehlende Messpunkte gut durch eine Regressionsanalyse ausgleichen lassen.

Relative Luftfeuchte	Sorptionsisotherme	freie Wasseraufnahme	freie Wassersättigung	dyn. Sorptionsfähigkeit	Feuchtepufferwert
Darr	✓				
33 %	✓				✓
50 %	✓	✓	✓	✓	
75 %	✓				(✓)
80 %				(✓)	
85 %	✓				
93 %	✓				
Wasser	✓	(✓)	✓		
✓ = wird bis zur Ausgleichsfeuchte gemessen; (✓) = wird gemessen					

Tabelle 18 - Gegenüberstellung der einzelnen Messverfahren

Die oben gewonnenen Erkenntnisse machen möglich, ein zeitlich optimiertes Messverfahren festzulegen. Ziel ist es, die Sorptionsisotherme nicht mehr eigenständig bestimmen zu müssen, da diese Messung sehr zeitaufwändig ist. Um eine einheitliche Basis für alle Messungen zu schaffen, ist es notwendig, nach Abschluss der Messungen alle Probestücke aller Messverfahren zu darren. Das Vorgehen wird in Abb. 81 dargestellt.

Durch Verlängerungen der Messdauer und leichten Anpassungen bei der Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit, dem Feuchtepufferwert und der freien Wasseraufnahme können die vorhin nur in Abhängigkeit der Zeit gemessenen Feuchten auch als Ausgleichsfeuchten gemessen werden (siehe linke Seite Abb. 81). Dafür wird bei allen drei Messungen anschließend an die reguläre Messdauer, die höhere Luftfeuchte (oder im Falle der freien Wassersättigung, die Exposition zu Wasser) konstant gehalten, bis die

Ausgleichsfeuchte erreicht ist. Alternativ kann die Ausgleichsfeuchte auch aus den vorgängig beobachteten Messwerten mittels Regressionsanalyse errechnet werden. Alle so berechneten Ausgleichsfeuchten befinden sich auf der Adsorptionskurve. Der Messpunkt auf der Sorptionsisotherme bei 85 % relative Luftfeuchte wird ersetzt durch 80 % relative Luftfeuchte. Anschließend werden alle Baustoffe gedarrt. Das Darrgewicht wird als gleich angenommen für alle Messverfahren. Dadurch lassen sich unterschiedliche Probengrößen umrechnen und alle bestimmten Messpunkte auf eine Probengröße beziehen. Weist der Baustoff ein hysteretisches Verhalten auf, kann die zusätzliche Bestimmung der Desorptionskurve notwendig sein. Die Kurve ist mithilfe der Kurvenform der Adsorptionskurve und einem auf der Desorptionskurve liegenden Messpunkt ausreichend bestimmbar.

Im Optimalfall reduziert sich der Zeitaufwand für die Messungen drastisch. Es gibt direkte Zeitersparnisse, da die doppelte Messung von Messpunkten wegfällt. Zusätzlich sind indirekte Zeitersparnisse möglich, da es durch die Reduktion der zu tätigen Messungen zu weniger Zeitverzögerungen infolge der eingeschränkten Platzverhältnisse kommt.

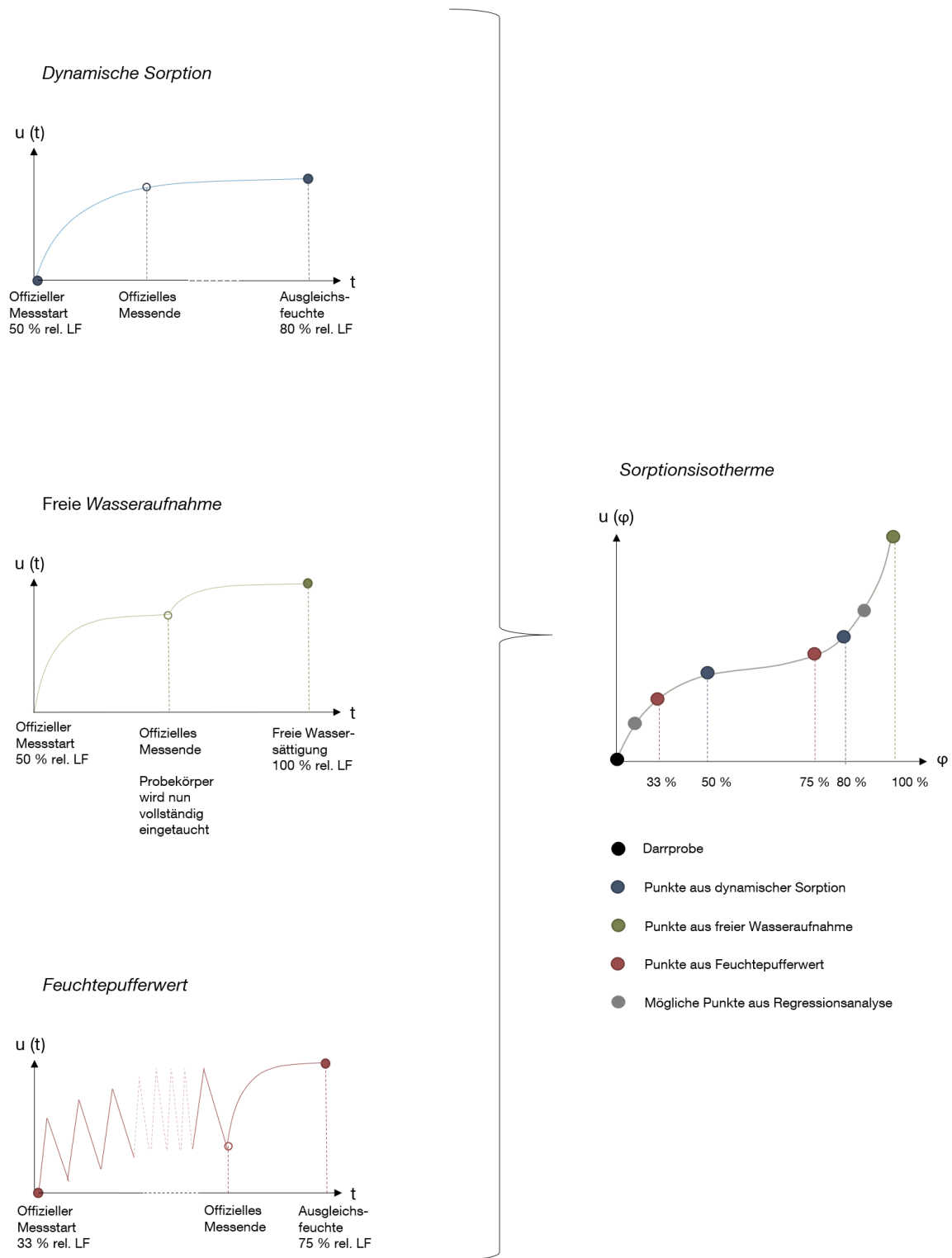


Abb. 81 - Vorgehen beim optimierten Messverfahren

11 Fazit

Insgesamt zeigt sich, dass die genaue Bestimmung der Kennwerte die Aussagekraft von numerisch berechneten Wärme- und Feuchteverläufen in Bauteilen deutlich verstärken kann. Ein Teil der Messungen zur Bestimmung der Kennwerte, wie beispielsweise die Bestimmung der Ad- und Desorptionsisotherme, sind aber sehr zeitaufwändig. Bestehende Materialdatensätze und vorgängig bekannte Kennwerte können helfen die notwendigen Messungen einzuschränken. Dadurch lässt sich die Anzahl der zu bestimmenden Messpunkte und damit unter Umständen die Messdauer drastisch reduzieren. Weisen Baustoffe beispielsweise kein hysteresisches Verhalten auf, halbieren sich die zu messenden Werte für die Sorptionsisotherme, da die Ad- und Desorption deckungsgleich sind und nur einer der Verläufe bestimmt werden muss.

Sind mehrere Messungen und Versuche geplant, lohnt es sich allfällige Überschneidungen in den Messungen zu identifizieren. Kapitel 10.5 zeigt, dass mittels kleiner Adaptionen in anderen Messverfahren bereits ein großer Teil der Sorptionsisotherme abgedeckt werden kann. Zeigt eine Messung zudem einen klaren Kurvenverlauf oder sind bereits Approximationsverfahren zur Bestimmung der Kurvenform vorhanden, lassen sich fehlende oder weitere Messpunkte zuverlässig mit einer Regressionsanalyse ermitteln.

Die Voruntersuchungen im Kapitel 6.4 zeigten, dass möglicherweise kurzzeitige Feuchteschwankungen für einen Großteil der gesamten Wasseraufnahme und -abgabe in einem Baustoff verantwortlich sind. Diese lassen sich mit den bekannten Kennwerten oftmals nur unzureichend abbilden. Hinsichtlich hygroskopischer Potenziale können aber gerade diese Schwankungen von Bedeutung sein. Die zusätzliche Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit und des Feuchtepufferwert ermöglicht es die Baustoffe unter dem Betrachtungspunkt von Tagesschwankungen und einmaligen Feuchtesprüngen einzuordnen und zu vergleichen. Zwischen den beiden Kennwerten besteht innerhalb einer Baustoffgruppe ein direkter Zusammenhang. Je schneller die Materialfeuchte in einem Baustoff durch einen Feuchtesprung zunimmt, desto größer ist seine Feuchtepufferzahl.

Die Ergebnisse von Ramos et al. [56], die einen deutlichen Einfluss der Beschichtungen auf die Amplitude der Materialfeuchte in Abhängigkeit zum Innenraumbtageszyklus belegen, lassen sich bestätigen. Designputze, Farben und Grundierungen senken den Feuchtepufferwert und verlangsamen die Feuchteaufnahme nach einem Feuchtesprung. Dies mindert auch die in Kapitel 4.2 und 4.3 beschriebenen hygroskopischen Potenziale. Im Fall eines Lehmdesignputzes zeigt sich, dass das Trägermaterial nahezu keinen Einfluss auf die Feuchtepufferzahl hat.

Zusätzlich gestaltet sich eine Prognose der tatsächlich auftretenden Materialfeuchten in beschichteten Baustoffen schwieriger als in unbeschichteten. Das Aufbringen der Beschichtung erfolgt normalerweise händisch, wodurch eine zusätzliche Inhomogenität verursacht wird. Die genaue Schichtdicke und der davon abhängige S_D -Wert, welcher zur Abbildung der Beschichtung in der numerischen Berechnung herangezogen wird, sind nur unzureichend bestimmbar.

12 Ausblick

Die Zuverlässigkeit der in dieser Arbeit ermittelten Messwerte lässt sich mit einer Kreuzvalidierung errechnen. Sind die Daten genügend zuverlässig können diese verwendet werden, um das in Kapitel 10.5 beschriebene optimierte Messverfahren zu prüfen. Durch den Vergleich der validierten Messwerte mit einer Beispielmessung nach dem beschriebenen Messverfahren lässt sich aussagen, ob das optimierte Messverfahren die gewünschten Messresultate liefert.

Für abschließende Aussagen über das Potenzial von hygroskopisch aktiven Baustoffen und ihrer Abbildung in numerischen Berechnungen sind noch zusätzliche Untersuchungen des Wasserdampfdiffusionswiderstands und des Wärmeübergangswiderstand notwendig. Die validierten oder neu bestimmten Wasserdampfdiffusionswiderstände können helfen die numerisch berechneten Wärme- und Feuchteverläufe im Material realitätsnäher abzubilden. Der Wärmeübergangswiderstand ist eine Randbedingung der numerischen Simulation. Wie im Kapitel 11 beschrieben ist die Innenoberflächengestaltung maßgebend für die Feuchtepufferzahl. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass der innenseitige Wärmeübergangswiderstand Einfluss auf das Feuchtepufferpotenzial nehmen kann.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Beschichtungen und ihren Einfluss auf die Materialfeuchte bieten Potenzial für eine weitere Vertiefung. Es ist zu prüfen, ob die Annahme, dass das Trägermaterial kaum Einfluss auf die Feuchtepufferung hat, sich auch auf andere Baustoffe übertragen lässt.

Hinsichtlich der hygroskopischen Baustoffe ist zudem zu prüfen, welchen Einfluss kurzzeitige Feuchtespitzen mit großen Feuchtesprüngen, wie sie in Koch- oder Duschkzyklen vorkommen, auf die Baustoffe haben.

Literaturverzeichnis

- [1] *Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen und Definitionen*, DIN EN ISO 7345, 2018.
- [2] *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen für den Stofftransport - Begriffe*, DIN EN ISO 9346, 2007.
- [3] J. P. D. Abbatt und C. Wang, „The atmospheric chemistry of indoor environments“, 2019.
- [4] P. O. Fanger, *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*, 1970.
- [5] K. Lenz, M. Krus und A. Holm, „Feuchtepufferverhalten von Innenraum-Materialien in Holz“, Massivholz- und Blockhaustag 2005, Rosenheim, 2005.
- [6] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*, DIN 4108-3.
- [7] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz und C. Pout, „A review on buildings energy consumption information“, *Energy and Buildings* 40 (2008), 394-398, 2007.
- [8] O. F. Osanyintola und C. J. Simonson, „Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact“, *Energy and Buildings* 38, 1270 - 1282, 2006.
- [9] J. M.P.Q. Delgado, E. Barreira, N. M.M. Ramos und V. Peixoto de Freitas, *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*, 2013.
[Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35003-0>
- [10] O. Kornadt *et al.*, „Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierten Massivholzelemente: Forschungsinitiative ZukunftBAU“.
- [11] D. Briels, „PhyTAB | Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile: Einführung“.
- [12] Lehrstuhl für Gebäudetechnik und klimagerechtes Bauen, *PhyTAB, Potenziale hygrothermisch aktivierter Bauteile - Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierter Oberflächen*.
[Online]. Verfügbar unter: <https://www.ar.tum.de/klima/forschung/laufende->

- forschungsprojekte/hygrothermisch-aktivierte-bauteile/ (Zugriff am: 11. November 2019).
- [13] K. Gertis und T. Schmidt, *Zur Ermittlung der Sorptionsenthalpie von Baustoffen*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2015.
- [14] N. Flexeder, „Hygrothermisches Baustoffverhalten: Sensitivitätsanalyse des hygrothermischen Verhaltens von natürlichen und konventionellen Baustoffen auf das Raumklima“.
- [15] J. Hedderich und L. Sachs, *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*, 15. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.
- [16] R. Wernecke, *Industrielle Feuchtemessung: Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen*, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/3527602690>
- [17] K. Kupfer, *Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen ; mit 19 Tabellen und 386 Literaturstellen*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl., 1997.
- [18] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [19] H.-M. Fischer, Hg., *Lehrbuch der Bauphysik: Schall — Wärme — Feuchte — Licht — Brand — Klima*, 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [20] K. Schild und W. M. Willems, *Wärmeschutz: Grundlagen - Berechnung - Bewertung*, 2. Aufl., 2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02571-7>
- [21] W. M. Willems, K. Schild und D. Stricker, *Feuchteschutz: Grundlagen - Berechnungen - Details*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [22] P. Häupl *et al.*, *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [23] M. Krus, „Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe.: Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken“, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 1995.
- [24] O. Krischer und W. Kast, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, 3. Aufl., 1978.

- [25] D. A. Rose, „Water movement in unsaturated porous materials“, *Rilem Bulletin* No. 29, S. 119-123, 1965.
- [26] K. S. W. Sing und et al., „Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity“, *Pure Appl. Chem*, Band 57, 1985.
- [27] *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*, DIN EN 15148:2002 + A1:2016.
- [28] P. Niemz und W. U. Sonderegger, *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.3139/9783446445468>
- [29] Informationsdienst Holz, Hg., „Holzschutz: Bauliche Maßnahmen“, *holzbau handbuch* | Reihe 5 | Teil 2 | Folge 2.
- [30] P. Niemz, *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/116599> (Zugriff am: 14. Oktober 2020).
- [31] H. M. Künzel, *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Stuttgart, Univ., Diss., 1994, 1994.
- [32] H. M. Künzel, „Raumluftverhältnisse in Wohnräumen: IBP-Mitteilung 314“.
- [33] *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten*, Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016.
- [34] C. Rode et al., „NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials“, AIVC 26th conference: Ventilation in relation to the energy performance of buildings. Air Infiltration and Ventilation (pp. 47-52). INIVE eieg.
- [35] K. Sedlbauer und T. Gabrio, *Schimmelpilze und Beurteilungsklassen zur Gesundheitsgefährdung*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2002.
- [36] W. M. Willems, *Vieweg-Handbuch Bauphysik*, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [37] I. Langmuir, „The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum“, *The Journal of the American Chemical Society* 40:1361-1403, 1918.
- [38] S. Brunauer, P. H. Emmett und E. Teller, „Adsorption of Gases on Multimolecular Layers“, *The Journal of the American Chemical Society* 2:308-319, 1938.

- [39] W. Kast, *Adsorption aus der Gasphase: Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren*. Weinheim u.a.: VCH-Verl.-Ges, 1988.
- [40] M. Krus und A. H. Holm, „Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte“, Fraunhofer IBP, 1999.
- [41] E. O. Timmermann, „Multilayer sorption parameters: BET or GAB values?“, *Colloids Surf, A, Physicochem Eng Asp* 220: S. 235-260.
- [42] J.-W. Rhim und J. H. Lee, „Thermodynamic Analysis of Water Vapor Sorptions Isotherms and Mechanical Properties of Selected Paper-Based Food Packaging“ 74:502-511, 2009.
- [43] Ł. Bratasz, A. Kozłowska und R. Kozłowski, „Analysis of water adsorption by wood using the Guggenheim-Anderson-de Boer equation“, 2011. [Online]. Verfügbar unter:
file:///C:/Users/marin/AppData/Local/Temp/Bratasz2012_Article_AnalysisOfWaterAdsorptionByWoo-2.pdf. Zugriff am: 14. Oktober 2020.
- [44] A. Kupczak, Ł. Bratasz, Krysiak-Czerwenka Joanna und Kozłowski Roman, „Moisture sorption and diffusion in historical cellulose-based materials“, *Cellulose* 25, 2873-2884, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1772-9>.
- [45] J. Berger, T. Busser, D. Dutykh und N. Mendes, „An efficient method to estimate sorption isotherm curve coefficients“, 2018.
- [46] P. O. Fanger, *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*, 1970.
- [47] C. G. Bornehag *et al.*, „Dampness in buildings and health: Nordic inter-disciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to “dampness” in buildings and health effects (NORDDAMP)“, *Indoor Air* 2001, 11(2): S. 72 - 86, 2001.
- [48] C. Hunter und C. Sanders, „Mould.: IEA Annex XIV: Condensation and Energy, Vol. 1.“, International Energy Agency; Leuven University, 1991.
- [49] O. F. Osanyintola und C. J. Simonson, „Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact“, Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, 2006.
- [50] H.-J. Kim, S.-S. Kim, Y.-G. Lee und K.-D. Song, „The Hygric Performances of Moisture Adsorbing/Desorbing Building Materials“, Taiwan Association for Aerosol Research, 2010.

- [51] M. Zhang, M. Qin und Z. Chen, „Moisture Buffer Effect and its Impact on Indoor Environment“, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Jinan, China, 2017.
- [52] N. M. M. Ramos, J. M. P. Q. Delgado und V. P. de Freitas, „Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements“, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [53] C. (E.) Rode *et al.*, „Moisture Buffering of Building Materials: BYG Report, No. R-127“, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering., 2005.
- [54] *Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity Part 1: Response method of humidity*, 2002.
- [55] S. Roels und J. Hans, „A Comparison of the Nordtest and Japanese Test Methods for the Moisture Buffering Performance of Building Materials“, Laboratory of Building Physics, Catholic University of Leuven., Journal of Building Physics, Vol. 30, No. 2, 2006.
- [56] N. Ramos und V. Freitas, „Laboratory testing for daily hygroscopic inertia assessment.“. In: Proceedings of the 8th symposium on building physics in the Nordic Countries, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [57] K. Nore und D. Kraniotis, „Latent Heat Phenomena in Buildings and Potential Integration into Energy Balance“, International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE16, 2017.
- [58] D. Kraniotis, K. Nore, C. Brückner und A. Q. Nyrud, „Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (*Picea abies*) exposed to dynamic indoor climate“, Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, Norway, 2015.
- [59] Zirkelbach, Hg., „Hygrothermische Simulation - Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige“, 12. Internationale Baufach- und Sachverständigentagung Ausbau und Fassade, Regensburg, 2013.
- [60] Dr.-Ing. Roland Göttig, „Vorlesungsunterlagen Energieeffizientes Bauen: Studiengang Energieeffizientes und Nachhaltiges Bauen - Sommersemester 2018“, 2018.
- [61] WUFI, *Moisture Transport in Building Materials*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics> (Zugriff am: 14. Oktober 2020).

- [62] WUFI, *Erforderliche Daten zur Erstellung von Materialdatensätzen*. [Online].
Verfügbar unter: https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/AufnahmeDB_02_2017_DE.pdf (Zugriff am: 14. Oktober 2020).
- [63] M. Krus und A. Holm, „Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfache nTrocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung“, *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 1998.
- [64] M. Krus, A. Holm und T. Schmidt, „Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert“, *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*, 1997.
- [65] *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen*, DIN EN ISO 16535:2019.
- [66] A. Holm, M. Krus und H. M. Künzel, „Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbar Kennwerten: IBP - Mitteilung 406“, Fraunhofer IBP, 2002.
- [67] L. Carstensen, „Untersuchung der Auswirkungen von jahreszeitlich bedingten Feuchteänderungen auf die Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholzwänden“, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2016.
- [68] S. Henschen, „Messtechnisch und simulationsgestützte Untersuchung des instationären hygrothermischen Verhaltens von thermisch aktivierten Brettsperrholzelementen“, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2018.
- [69] C. Fitz, M. Krus und W. Zillig, „Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen: IBP-Bericht HTB-10/2004“, Fraunhofer IBP, 2004.
- [70] *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften*, DIN EN ISO 12571, 2013.
- [71] b.b.@a.d. ALUJET GmbH, "Sd-Wert des Klebebands Icutec Icusan", E-Mail, Okt. 2020.
- [72] *Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*, DIN 18947, 2018.
- [73] *Probau Dampfbremsfolie: Produkteigenschaften*.

- [74] Scantronik Mugrauer GmbH, *Hygrofox - Elektronischer Hygrothermograph und Datenlogger*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.scantronik.de/Produkt_Hygrofox_deu.php (Zugriff am: 24. Oktober 2020).
- [75] M. Schwab, *Gips – Kristallwasser als Brandschutz*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fachreferent-chemie.de/wp-content/uploads/Gipsplatten-als-Brandschutz_2.pdf (Zugriff am: 24. Oktober 2020).
- [76] t.@s.c. STEICO SE, "Sd-Wert von STEICO mult tape f und multi tape p", E-Mail, Okt. 2020.
- [77] Landkreis Hameln-Pyrmont, *Informationsblatt - Farben in der Denkmalpflege*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hameln-pyrmont.de/Wir-f%C3%BCr-Sie/Service/Dienstleistungen/index.php?La=1&NavID=2561.44&object=med,2561.301.1.PDF> (Zugriff am: 14. Oktober 2020).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - Arbeitsschritte.....	7
Abb. 2 - Schritte der Auswertung.....	8
Abb. 3 – Vorgehen bei der Regressionsanalyse	11
Abb. 4 - Vorgehen bei Analyse des Ad- und Desorptionsverhaltens.....	13
Abb. 5 - Wärmetransportvorgänge im Bauteil.....	15
Abb. 6 - Wärmetransport im Porenraum	17
Abb. 7 – Feuchtetransportmechanismen nach [20].....	19
Abb. 8 - Sorptionsbegriffe.....	21
Abb. 9 - Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung in einer Baustoffpore bei steigendem Wassergehalt nach Rose [25].....	23
Abb. 10 – Sorptionsisotherme-Typen nach Sing [26].....	24
Abb. 11 - Wasseraufnahme und -abgabe einer Holzzelle aus [29]......	26
Abb. 12 - Flussdiagramm WUFI-Simulation.....	36
Abb. 13 - Sensitivitätsanalyse der Rohdichte, Lehmputz, Innenoberflächentemperatur.....	43
Abb. 14 – Sensitivitätsanalyse der Rohdichte, Lehmputz, relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche	43
Abb. 15 - Sensitivitätsanalyse der Wärmekapazität, Zunahme der Temperatur gegenüber 100 % Wärmekapazität.....	45
Abb. 16 - Sensitivitätsanalyse der Wärmeleitfähigkeit, Lehmputz, Innenoberflächentemperatur	46
Abb. 17 - Betrachtete Brettsperrholz-Wandaufbauten.....	50
Abb. 18 - Betrachtete Holzrahmenleichtbau-Wandaufbauten	51
Abb. 19 - Betrachteter Stampflehm-Wandaufbau	52
Abb. 20 - Eingabe von Brettsperrholz in ein Simulationsprogramm	53

Abb. 21 - relative Luftfeuchte im Bauteil, monatlich gemittelt	55
Abb. 22 - relative Luftfeuchte im Bauteil, gemittelt über drei Monate.....	56
Abb. 24 - relative Luftfeuchte im Bauteil, Juli	57
Abb. 23 - relative Luftfeuchte im Bauteil, Januar.....	57
Abb. 25 -relative Luftfeuchte im Bauteil, 31. Juli	58
Abb. 26 - relative Luftfeuchte im Bauteil, 31. Januar.....	58
Abb. 27 - Analyse der jährlichen Ad- und Desorption einer Gipskartonplatte.....	60
Abb. 28 – Aufsummierte Wassermenge im Verhältnis zur jährlich aufgenommenen Wassermenge	61
Abb. 29 - Messaufbau.....	62
Abb. 30 – Messeinrichtung Klimaboxen	64
Abb. 31 - Holzfaserdämmung (weich) mit durch Klebeband versiegelten Seiten	66
Abb. 32 - Lehmbauplatte mit Designputz-Probe mit aufgebrachtem textilem Stabilisierungsmaterial	67
Abb. 33 - Versiegelte Brettsperrholzproben für die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit	69
Abb. 34 - seitlich versiegelte Gipskartonprobe mit Kalkfarbe für Feuchtepuffermessung	71
Abb. 35 - Fix installiertes Feuchte- und Temperaturmessgerät.....	73
Abb. 36 - Abweichungen der Messgeräte	74
Abb. 37 - Waage	74
Abb. 38 - Simulation des Wassergehalts in einer Holzfaserdämmung - mit minimal und maximal zulässiger Temperatur nach DIN 18947	75
Abb. 39 - Simulierter Wassergehalt in einer Holzfaserdämmung, weich - mit minimal und maximal zulässigem Feuchtesprung nach DIN 18947	76
Abb. 40 - Simulierter Wassergehalt in einer Holzfaserdämmung (weich) - Extremwerte mit zulässiger Temperatur und zulässigem Feuchtesprung nach DIN 18947	76

Abb. 41 – Verschimmelte Gipskartonplatte-Probekörper bei 99 % relative Luftfeuchte	79
Abb. 42 - Messablauf bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme.....	80
Abb. 43 - Messaufbau bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten.....	81
Abb. 44 - Messablauf bei der Bestimmung der dynamischen Sorptionsfähigkeit	83
Abb. 45 - Nordtest, Feuchtezyklus.....	83
Abb. 46 - Messablauf bei der Bestimmung der Feuchtepufferwirkung	84
Abb. 47 - Sorptionsisotherme / Gipskartonplatte	86
Abb. 48 - Sorptionsisotherme / Lehmbauplatte	86
Abb. 49 - Sorptionsisotherme / Holzfaser-Putzträgerplatte	87
Abb. 50 - freie Wasseraufnahme verschiedener Baustoffe	89
Abb. 51 - freie Wasseraufnahme / Gipskartonplatte	90
Abb. 52 - freie Wasseraufnahme / Gipskartonplatte mit Kalkfarbe.....	90
Abb. 53 - freie Wasseraufnahme / Lehmbauplatte mit und ohne Stabilisierungsgewebe	91
Abb. 54 - dynamische Sorption / Holzfaser-Putzträgerplatte.....	93
Abb. 55 - dynamische Sorption / Stampflehm	93
Abb. 56 - Regressionsanalyse bei der Holzfaser-Putzträgerplatte	94
Abb. 57 - freie Wasseraufnahme der Holzwerkstoffe	95
Abb. 58 - Feuchtepufferverhalten von einer Lehmbauplatte mit Designputz.....	96
Abb. 59 - Feuchtepufferverhalten von Stampflehm.....	97
Abb. 60 - Feuchtepufferverhalten einer Gipskartonplatte mit und ohne Beschichtung .	97
Abb. 61 - Seitliche Stabilisierung der Lehmbauplatte mit Klebeband	100
Abb. 62 - Feuchtepufferwirkung / Einwirkung des Klebebands bei Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe.....	101

Abb. 63 - Regressionsmodelle der Sorptionsisotherme, Gipskartonplatte	102
Abb. 64 – Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaserdämmung (weich) über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation	104
Abb. 65 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaserdämmung (weich) eines vereinfachten Tagesverlaufs nach dem Nordtest Protocol mittels Simulation, Holzfaserdämmung (weich).....	104
Abb. 66 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Holzfaser-Putzträgerplatte über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation	105
Abb. 67 - Darstellung der Materialfeuchteentwicklung in einer Gipskartonplatte über 12 Stunden bei einem relativen Luftfeuchtesprungs von 50 % auf 80 % mittels Simulation	106
Abb. 68 – Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Stampflehm.....	107
Abb. 69 - Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Lehmputzaufbau	108
Abb. 70 – Gegenüberstellung der numerisch ermittelten und gemessenen Feuchtepufferwirkung von Lehmbauplatte	108
Abb. 71 - freie Wasseraufnahme von Holzwerkstoffen.....	110
Abb. 72 - freie Wasseraufnahme von Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtungen	110
Abb. 73 - Formverlust bei vollständig durchfeuchteten Lehmwerkstoffen.....	112
Abb. 74 - freie Wasseraufnahme von Lehmbaustoffen.....	112
Abb. 75 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Holzwerkstoffen	113
Abb. 76 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Lehmwerkstoffen.....	114
Abb. 77 - dynamische Sorptionsfähigkeit von Gipskartonplatten.....	114
Abb. 78- Vergleich der Massezunahme von Gipskartonplatten mit und ohne Beschichtung	116

Abb. 79 – Vergleich der Massezunahme von Brettsperrholz mit und ohne Lasur.....	117
Abb. 80 – Vergleich der Massezunahme von Lehmwerkstoffe	118
Abb. 81 - Vorgehen beim optimierten Messverfahren	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Feuchtespeichermechanismus [22]	21
Tabelle 2 - Zu bestimmende Kennwerte der Baustoffgruppen A und D	38
Tabelle 3 - Bandbreite der Kennwerte für eine Gipskartonplatte in den Datenbanken ..	40
Tabelle 4 - Parameter Sensitivitätsanalyse, Lehmputz	42
Tabelle 5 - Benötigte Messwerte für die numerische Berechnung	47
Tabelle 6 - Untersuchte Baustoffe.....	59
Tabelle 7 - Salze zur Herstellung der relativen Luftfeuchten.....	63
Tabelle 8 - Formate für Sorptionsisotherme	65
Tabelle 9 - Formate für die Messung der freien Wasseraufnahme	68
Tabelle 10 - Formate für die Messung der dynamischen Sorptionsfähigkeit	70
Tabelle 11 – Formate für die Messung der Feuchtepufferwirkung.....	72
Tabelle 12 - Übersicht der gemessenen Probekörpern und relativen Luftfeuchten zur Bestimmung der Sorptionsisotherme.....	78
Tabelle 13 – Rohdichten.....	88
Tabelle 14 - Wasseraufnahmekoeffizienten	92
Tabelle 15 – Verwendete Regressionsmodell	94
Tabelle 16 - Feuchtepufferwerte der untersuchten Baustoffe.....	98
Tabelle 17 - Volumenbezogene Massezunahme infolge der freien Wasseraufnahme von Lehmwerkstoffen	111
Tabelle 18 - Gegenüberstellung der einzelnen Messverfahren	119

Formelverzeichnis

Formel 1 – Standardabweichung	9
Formel 2 – Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK].....	16
Formel 3 - Wärmestromdichte q [W/m ²].....	16
Formel 4 - Wärmeübergangswiderstand [m ² K/W]	16
Formel 5 – Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m ² K].....	17
Formel 6 - Spezifische Wärmekapazität.....	18
Formel 7 - relative Luftfeuchte ϕ [-].....	19
Formel 8 – Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-]	25
Formel 9 - Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² vs].....	25
Formel 10 - Wasserdampfdiffusionsäquivalente-Luftschichtdicke s_d [m].....	25
Formel 11 - Approximation des Wassergehalts u_ϕ im Material nach Langmuir [37].....	29
Formel 12 - Adaptierte BET-Gleichung von Holm at el. [39].....	30
Formel 13 - GAB-Gleichung zur Beschreibung der Sorptionsisotherme	30
Formel 14 - Feuchtepufferzahl MBV	32
Formel 15 - Gekoppelte Wärme- und Feuchtegleichung	35
Formel 16 - Herleitung der Bauteildicke $d_{\text{Simulation}}$ [mm].....	54

Anhang

Anhang A	Katalog mit Baustoffkennwerten	3
Anhang B	Wandaufbauten, Baustoffe und verwendete Datensätze	4
Anhang B.1	Wandaufbauten	4
Anhang B.2	Baustoffe	5
Anhang B.3	Versuchsproben.....	6
Anhang B.4	Materialkennwerte	6
Anhang C	Dokumentation der Vorbereitung zur Messung.....	9
Anhang C.1	Bilder der Herstellung des Lehmputzbaus	9
Anhang C.2	Bilder der unbeschichteten Probekörper	10
Anhang C.3	Bilder der Abdichtung.....	11
Anhang D	Sensitivitätsanalyse.....	12
Anhang E	Einfluss des Innenraumklimas.....	13
Anhang F	Ad- und Desorptionsanalyse der Baustoffe.....	23
Anhang G	Messergebnisse.....	29
Anhang G.1	Rohdichten	29
Anhang G.2	Sorptionsisothermen	30
Anhang G.3	freie Wasseraufnahme	35
Anhang G.4	Dynamische Sorptionsfähigkeit	42
Anhang G.5	Feuchtepufferwert	51
Anhang H	Werkstoffvergleiche	57
Anhang H.1	Freie Wasseraufnahme	57
Anhang H.2	Dynamische Sorption	58

Anhang H.3	Feuchtepufferwirkung.....	60
Anhang I	Regressionsanalyse der Sorptionsisotherme	62
Anhang I.1	Beispiel einer berechneten Regressionsanalyse	62
Anhang I.2	Graphische Darstellung der mittels der Regressionsanalyse ermittelten Sorptionsisothermen	63
Anhang I.3	Numerische Lösungen der unterschiedlichen Kennwerte der Sorptionsisotherme	67
Anhang J	Optimierte numerische Berechnung	70
Anhang J.1	Vergleich der dynamischen Sorption	70
Anhang J.2	Vergleich der Feuchtepufferwirkung	76

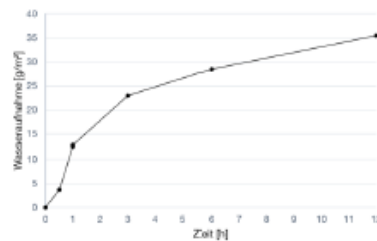
Anhang A Katalog mit Baustoffkennwerten

Beispiel für Gipskartonplatte. Der gesamte Katalog befindet sich als .pdf-Dokument im elektronischen Anhang.

Gipskartonplatte



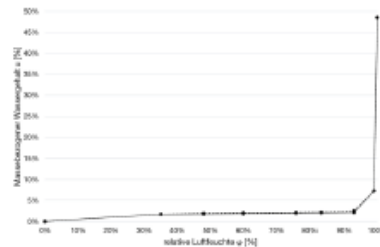
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	585
Porosität [m³/m³]:	0,65 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	850 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,02 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	1/2 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	281,25
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²√s]	0,038
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	0,73

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _v [kg/m³]
0 %	0
33 %	12,18
48 %	13,48
60 %	14,20
75 %	15,48
85 %	17,52
93 %	50,22
99 %	333,96

Allgemeine Erkenntnisse:

Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten.
 Siehe Gipskartonplatte ohne Farbe oder mit Dispersionsfarbe.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Anhang B Wandaufbauten, Baustoffe und verwendete Datensätze

Anhang B.1 Wandaufbauten

Wandaufbauten					
Beschreibung	Kürzel	Material	Hersteller Definition	Dicke [m]	Zusätzliche Infos
Brettsper Holz	BSP_01	Brettsper Holz, 5-lagig kreuzweise verleimt	Binderholz BBS	0,100	
		Holzfaserdämmung	STEICO protect M dry	0,140	
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Brettsper Holz, außenseitige Beschichtung	BSP_02	Holzlasur	Holzlasur Adler Lignovit UV 100		
		Brettsper Holz, 5-lagig kreuzweise verleimt	Binderholz BBS	0,100	
		Holzfaserdämmung	STEICO protect M dry	0,140	
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Brettsper Holz, innenseitige Beschichtung	BSP_03	Lehmputz	Claytec	0,020	ClayTec Lehm-Oberputz fein 0 + ClayTec Unterputz mit Stroh + Lehm-Designputz
		Brettsper Holz, 5-lagig kreuzweise verleimt	Binderholz BBS	0,100	
		Holzfaserdämmung	STEICO protect M dry	0,140	
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Holzrahmenleichtbau	HRLB_01	Kalkfarbe	Kalk-o-lith KLIMA_PRO		
		Gipskartonplatte	Knauf Bauplatte	0,0125	getackert, gespachtelt, grundiert
		OSB-Platte	OSB 3	0,015	getackert
		Holzfaserdämmung	STEICO flex 038	0,140	
		Konstruktionsvollholz	Fichte 50/140		Parallel zu Holzfaserdämmung
		Holzfaserdämmung	STEICO protect H dry	0,040	
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Holzrahmenleichtbau	HRLB_02	Dispersionsfarbe	Hornbach Meister Polar weiss		
		Gipskartonplatte	Knauf Bauplatte	0,0125	getackert, gespachtelt, grundiert
		OSB-Platte	OSB 3	0,015	getackert
		Holzfaserdämmung	STEICO flex 038	0,140	fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL Rahmen
		Konstruktionsvollholz	Fichte 50/140		Parallel zu Holzfaserdämmung
		Holzfaserdämmung	STEICO protect H dry	0,040	fixiert mit je 5 Schrauben und Tellerdübeln
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Holzrahmenleichtbau	HRLB_04	Lehmputz	Claytec	0,020	ClayTec Lehm-Oberputz fein 0 + ClayTec Unterputz mit Stroh + Lehm-Designputz
		holzfaser-Putzträgerplatte	STEICObase	0,020	getackert, gespachtelt, grundiert
		OSB-Platte	OSB 3	0,015	getackert
		Holzfaserdämmung	STEICO flex 038	0,140	fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL Rahmen
		Konstruktionsvollholz	Fichte 50/140		Parallel zu Holzfaserdämmung
		Holzfaserdämmung	STEICO protect H dry	0,040	fixiert mit je 5 Schrauben und Tellerdübeln
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich

Holzrahmenleichtbau	HRLB_05	Lehmdesignputz	Yosima Lehm-Designputz		
		Lehmbauplatte	Lemix Claytec	0,022	getackert, gespachtelt, grundiert
		Holzfaser-Putzträgerplatte	STEICObase	0,015	getackert
		Holzfaserdämmung	STEICO flex 038	0,140	fixiert mit je drei Schrauben 5x100 durch den gesamten LVL Rahmen
		Konstruktionsvollholz	Fichte 50/140		Parallel zu Holzfaserdämmung
		Holzfaserdämmung	STEICO protect H dry	0,040	fixiert mit je 5 Schrauben und Tellerdübeln
		Außenputz	n.r.	0,010	armierter Grundputz mit Putzleisten, mineralischer Oberputz mit Silikatanstrich
Stampflehmwand	SLW_01	Stampflehmwand	Stampflehm von LehmTonErde	0,150	
		Holzfaserdämmung	STEICOprotect M dry	0,160	
		Außenputz	STEICOsecure Base	0,007	
		Oberputz	STEICOsecure Render M R	0,003	

Anhang B.2 Baustoffe

Übersicht Materialien			
Material allg.	Material spez.	Produkt	Verwendeter Baustoff aus WUFI-Datenbanken
Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz, Fichte	Fichte longitudinal
			Fichte radial
Holzwerkstoffe	Brettsper Holz 5-lagig	Binderholz bbs	keine eigener Datensatz vorhanden ¹⁾
	Brettsper Holz 5-lagig	Binderholz bbs mit Holzlasur	keine eigener Datensatz vorhanden ¹⁾
	OSB-Platte	OSB 3	OSB 3
	Holzfaserdämmung, innen	STEICO protect M dry	STEICO protect M dry, Datensatz
	Außendämmung	STEICO protect H dry	STEICO protect H dry, Datensatz
	Holzfaserdämmung, innen	STEICO flex 038	Holzfaserdämmmatte flexibel
	Holzfaser-Putzträgerplatte	STEICO base	Holzfaserdämmplatte WF, Hohe Rohdichte
Lehmwerkstoffe	Lehmputzaufbau	Lehmputzaufbau: ClayTec Lehm-Oberputz fein 06 + ClayTec Unterputz mit Stroh + Lehm-Designputz	Lehmputz
	Lehmbauplatte	Lehmbauplatte - Claytec Lemix	Holzfaserplatte hart
	Lehmbauplatte	Lehmbauplatte - Claytec Lemix inkl. Lehm-Designputz	Holzfaserplatte hart
	Stampflehm	LehmTonErde	Stampflehm - Alnatura - Angaben
Gipskartonplatte	Gipskartonplatte	GKP Knauf Bauplatte GKB	Gipskarton, innen
	Gipskartonplatte mit Kalkfarbe	GKP Knauf Bauplatte GKB inkl. Hornbach Sicherheits-Tiefgrund und Hornbach Meister Polar weiss	Gipskarton, innen
	Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe	GKP Knauf Bauplatte GKB inkl. GIMA GK- Grund Basic und GIMA Kalk-o-lith KLIMPRO	Gipskarton, innen
Außenputz	Außenputz	STEICO	mineral. Außenputz
*) Eingabe erfolgt gemäß Kapitel 6.2 - Abbildung von Brettsper Holz in numerischen Berechnungen			

Farben/Lasuren			
Material allg.	Material spez.	Produkt	S _D -Wert
Farben/Lasuren	Holzlasur	Holzlasur Adler Lignovit UV 100	-
	GKP-Grundierung Kalkfarbe	GIMA GK - Grund - Basic	-
	GKP-Grundierung Dispersionsfarbe	Hornbach Sicherheits-Tiefgrund	-
	Lehmfarbe	Yosima Lehm-Designputz	-
	Dispersionsfarbe	Hornbach Meister Polar weiss	0,05
	Kalkfarbe	Kalk-o-lith KLIMA_PRO	0,02

Anhang B.3 Versuchsproben

Versuchsproben				
Material allg.	Material spez.	Produkt	Kürzel	Messreihen-Nr.
Holzwerkstoffe	Brettsper Holz 5-lagig	Binderholz bbs	BSP	9
	Brettsper Holz 5-lagig mit Lasur	Binderholz bbs mit Holzlasur	BSP-L	10
	Holzfaserdämmung weich	STEICO flex 038	HF	3
	Holzfaser-Putzträgerplatte	STEICO base	HPP	2
Lehmwerkstoffe	Lehmputzaufbau mit Designputz	Lehmputzaufbau: ClayTec Lehm-Oberputz fein 06 + ClayTec Unterputz mit Stroh + Lehm-Designputz	LP	5
	Lehmbauplatte	Lehmbauplatte - Claytec Lemix	LB	4
	Lehmbauplatte mit Designputz	Lehmbauplatte - Claytec Lemix inkl. Lehm-Designputz	LB-DP	6
	Stampflehm	LehmTonErde	SL	11
Gipskartonplatten	Gipskartonplatte	GKP Knauf Bauplatte GKB	GKP	1
	Gipskartonplatte inkl. Grundierung und Dispersionsfarbe	GKP Knauf Bauplatte GKB inkl. Hornbach Sicherheits-Tiefgrund und Hornbach Meister Polar weiss	GKP-D	8
	Gipskartonplatte inkl. Grundierung und Kalkfarbe	GKP Knauf Bauplatte GKB inkl. GIMA GK- Grund Basic und GIMA Kalk-o-lith KLIMPRO	GKP-K	7

Anhang B.4 Materialkennwerte

Konstruktionsvollholz					
Typ			Fichte longitudinal		Fichte radial
Quelle			Herstellerangaben	WUFI-Daten	Herstellerangaben
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]		455	455
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,73	0,73
Wärmekapazität	c	[J/kgK]		1400	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]		0,23	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]		4,3	130

Brettsper Holz					
Typ			binderholz - bbs 125		binderholz - bbs XL
Quellen			Herstellerangaben	WUFI (Sperrholzplatte)	Herstellerangaben
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	470	500	470 ¹⁾
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,5	0,5
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	1600	1400	1600
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,12	0,1	0,12
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	40 - 70	700	40 - 70

Abschätzung in Anlehnung an MA von Cartensen

Leimschichten entsprechen ca. 140mm Fichtenholz, hinsichtlich Feuchteverhalten -> Gesamte Materialdicke 240 mm Fichtenholz
 Eingaben Fichtenholz siehe Materialkennwerte Konstruktionsvollholz

Bemessung in Anlehnung an MA von Sören Henschen

Die Brettsper Holzschicht wird unterteilt in 5 Fichte-Schichten (WUFI-Datensatz: Fichte radial) mit jeweils 20 mm Stärke und in 4 Leimschichten mit jeweils 1 mm Stärke (WUFI-Datensatz: PU -> angepasst). Die Werte für die Leimschicht wurde in Anlehnung an Henschen angepasst (Umrechnung von 1 mm auf 0,1 mm). Siehe Angaben unten.

Brettsper Holz					
Typ			binderholz - bbs 125		binderholz - bbs XL
Quellen			Angaben Fichte	Angaben Leim	Angaben Fichte
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	455	4	455
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]	0,73	0,95	0,73
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	1400	1500	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]			
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	0,23	0,3	0,23

OSB-Platte					
Typ			OSB-Platte		
Quellen			WUFI (Dichte 615)	WUFI (Dichte 553)	WUFI (OSB 3)
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	615	553	595
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]	0,9	0,64	0,85
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	1400	1400	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,13	0,12	0,1049
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	175	134	165

Holzfaserdämmung						
Typ			STEICObase - Putzträgermatte		STEICDuo	
Quelle			Herstellerangaben	WUFI (Holzfaserdämmplatte WF Hohe Rohdichte)	Herstellerangaben	WUFI (Holzfaserdämmplatte WF Hohe Rohdichte)
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	250	260	265	260
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,83		0,83
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	2100	1400	2100	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,048	0,048	0,048	0,048
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	5	5	5	5

Typ						
			STEICDuo dry		STEICOflex 036	
Quelle			Herstellerangaben	WUFI (Holzfaserdämmplatte SLG 40)	Herstellerangaben	WUFI (Holzfaserdämmplatte flexibel)
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	180	155	60	50
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,981		0,97
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	2100	1400	2100	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,043	0,042	0,038	0,035
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	3	3	1/2	2

Typ						
			STEICOflex 038		STEICoprotect H	
Quelle			Herstellerangaben	WUFI (Holzfaserdämmplatte flexibel)	WUFI-Datei	WUFI (Holzfaserdämmplatte WF Hohe Rohdichte)
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	50	50	265	260
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,97	0,823	0,83
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	2100	1400	1500	1400
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,038	0,035	0,048	0,048
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	1/2	2	5	5

Typ					
			STEICoprotect M		
Quelle			WUFI-Datei	WUFI (Holzfaserdämmplatte WF Hohe Rohdichte)	
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	230	260	
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]	0,847	0,83	
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	1500	1400	
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,046	0,048	
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	5	5	

Lehminnenputz						
Typ			ClayTec		YOSIMA	
Quelle			Herstellerangabe	WUFI Lehmputz	Herstellerangabe	WUFI Lehmputz
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]		1514		1514
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,42		0,42
Wärmekapazität	c	[J/kgK]		850		850
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,91	0,65		0,65
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	5/10	11,3		11,3

Lehmbauplatten					
Typ			LEMIX 09.014 / 09.015		
Quelle			Herstellerangaben		
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	1450		
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]			
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	1,1		
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,353		
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	5/10		

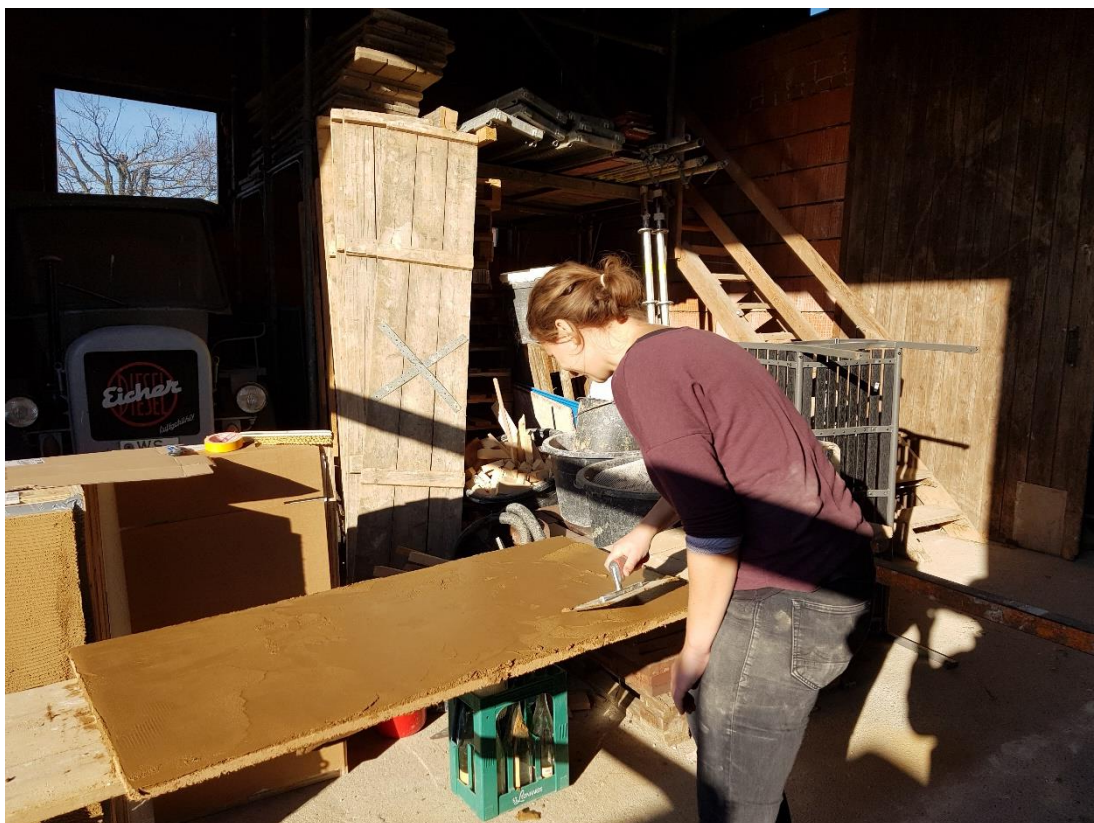
Stampflehm				
Typ			Stampflehm	
Quelle			Kennwerte	
			gemessen - Alnatura Projekt	Für Rohdichte 2100
Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	1675	2100
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]	0,38	0,23
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	?	850
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,72	0,7
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	8,7/14,6	12/23

Gipskarton-Platte				
Typ			Gipskarton-Platte	
Quelle			WUFI (GK Fraunhofer)	WUFI (GK Innen)
			Rohdichte	ρ
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]	0,65	0,73
Wärmekapazität	c	[J/kgK]	850	850
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,2	0,2
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	8,3	8,33

Außenputz						
Typ			StoLevell Uni		STEICOsecure Base	
Datenbank			Herstellerangaben	WUFI-Daten	Herstellerangaben	WUFI (mineral. Außenputz)
			Rohdichte	ρ	[kg/m ³]	1300
Porosität	Φ	[m ³ /m ³]		0,5		0,24
Wärmekapazität	c	[J/kgK]		850		850
Wasseraufnahme		[kg/m ²]	0,24		≤ 0,5	
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/mK]	0,87	0,87	0,83 [P 50%]	0,8
					0,93 [P 90%]	
Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl	μ	[-]	15-35	23	≤ 25	25

Anhang C Dokumentation der Vorbereitung zur Messung

Anhang C.1 Bilder der Herstellung des Lehmputzaufbaus



Anhang C.2 Bilder der unbeschichteten Probekörper

Holzfaserdämmung (weich)



Holzfaser-Putzträgerplatte



Brettsper Holz



Lehmbauplatte



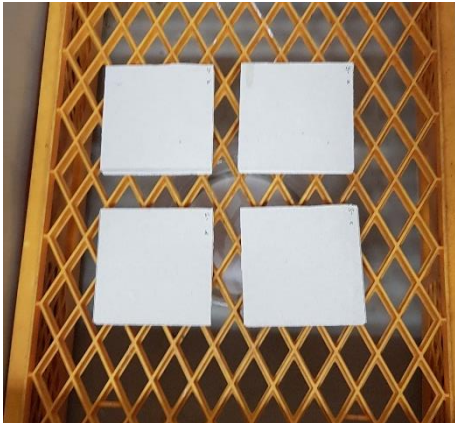
Lehmputzaufbau



Stampflehm

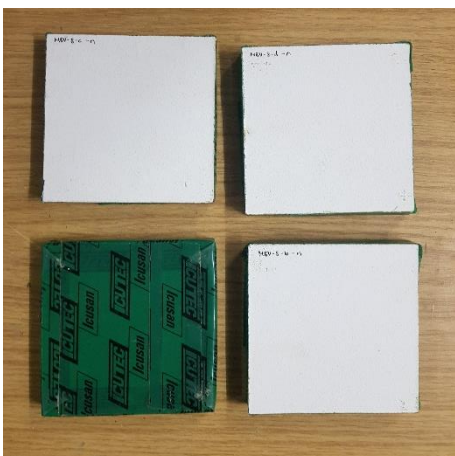


Gipskartonplatte

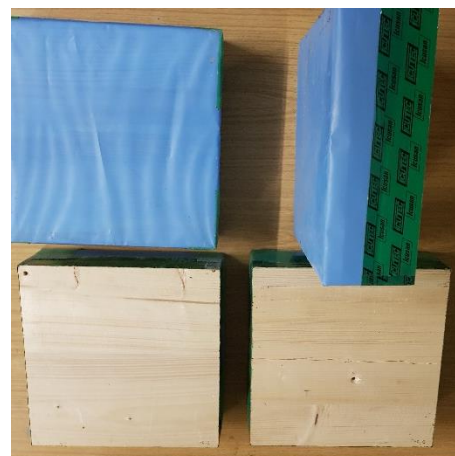


Anhang C.3 Bilder der Abdichtung

Abdichtung mittels Klebeband bei kleinen Körpern



Abdichtung mittels Klebeband und Dampfbremssfolie bei großen Körpern



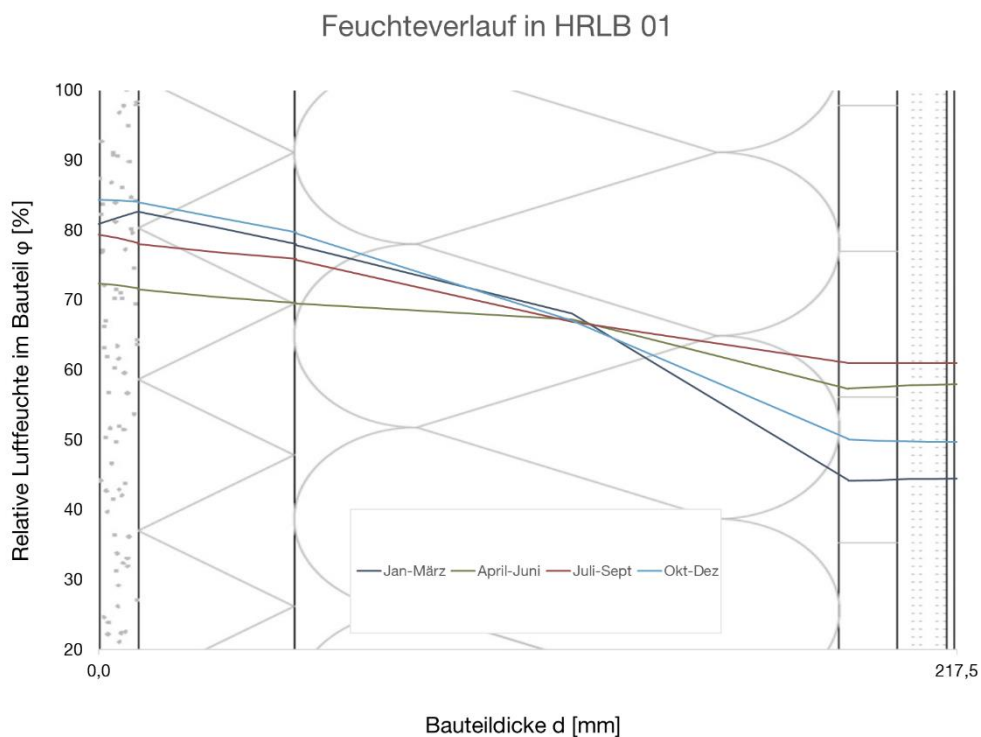
Anhang D Sensitivitätsanalyse

Da die Daten zur Sensitivitätsanalyse sehr umfangreich sind, sind diese nur als elektronischer Anhang D angefügt.

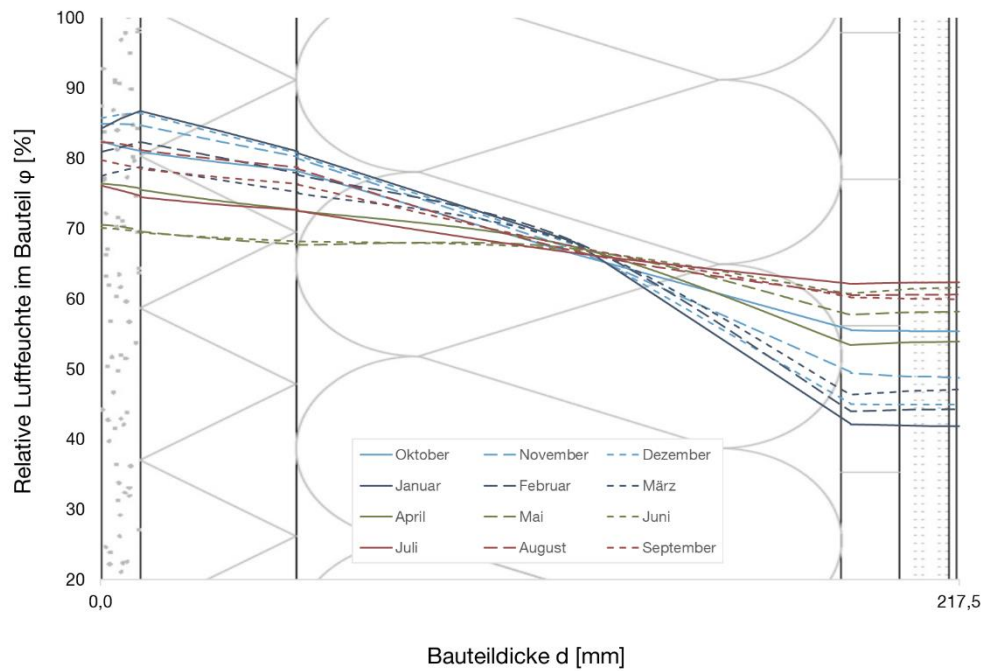
Anhang E Einfluss des Innenraumklimas

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Feuchteverläufe in einem Bauteil für jeweils einen Vertreter eines Holzrahmenleichtbau-, eines Brettsperrholz und eines Stampflehm-Wandaufbaus. Die Feuchteverläufe für alle weiteren Bauteile sind dem elektronischen Anhang zu entnehmen.

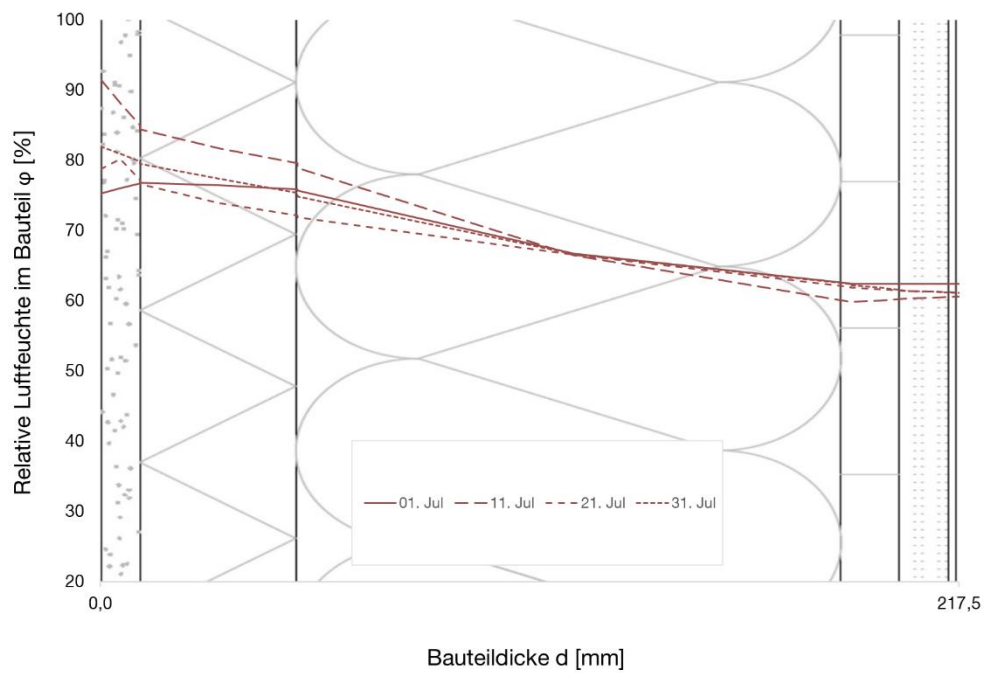
Holzrahmenleichtbau:



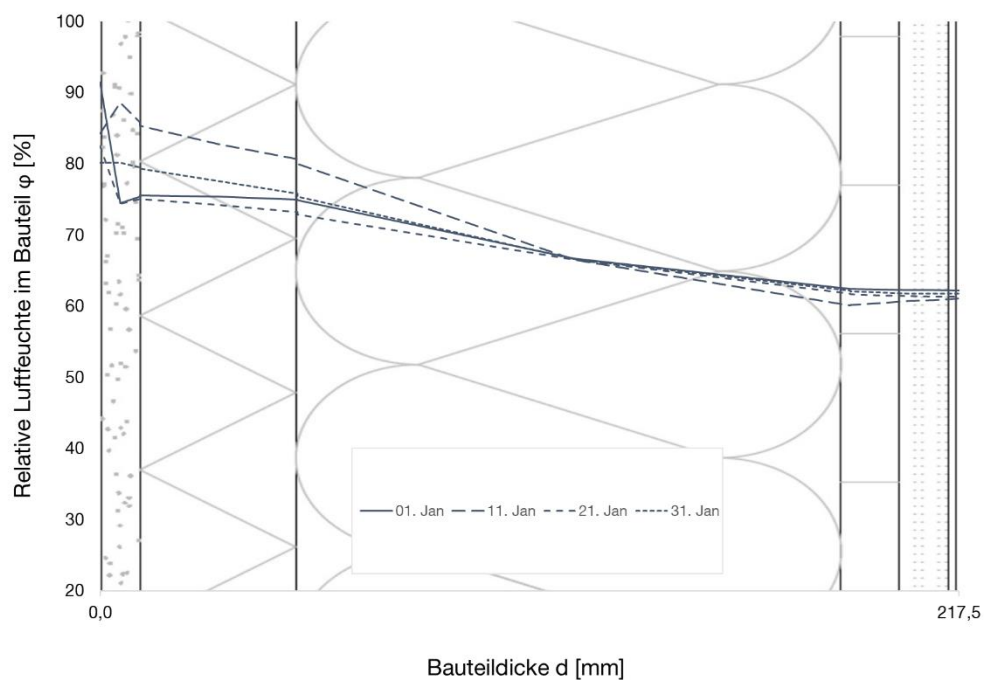
Feuchteverlauf in HRLB 01



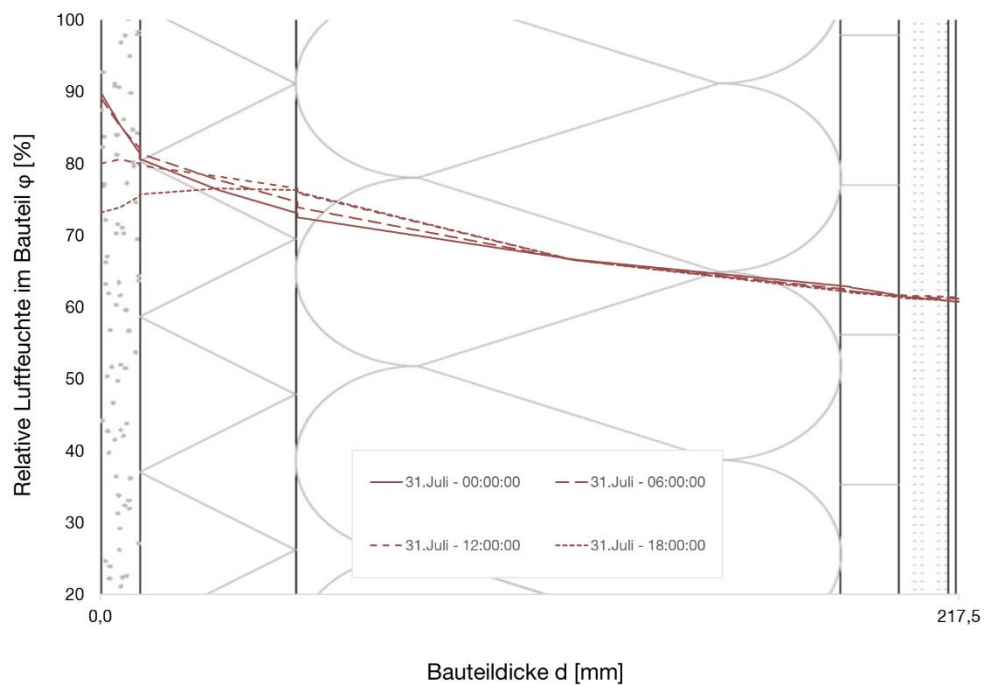
Feuchteverlauf in HRLB 01



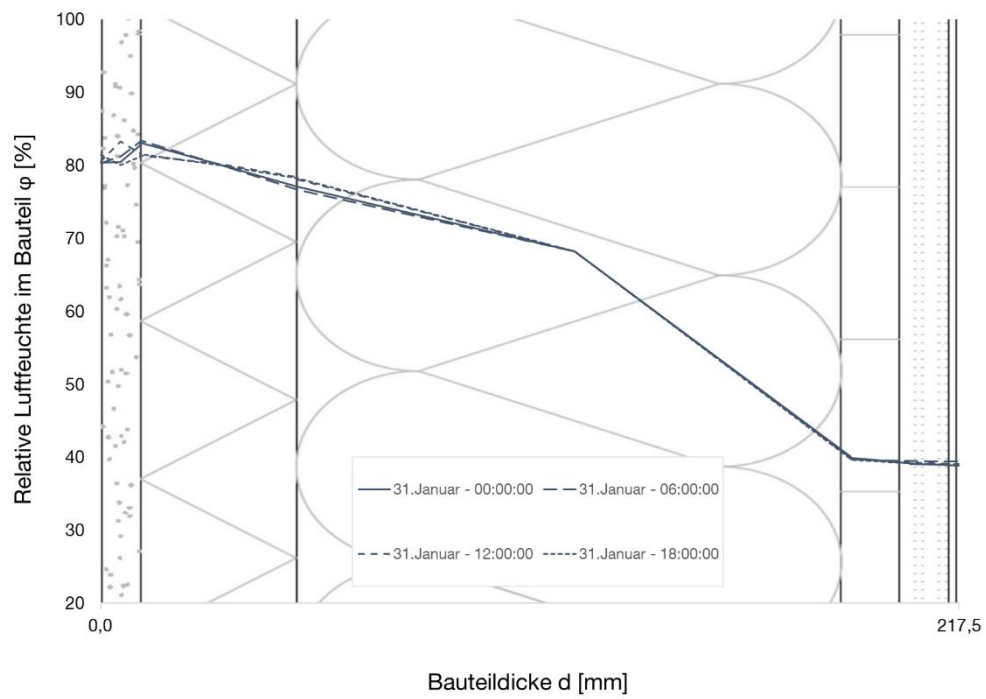
Feuchteverlauf in HRLB 01



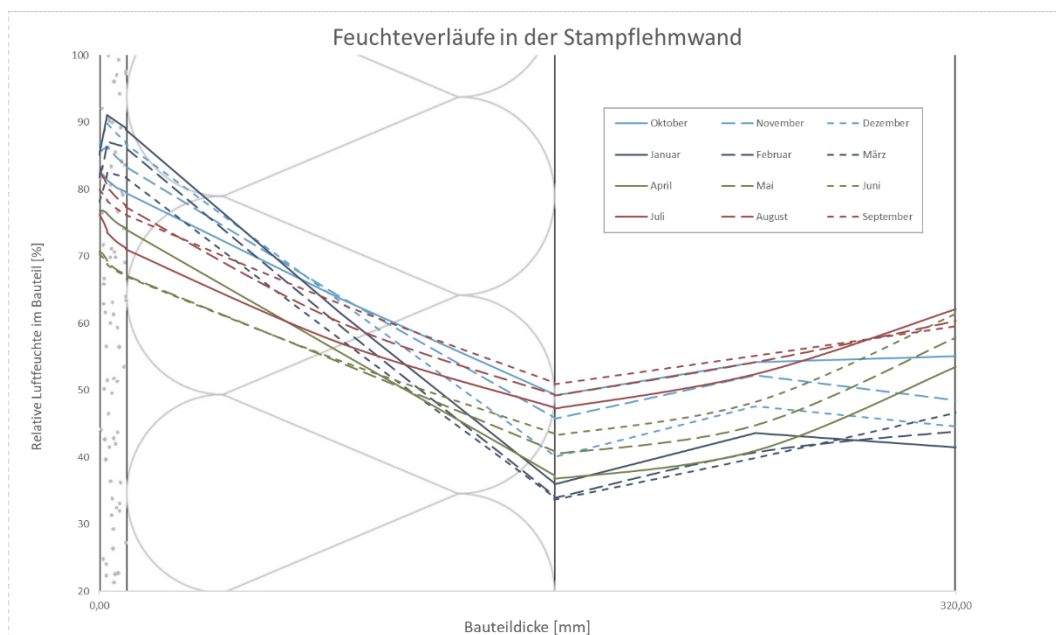
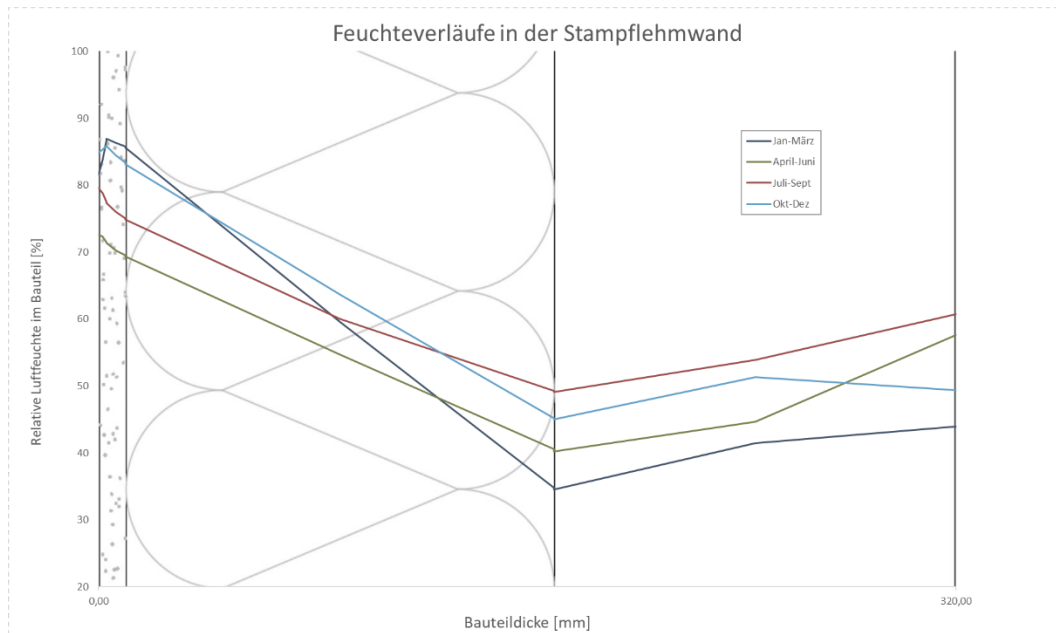
Feuchteverlauf in HRLB 01

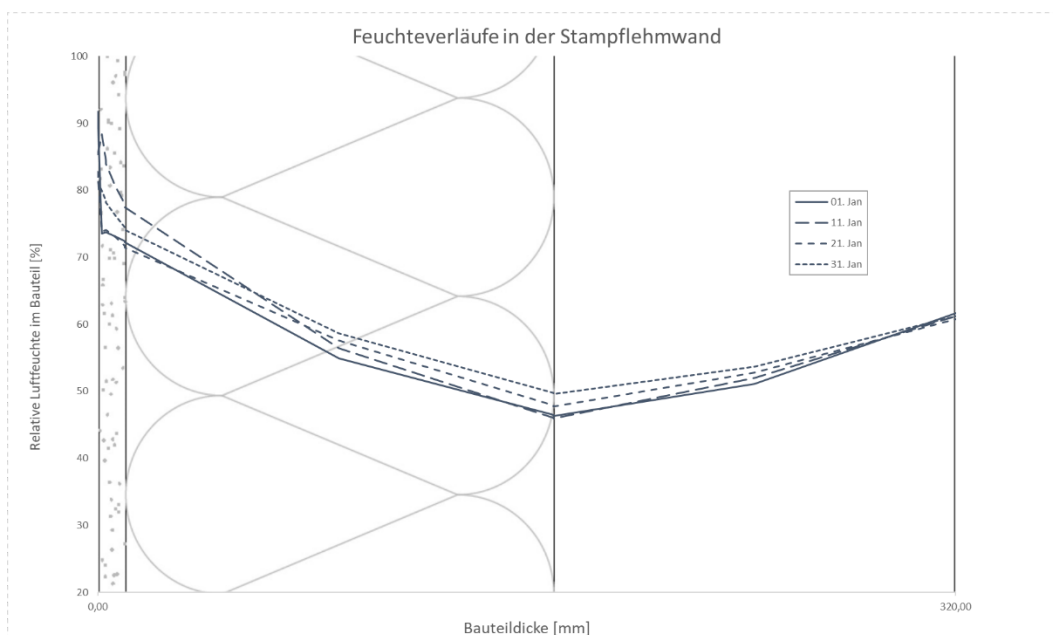
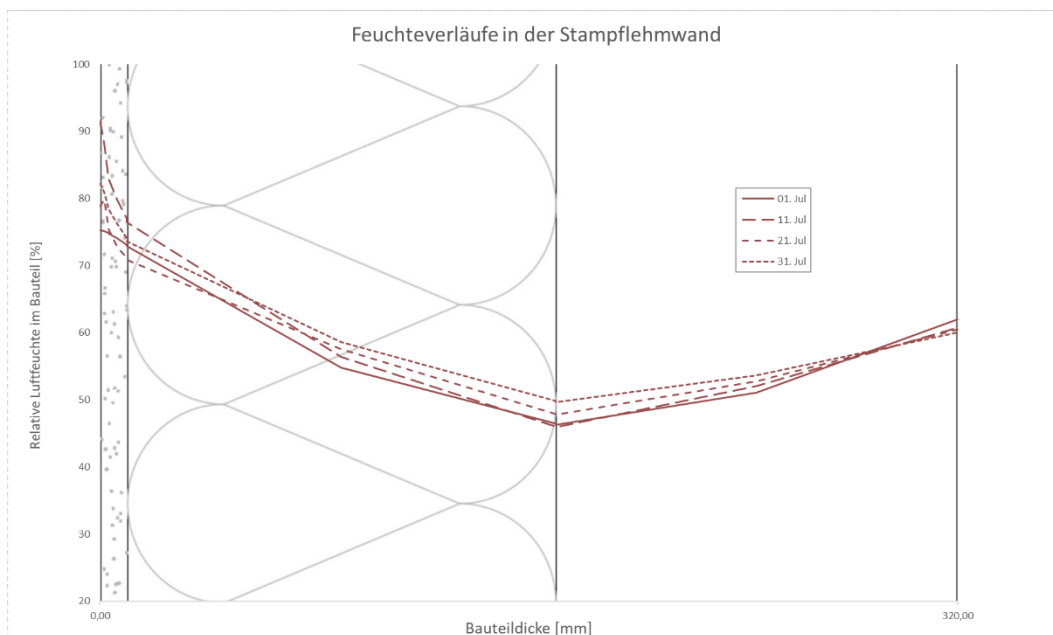


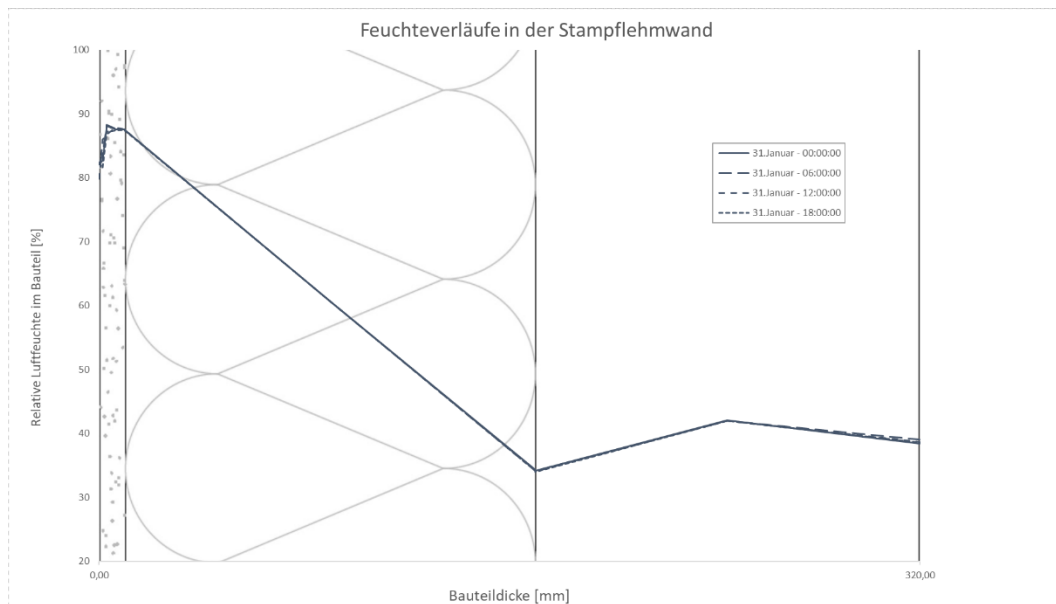
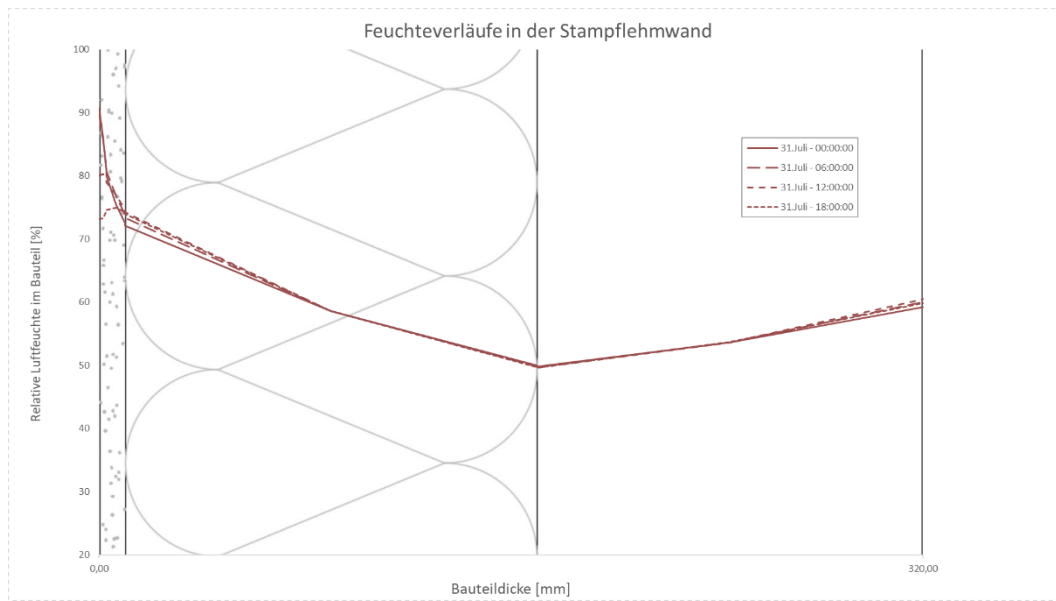
Feuchteverlauf in HRLB 01



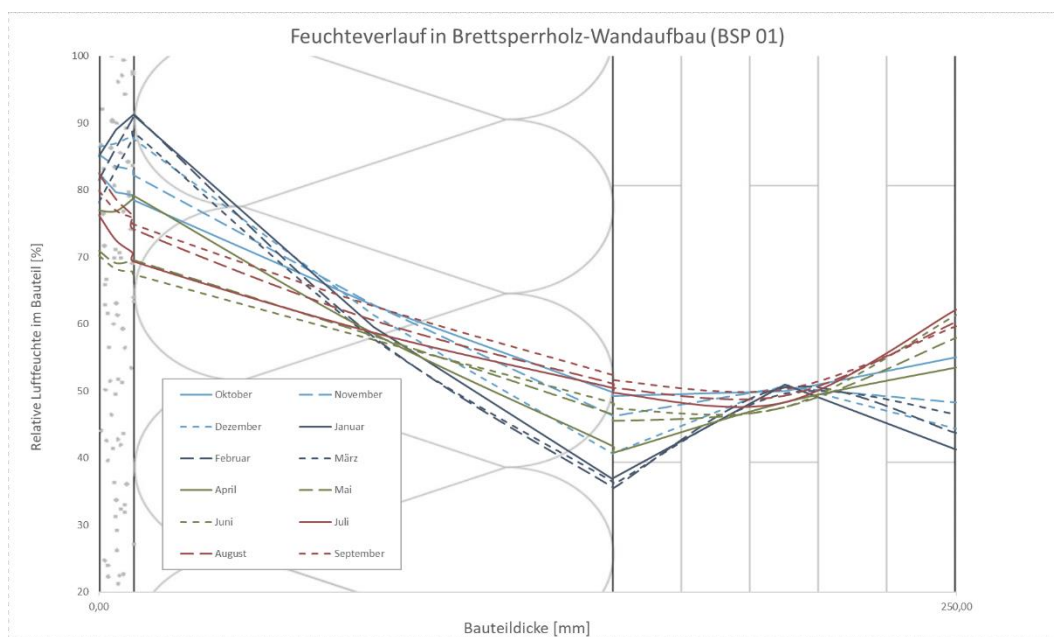
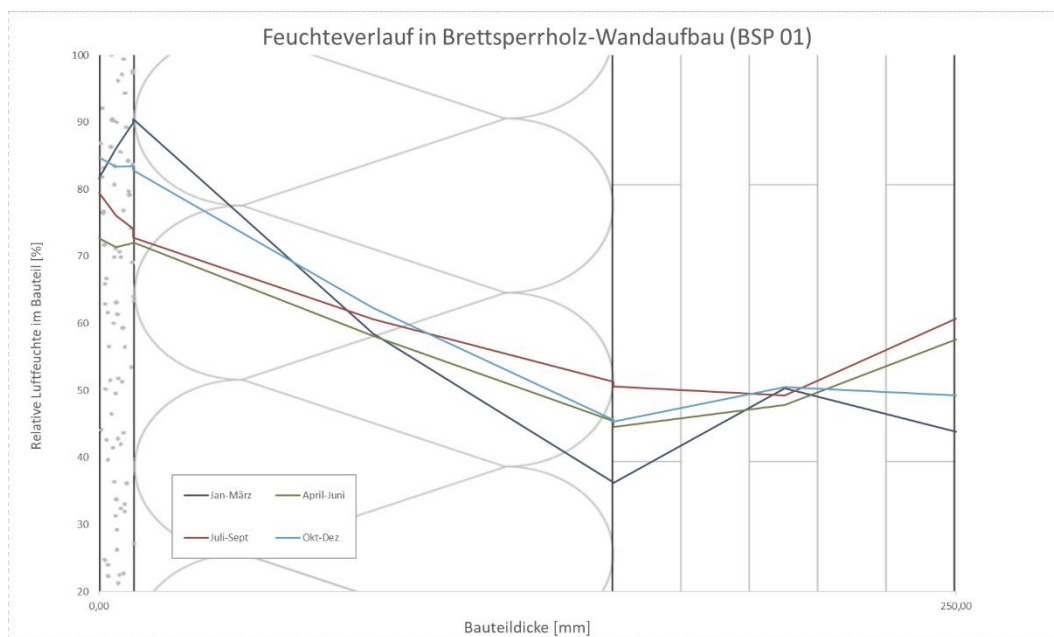
Stampflehmwand:

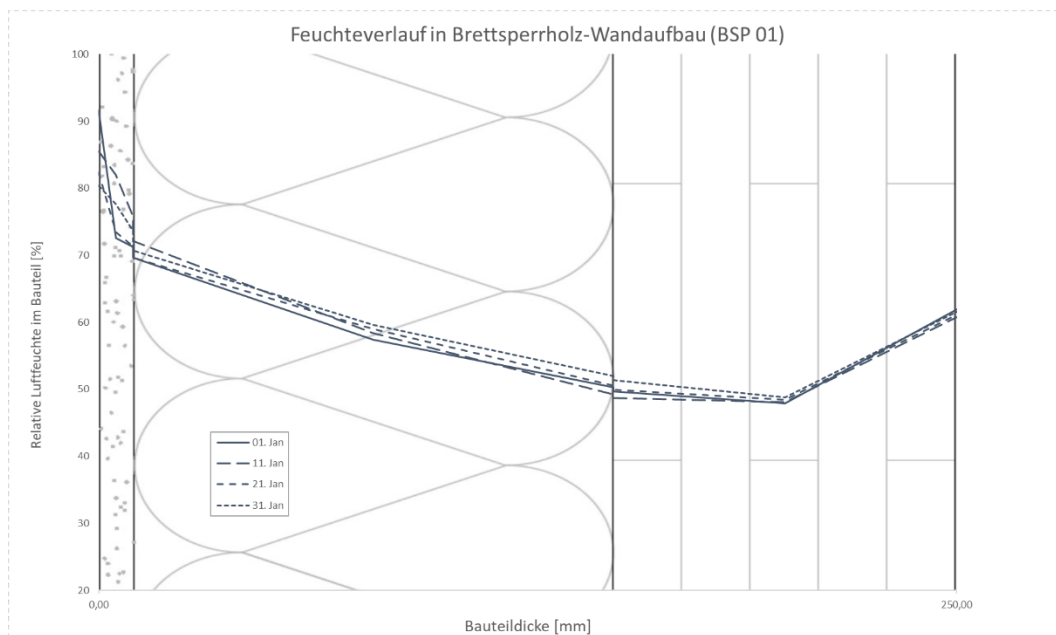
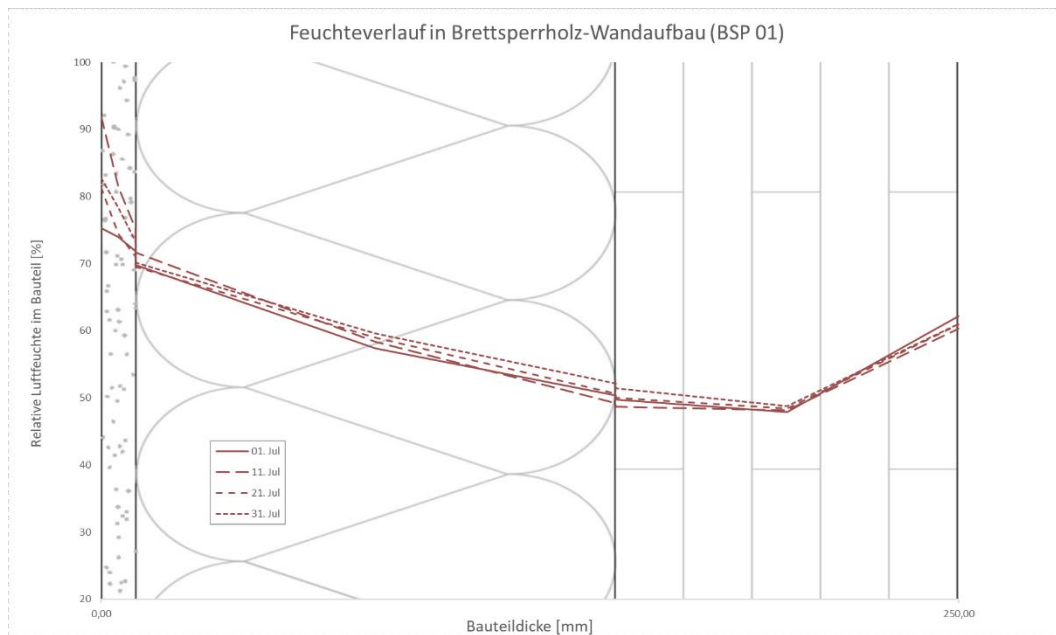


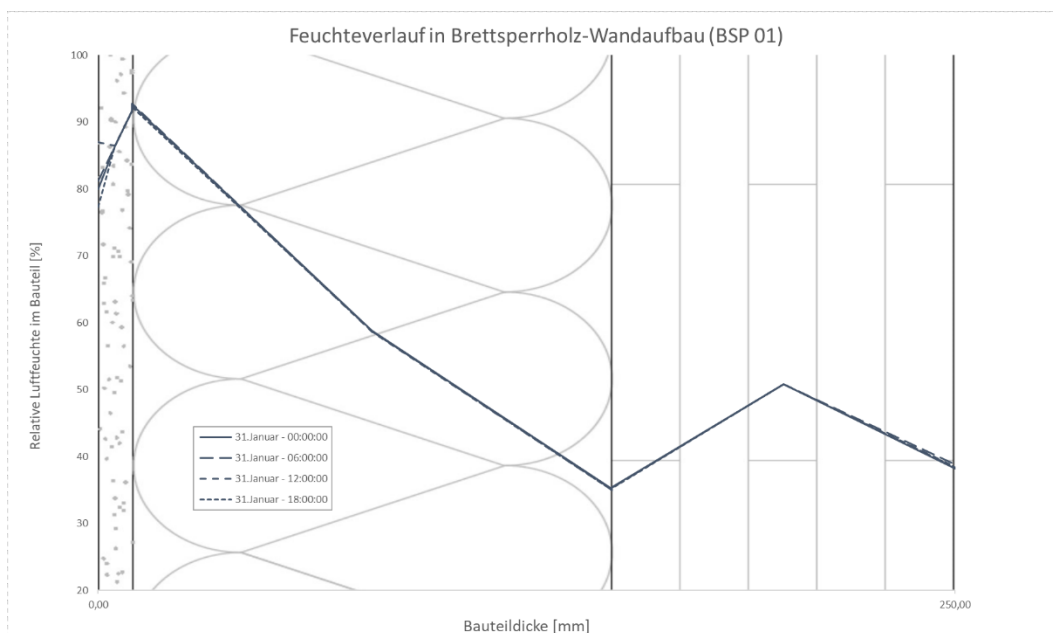
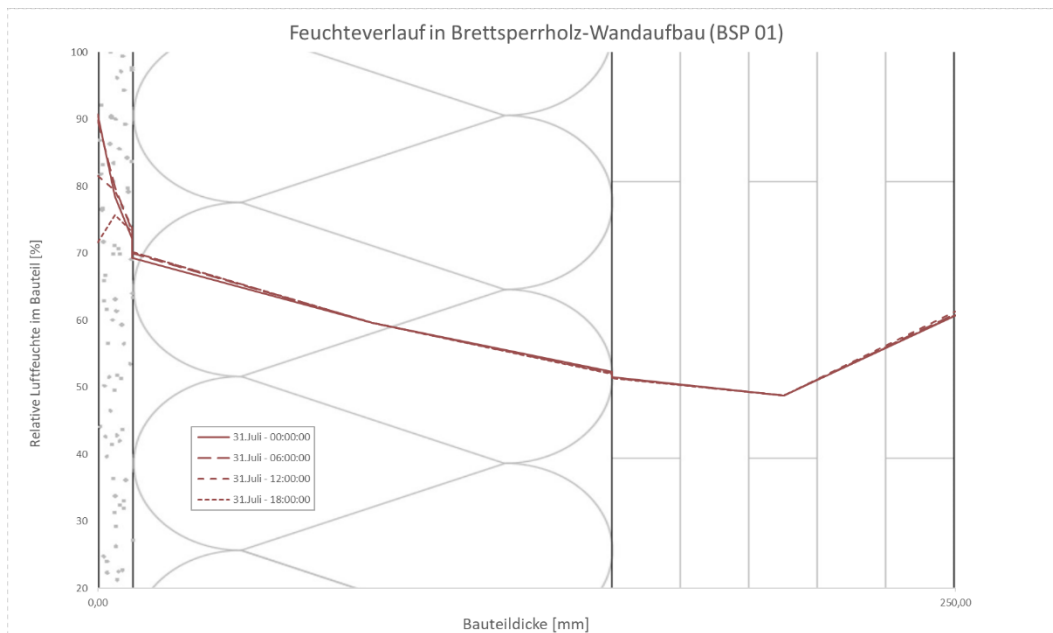




Brettsperrholz-Wandaufbau:





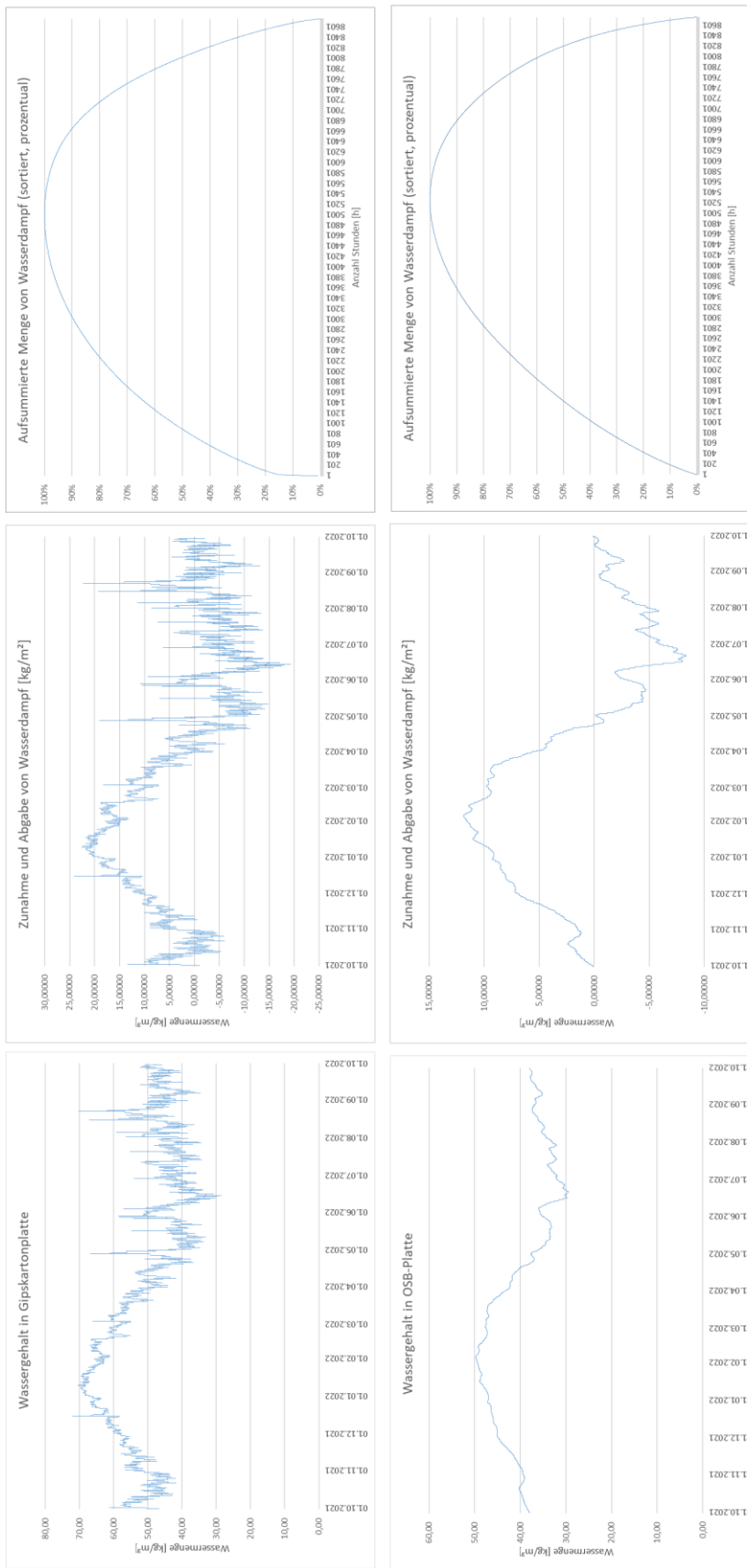


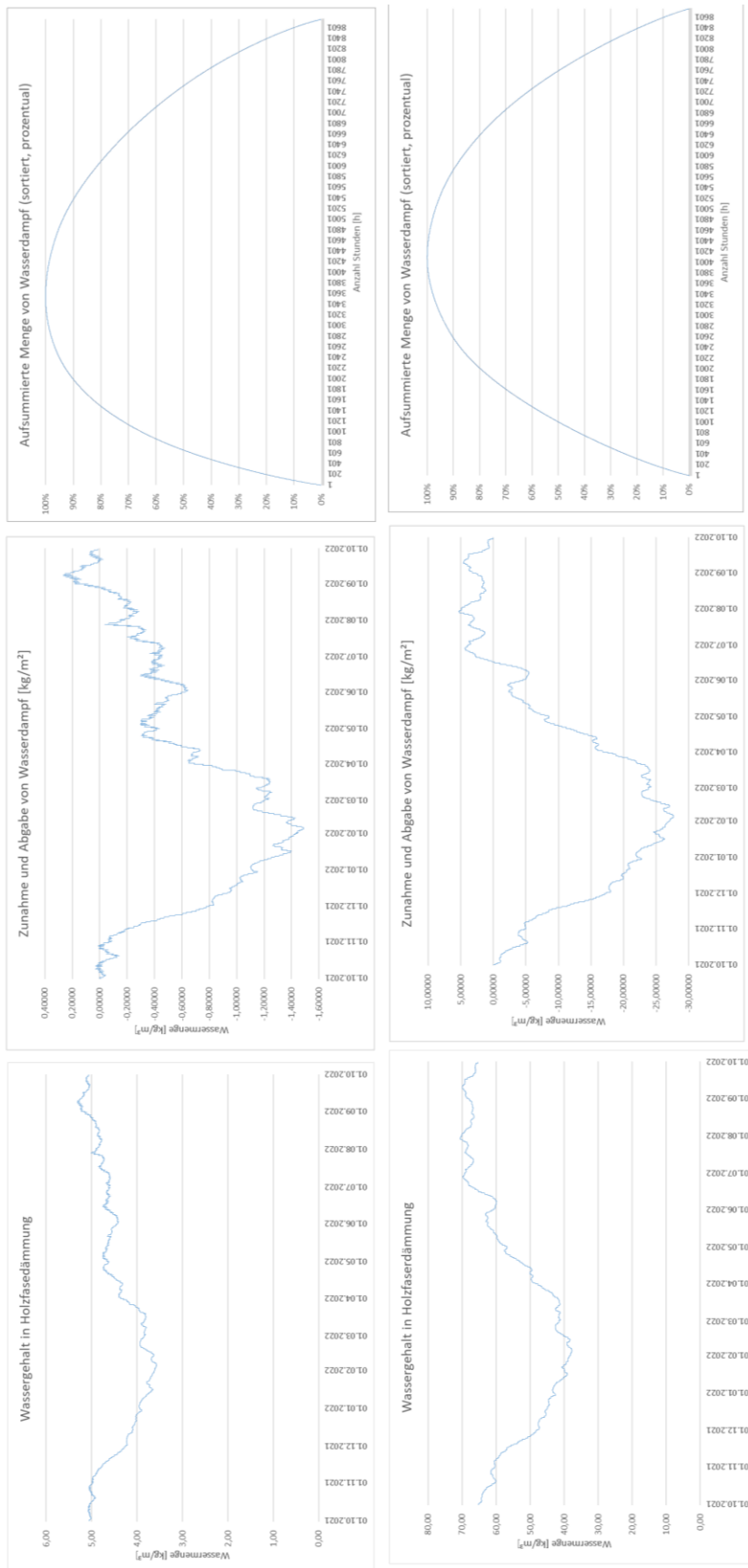
Anhang F Ad- und Desorptionsanalyse der Baustoffe

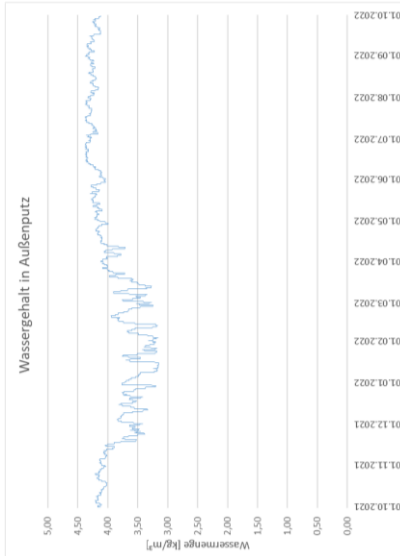
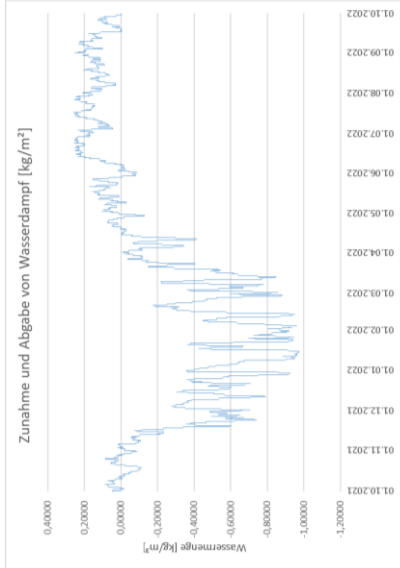
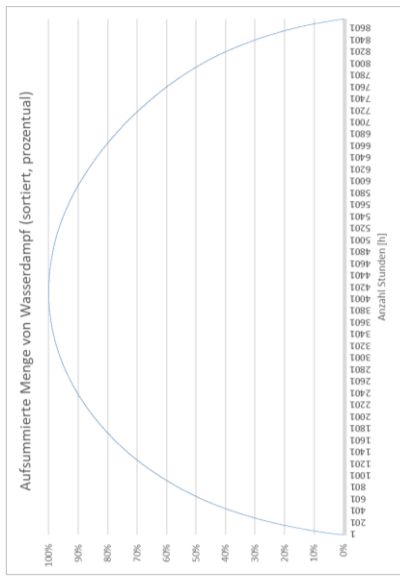
Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft den Jahresverlauf des Wassergehalts in den einzelnen Schichten eines Bauteils (HRLB 01). Das Vorgehen zur Erstellung der Abbildungen entspricht dem in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Vorgehen. Die Wassergehalte aller weiteren Bauteile sind dem elektronischen Anhang zu entnehmen.

Gipskartonplatte	Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	5005	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:	57%	[h]
		Stunden mit Wasserabgabe:	3754	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:	43%	[h]
	Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde	Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	12,32	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-5,13	[kg/m ²]
	Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material	Maximale Feuchte im Material:	71,95	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	16.12.21 19:00	
		Minimale Feuchte im Material:	28,52	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	15.6.22 17:00	
	Wassermenge	Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	1451,59	[kg/m ² a]
	OSB-Platte	Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	5256
Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:			60%	[h]
Stunden mit Wasserabgabe:			3503	
Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:			40%	[h]
Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde		Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	0,03	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-0,10	[kg/m ²]
Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material		Maximale Feuchte im Material:	49,75	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	6.2.22 4:00	
		Minimale Feuchte im Material:	29,52	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	21.6.22 20:00	
Wassermenge		Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	42,32	[kg/m ² a]
Holzfaserdämmung		Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	3541
	Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:		40%	[h]
	Stunden mit Wasserabgabe:		5218	
	Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:		60%	[h]
	Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde	Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	0,01	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-0,01	[kg/m ²]
	Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material	Maximale Feuchte im Material:	5,32	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	9.9.22 19:00	
		Minimale Feuchte im Material:	3,56	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	6.2.22 7:00	
	Wassermenge	Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	8,96	[kg/m ² a]

Holzfaserdämmung	Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	4088	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:	47%	[h]
		Stunden mit Wasserabgabe:	4671	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:	53%	[h]
	Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde	Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	0,06	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-0,05	[kg/m ²]
	Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material	Maximale Feuchte im Material:	70,66	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	30.7.22 6:00	
		Minimale Feuchte im Material:	37,66	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	5.2.22 16:00	
Wassermenge	Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	59,42	[kg/m ² a]	
Außenputz	Stunden mit Adsorption / Desorption	Stunden mit Wasseraufnahme:	4125	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasseraufnahme:	47%	[h]
		Stunden mit Wasserabgabe:	4634	
		Prozent der Stunden pro Jahr mit Wasserabgabe:	53%	[h]
	Max. Zu-/Abnahme innerhalb einer Stunde	Maximale Wasseraufnahme in einer Stunde:	0,03	[kg/m ²]
		Maximale Wasserabgabe in einer Stunde:	-0,02	[kg/m ²]
	Maximal und Minimalwerte der Feuchte im Material	Maximale Feuchte im Material:	4,38	[kg/m ²]
		Datum der max. Feucht im Material:	18.7.22 9:00	
		Minimale Feuchte im Material:	3,15	[kg/m ²]
		Datum der min. Feuchte im Material:	15.1.22 22:00	
Wassermenge	Insgesamt aufgenommen und wieder abgegebene Wassermenge pro Jahr	14,75	[kg/m ² a]	







Anhang G Messergebnisse

Anhang G.1 Rohdichten

Material	Rohdichte	Darr	V [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Herstellerangaben [kg/m³]	Differenz [kg/m³]	Kommentar
Gipskartonplatte	Probekörper a	72,30	0,000125	578,40		109,60	
	Probekörper b	73,57	0,000125	588,56		99,44	
	Probekörper c	73,46	0,000125	587,68	688,00	100,32	
	Probekörper d	73,23	0,000125	585,84		102,16	
	Gemittelt	73,14	0,000125	585,12		102,88	
Holzfaser-Putzträgerplatte	Probekörper a	49,68	0,000200	248,40		1,60	
	Probekörper b	49,91	0,000200	249,55		0,45	
	Probekörper c	49,46	0,000200	247,30	250,00	2,70	
	Probekörper d	50,09	0,000200	250,45		-0,45	
	Gemittelt	49,785	0,000200	248,93		1,07	
Holzfaserdämmung, weich	Probekörper a	17,93	0,000400	44,83		5,18	
	Probekörper b	17,82	0,000400	44,55		5,45	
	Probekörper c	18,05	0,000400	45,13	50,00	4,88	
	Probekörper d	17,84	0,000400	44,60		5,40	
	Gemittelt	17,91	0,000400	44,78		5,23	
Lehmbauplatte	Probekörper a	341,54	0,000220	1552,45		-82,45	
	Probekörper b	316,47	0,000220	1438,50		31,50	
	Probekörper c	333,06	0,000220	1513,91	1470,00	-43,91	
	Probekörper d	300,09	0,000220	1364,05		105,95	
	Gemittelt	322,79	0,000220	1467,23		2,77	
Lehmputzaufbau	Probekörper a	340,78	0,000190	1793,58		-93,58	
	Probekörper b	285,68	0,000171	1670,64		29,36	
	Probekörper c	321,05	0,000190	1689,74	1700,00	10,26	Hersteller gibt Lehmputz mit Rohdichteklasse 1,8 an, was 1,61-1,8 kg/dm³ entspricht. Gemittelt was 1,7 kg/dm³ oder 1700 kg/m³ resultieren also 1,7 kg/dm³ oder 1700 kg/m³
	Probekörper d	352,66	0,000190	1856,11		-156,11	
	Gemittelt	325,0425	0,000190	1710,75		-10,75	
Brettspertholz	Probekörper a	227,18	0,000540	420,70		49,30	
	Probekörper b	229,20	0,000540	424,44		45,56	
	Probekörper c	231,05	0,000540	427,87	470,00	42,13	
	Probekörper d	223,80	0,000540	414,44		55,56	
	Gemittelt	227,8075	0,000540	421,87		48,13	
Stempflehm	Probekörper a	2459,41	0,001039	2405,06		-135,06	
	Probekörper b	2492,48	0,001039	2398,39		-128,39	
	Probekörper c	2503,35	0,001039	2408,85	2270,00	-138,85	
	Probekörper d	2458,41	0,001039	2404,10		-134,10	
	Gemittelt	2458,41	0,001039	2404,10		-134,10	

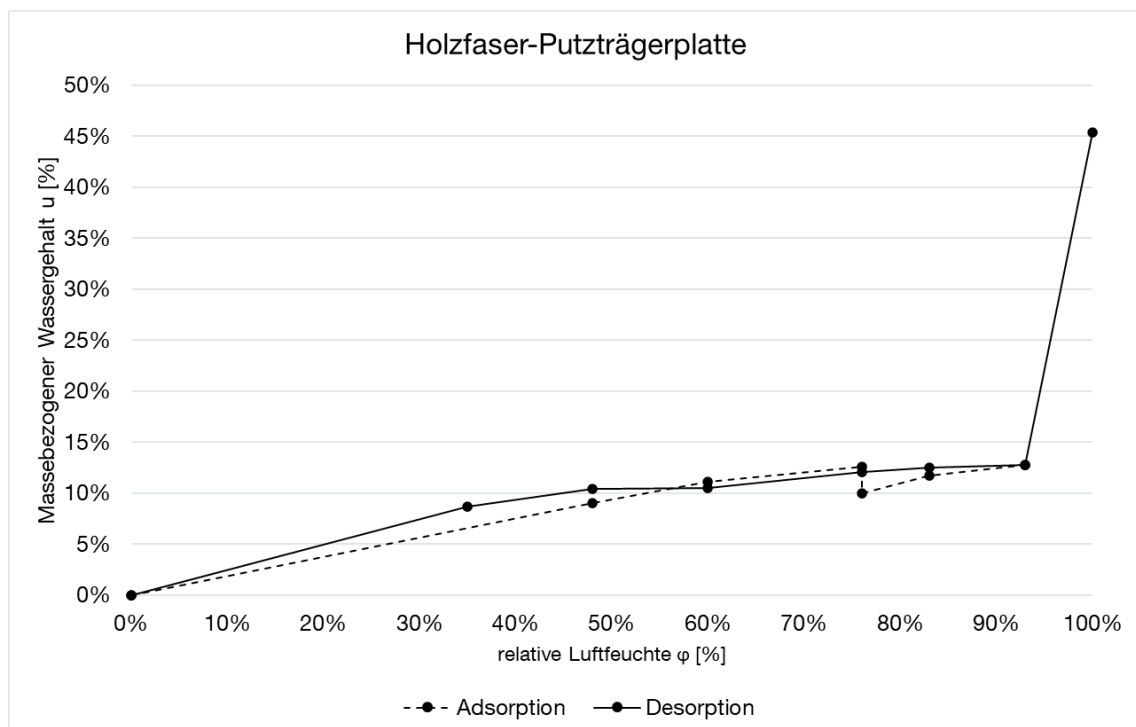
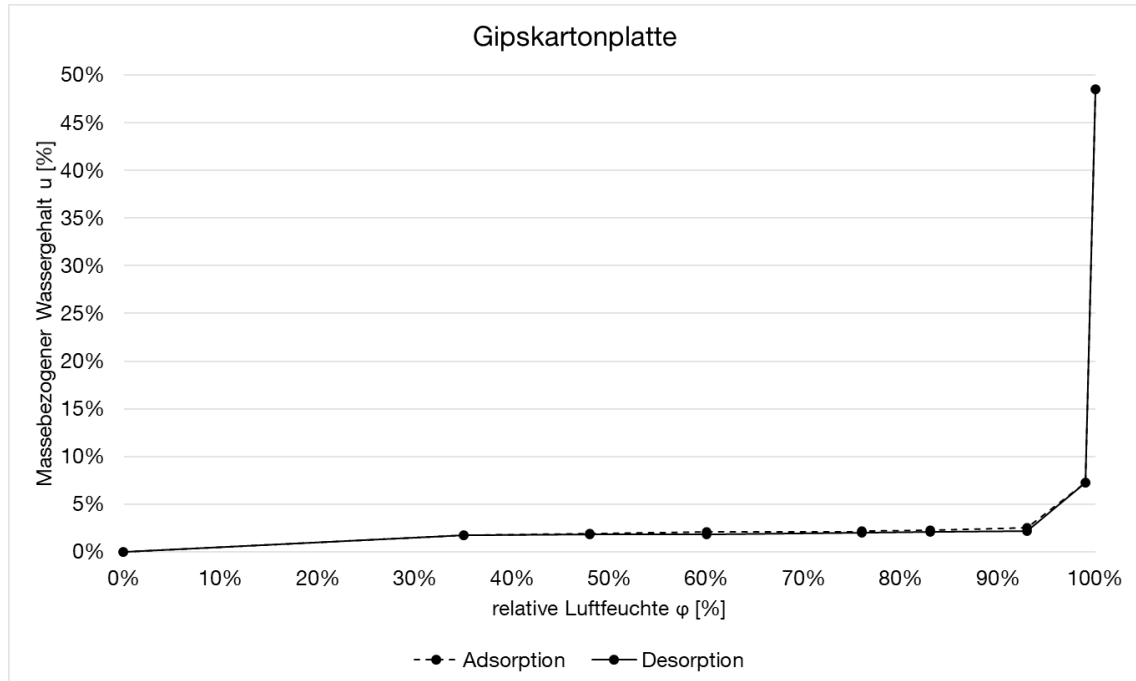
Anhang G.2 Sorptionsisothermen

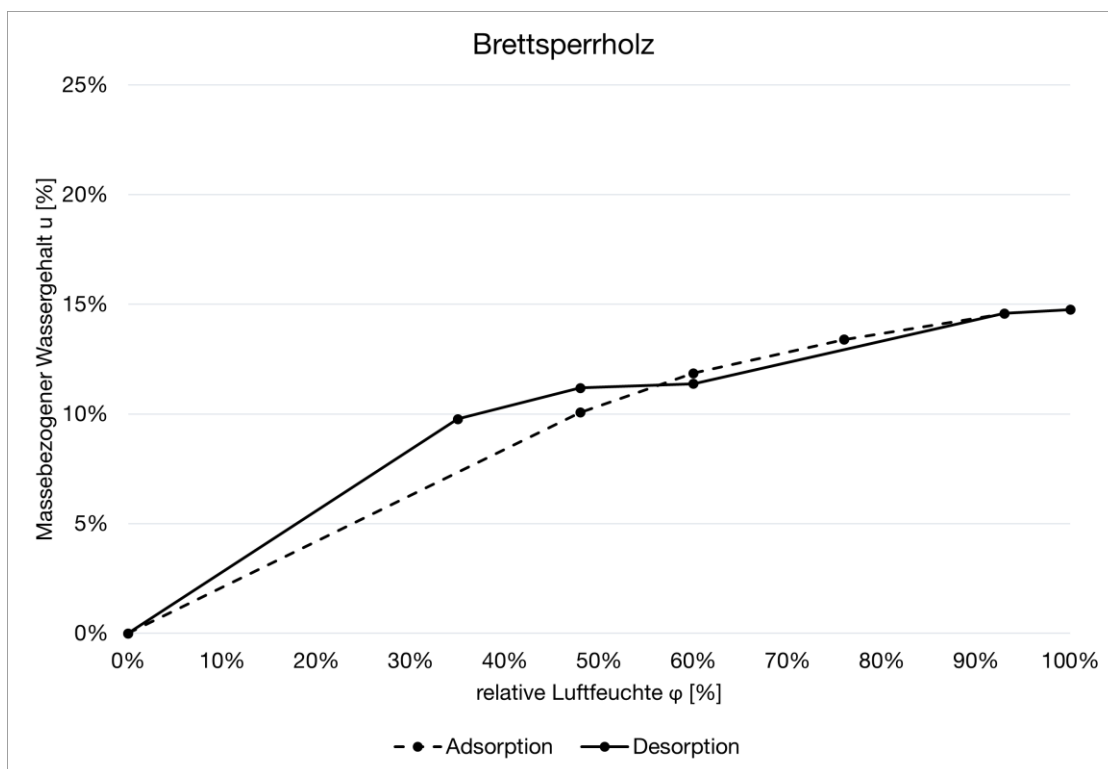
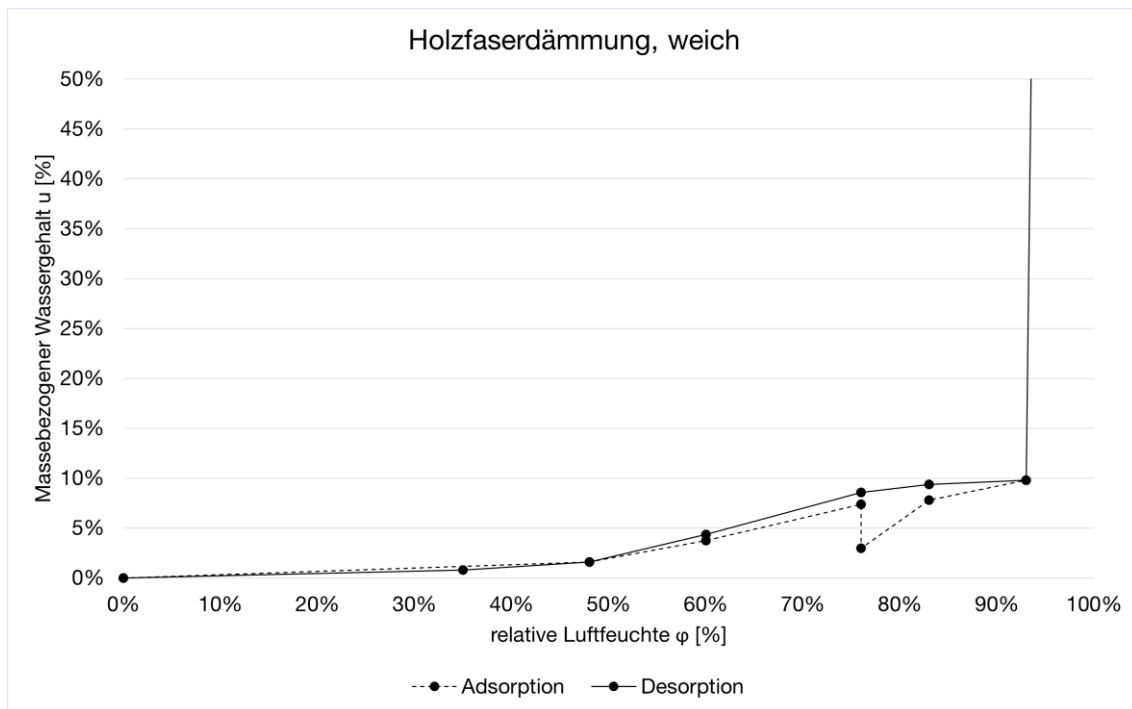
Messprotokoll

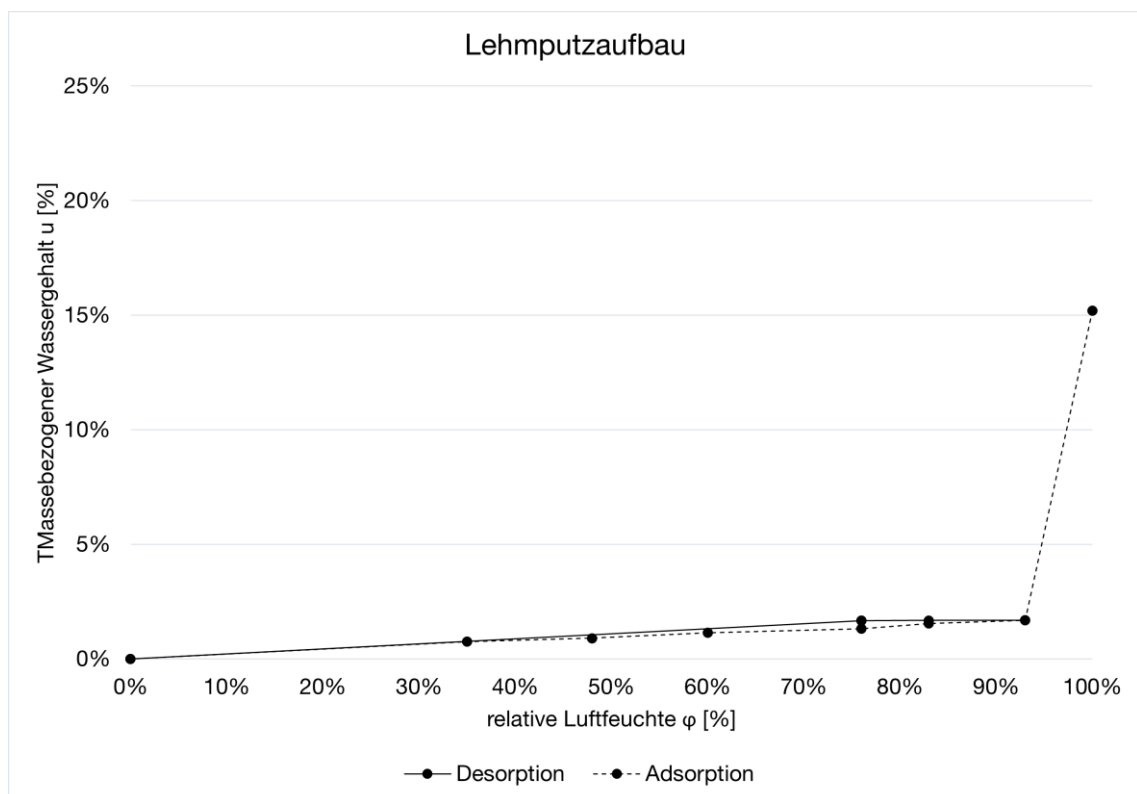
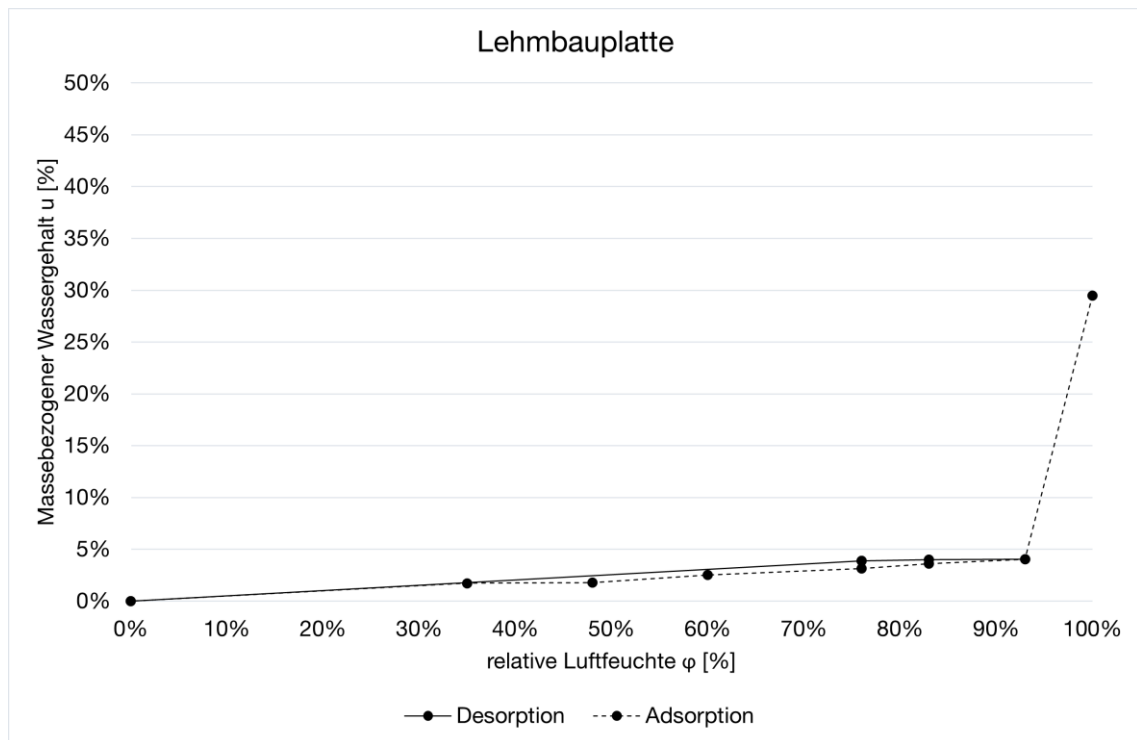
Material	Übersicht Vorbereitung Probekörper																				
	0%	35%	48%	60%	76%	83%	89%	99%	100%	99%	98%	93%	81%	76%	60%	48%	35%	0%			
S - 1 Gipskartonplatte	Messwerte [g]	86,00	585,00	87,69	87,78	87,87	87,93	88,19	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	92,28	86,00		
	Zunahme total [g]	0,00	1,52	1,69	1,77	1,87	1,93	2,19	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	0		
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	12,18	13,48	14,20	14,92	15,46	17,52	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	50,22	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	1,77%	1,96%	2,06%	2,17%	2,23%	2,55%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	7,30%	0,00%	
	Stabw. [g]	0,00	1,29	1,13	1,15	1,17	1,13	1,12	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	1,5%	1,3%	1,3%	1,3%	1,4%	1,3%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	0,0%	
S - 2 Holzfaser-Putzträgerplatte	Messwerte [g]	49,79	54,30	55,31	56,04	54,77	55,64	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	49,79		
	Zunahme total [g]	0,00	4,51	5,52	6,26	4,98	5,85	6,35	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	22,58	0		
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	22,95	27,60	31,29	24,90	29,26	31,76	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	112,80	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	9,06%	11,09%	12,57%	10,00%	11,76%	12,76%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	45,38%	0,00%	
	Stabw. [g]	0,00	0,56	0,46	0,44	0,72	0,82	0,54	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	1,3%	0,9%	0,9%	1,5%	1,7%	1,2%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	2,3%	0,0%	
S - 3 Holzfaserdämmung, weich	Messwerte [g]	18,90	18,81	20,23	20,94	20,88	21,02	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	21,41	18,90	
	Zunahme total [g]	0,00	0,31	0,73	1,44	0,98	1,52	1,91	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	112,00	0	
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	0,78	1,82	3,59	1,44	3,81	4,98	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	280,01	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	1,60%	3,73%	7,37%	2,96%	7,81%	9,79%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	574,38%	0,00%	
	Stabw. [g]	0,00	0,12	0,08	0,33	0,19	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	0,6%	0,4%	1,7%	1,0%	1,2%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
S - 4 Lehmbauplatte	Messwerte [g]	318,39	330,79	330,79	331,12	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	331,21	318,39	
	Zunahme total [g]	0,00	12,40	12,40	12,74	12,82	12,82	12,82	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	93,89	0	
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	56,37	56,37	57,89	58,27	58,27	58,27	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	426,77	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	3,90%	3,90%	4,00%	4,03%	4,03%	4,03%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	29,49%	0,00%	
	Stabw. [g]	0,00	35,28	35,28	35,21	34,97	34,97	34,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	14,97	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	4,8%	4,8%	4,8%	4,7%	4,7%	4,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
S - 5 Lehmputzauflaufbau	Messwerte [g]	325,04	330,46	330,46	330,51	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	330,55	325,04	
	Zunahme total [g]	0,00	5,41	5,41	5,47	5,51	5,51	5,51	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40	0	
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	27,73	27,73	28,37	28,59	28,59	28,59	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	280,02	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	1,69%	1,69%	1,68%	1,69%	1,69%	1,69%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	0,00%
	Stabw. [g]	0,00	1,69	1,69	1,68	1,69	1,69	1,69	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	15,20%	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
S - 9 Brettsperholz	Messwerte [g]	227,81	250,75	254,42	258,33	258,33	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	260,03	227,81	
	Zunahme total [g]	0,00	22,94	27,01	30,53	30,53	33,22	33,22	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	33,62	0	
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	42,49	50,02	56,53	56,53	61,51	61,51	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	62,26	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	10,07%	11,86%	13,40%	13,40%	14,58%	14,58%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	14,78%	0,00%
	Stabw. [g]	0,00	0,62	0,66	0,74	0,74	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
S - 11 Stamplflein	Messwerte [g]	2498,41	2527,62	2534,15	2537,57	2540,53	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2541,85	2498,41	
	Zunahme total [g]	0,00	29,20	35,74	39,15	42,12	43,44	43,44	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	288,04	0	
	Wassergehalt [kg/m³]	0,00	28,10	34,39	37,67	40,53	41,80	41,80	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	277,16	0,00	
	w [kg/kg]	0,00%	1,17%	1,43%	1,57%	1,69%	1,74%	1,74%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	11,53%	0,00%
	Stabw. [g]	0,00	0,58	0,62	0,65	0,68	0,68	0,68	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	0,00	
	gewichtete St. abw [%]	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	

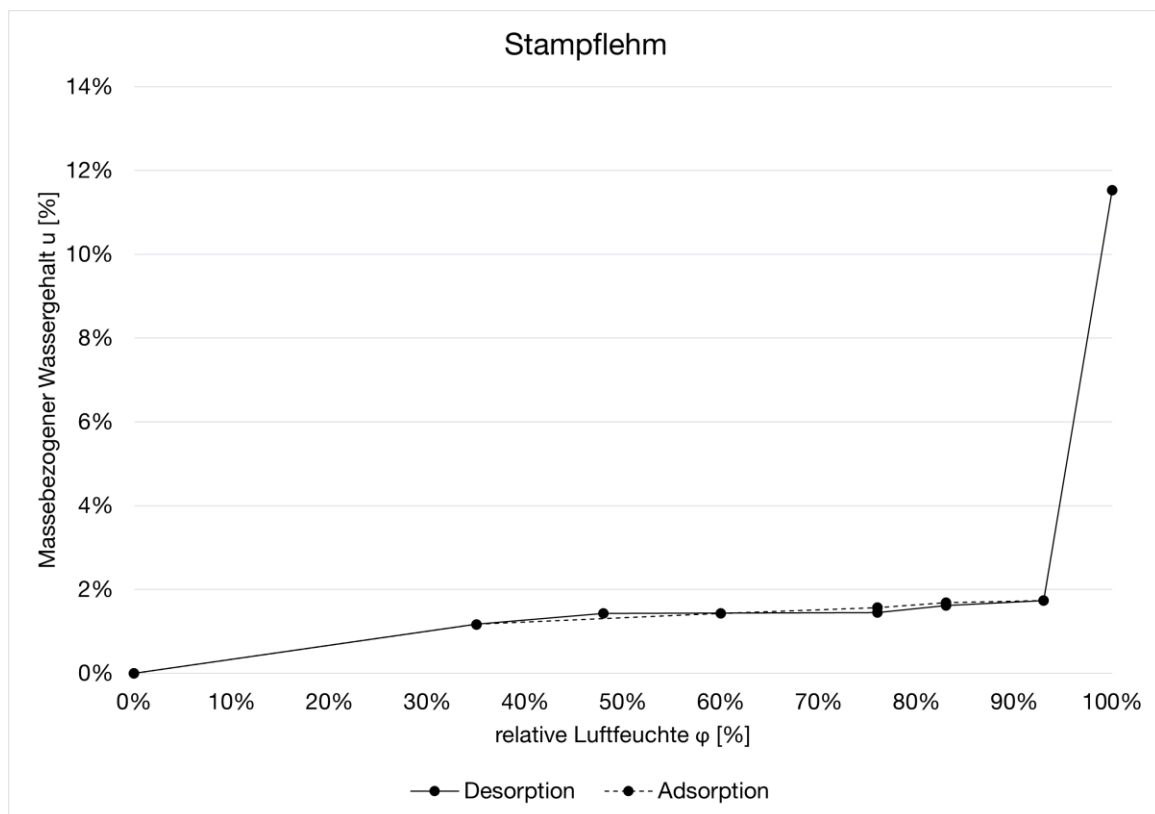
aus zeitlichen Gründen nicht gemessen
 aus technischen Gründen nicht gemessen (Schimmelbildung)
 durch freie Wasseraufnahme ermittelt

Graphische Darstellung der Sorptionsisotherme







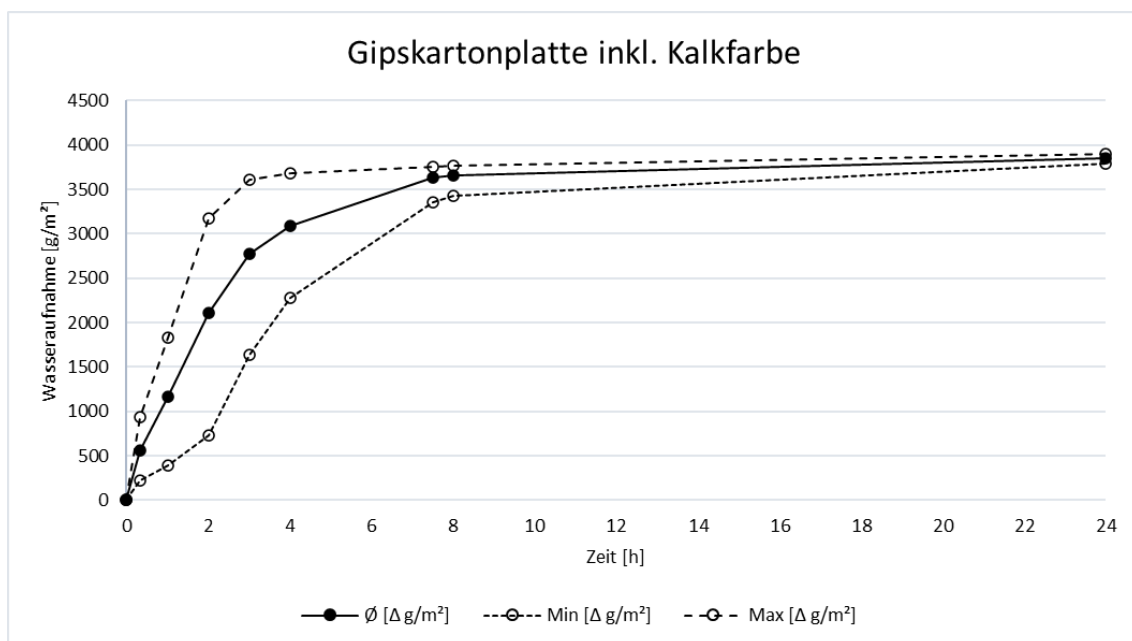
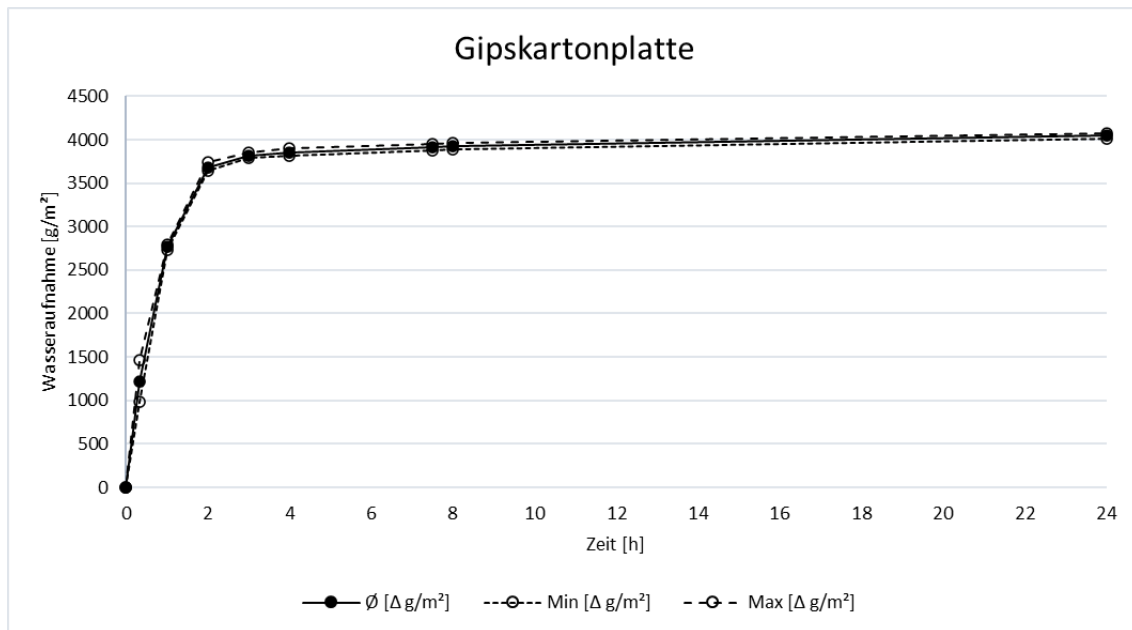


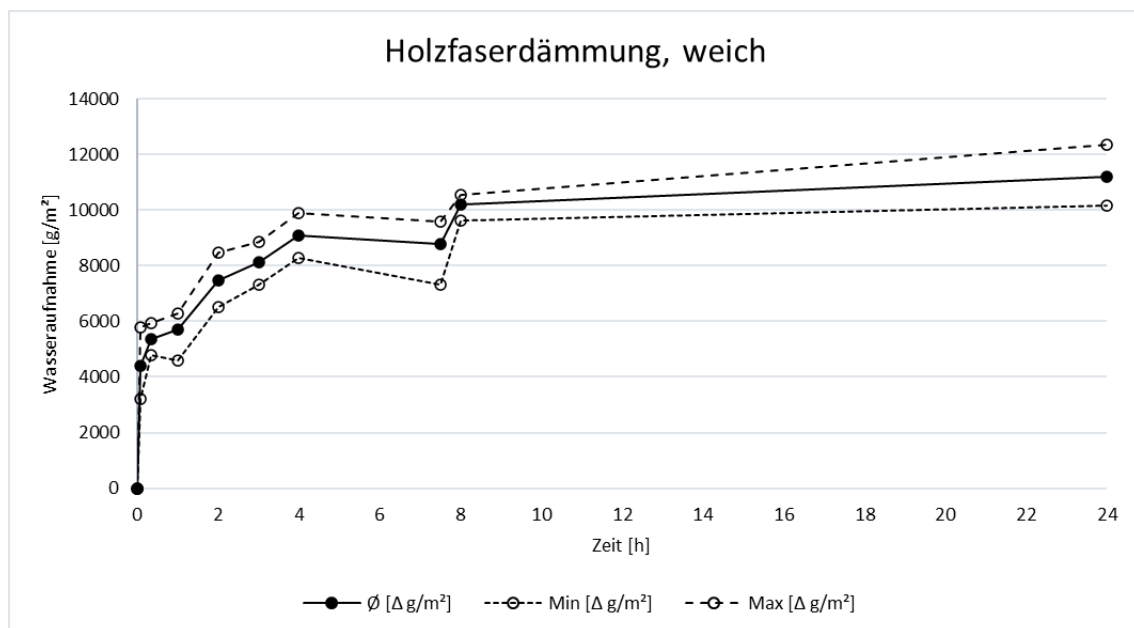
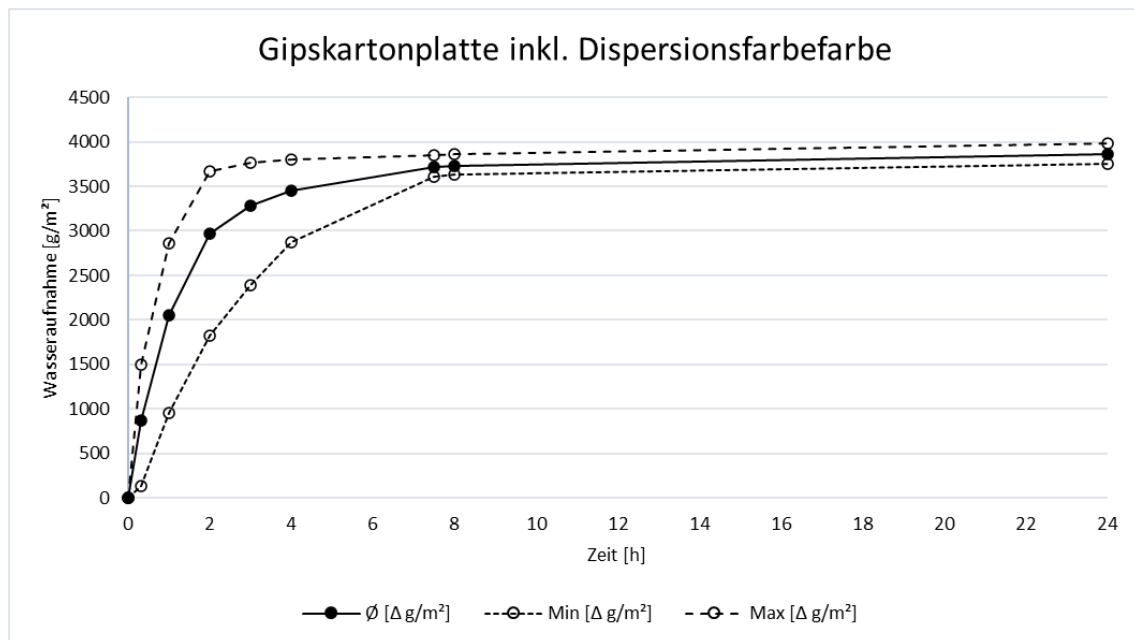
Anhang G.3 freie Wasseraufnahme

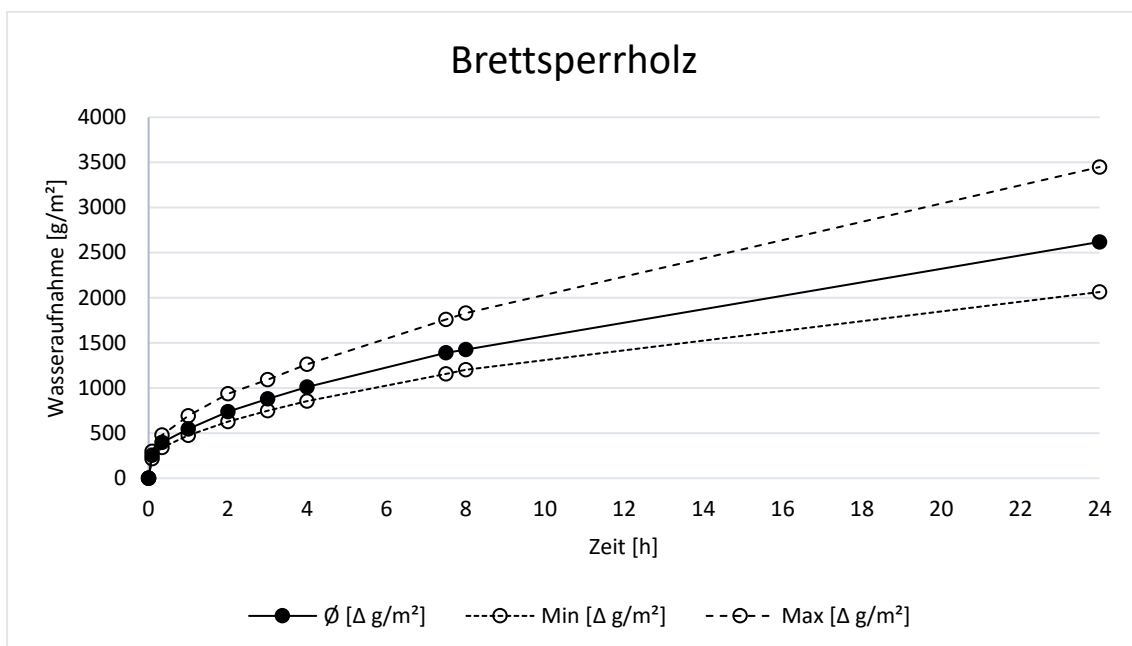
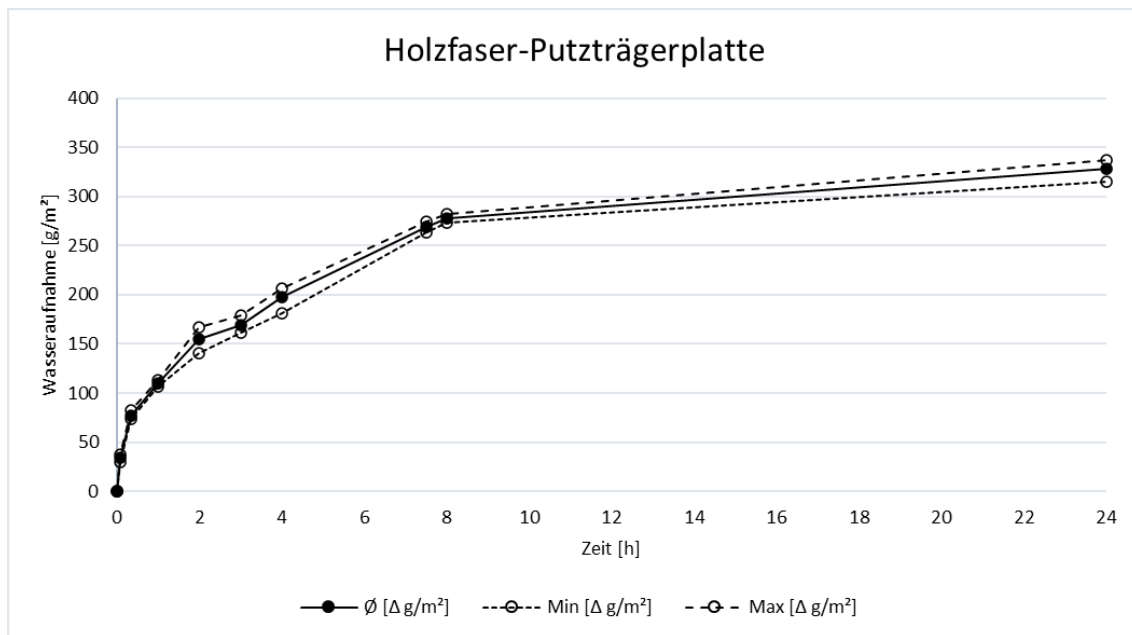
Messprotokoll

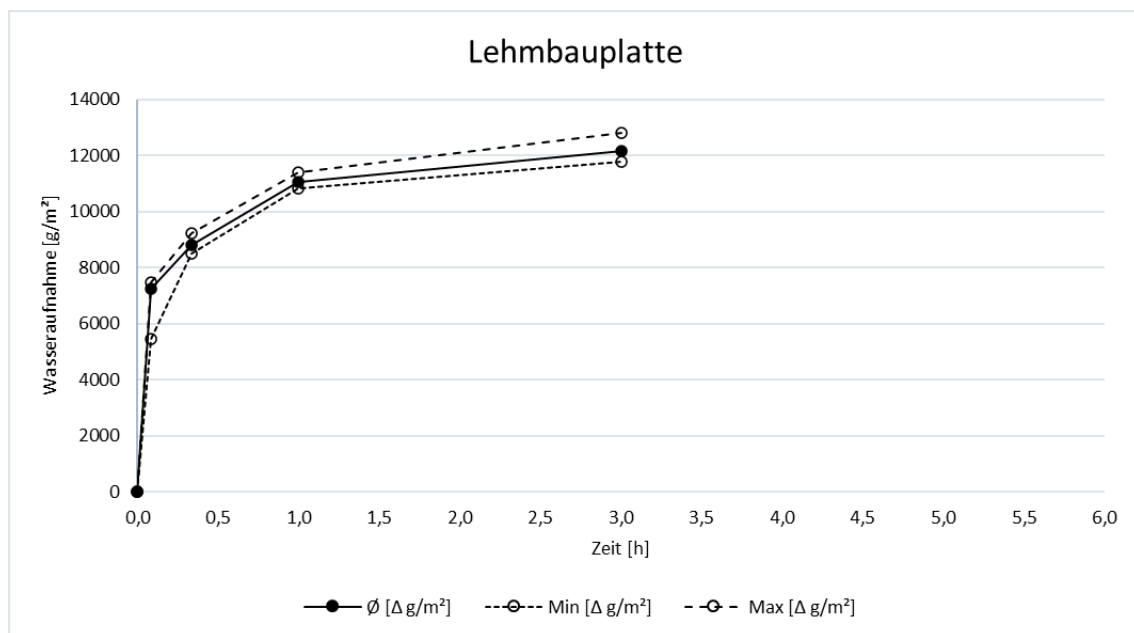
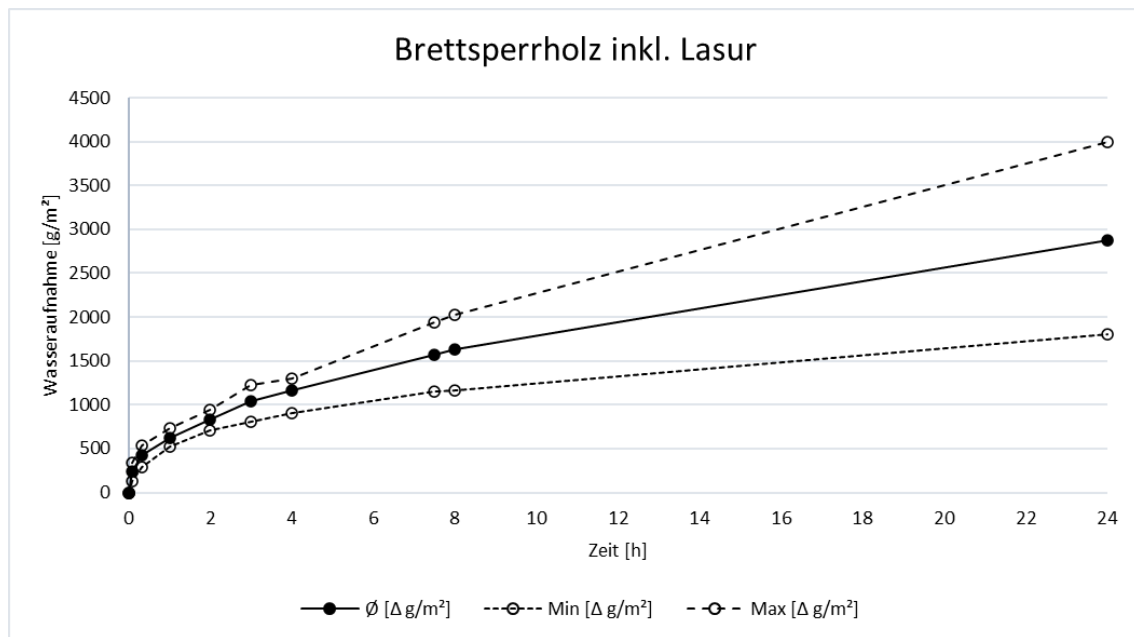
Material	Zahl (n)	Auswertung										Mess- abgang	Sättigung	Kommentar	
		0,00	0,00	0,01	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	24,00				
Gipskartplatte	F-1	Δ [m³]	0,00	12,21	27,65	36,82	39,20	38,58	39,17	39,24	40,45	42,49	Messung [Δg]	40,49	5 min nicht gemessen
		δ [Δg/m²]	0,00	122,67	276,50	368,27	392,00	385,80	391,73	392,40	404,47	424,90	δ [Δg/m²]	424,90	
		Min [Δg/m²]	0,00	98,00	218,00	318,00	338,00	338,00	340,00	340,00	350,00	350,00	Min [Δg/m²]	350,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	146,40	334,60	418,60	446,00	433,60	443,46	444,74	458,94	499,80	Max [Δg/m²]	499,80	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	19,17	22,20	42,00	25,31	33,98	28,59	30,51	28,34	28,39	St.abw. [Δg/m²]	28,39	
		Vp[er]	0,00	15,00	43,00	1,10	0,70	0,05	0,70	0,00	0,70	0,70	Vp[er]	0,70	
Holzfaser-Platzergipsplatte	F-2	Δ [m³]	0,00	0,34	0,77	1,01	1,10	1,09	1,07	1,09	1,28	1,28	Messung [Δg]	17,06	
		δ [Δg/m²]	0,00	33,75	77,00	110,00	114,50	114,50	114,50	114,50	128,00	128,00	δ [Δg/m²]	128,00	
		Min [Δg/m²]	0,00	30,00	74,00	107,00	110,00	110,00	110,00	110,00	124,00	124,00	Min [Δg/m²]	124,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	37,00	80,00	113,00	119,00	119,00	119,00	119,00	132,00	132,00	Max [Δg/m²]	132,00	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	St.abw. [Δg/m²]	3,00	
		Vp[er]	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	Vp[er]	1,00	
Holzfaserdämmung weich	F-3	Δ [m³]	0,00	44,56	136,1	171,01	182,42	182,42	182,42	182,42	182,42	182,42	Messung [Δg]	278,19	
		δ [Δg/m²]	0,00	446,00	1361,25	1710,10	1824,20	1824,20	1824,20	1824,20	1824,20	1824,20	δ [Δg/m²]	1824,20	
		Min [Δg/m²]	0,00	321,00	477,00	607,00	658,00	658,00	658,00	658,00	658,00	658,00	Min [Δg/m²]	658,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	579,00	1946,00	2363,00	2490,00	2490,00	2490,00	2490,00	2490,00	2490,00	Max [Δg/m²]	2490,00	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	94,00	480,00	656,00	732,00	732,00	732,00	732,00	732,00	732,00	St.abw. [Δg/m²]	732,00	
		Vp[er]	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	Vp[er]	1,00	
Lehmziegelplatte	F-4	Δ [m³]	0,00	59,66	91,38								Messung [Δg]		Abgebrochen, da Probekörper auseinander gefallen ist
		δ [Δg/m²]	0,00	596,60	913,80								δ [Δg/m²]		
		Min [Δg/m²]	0,00	280,00	789,00								Min [Δg/m²]		
		Max [Δg/m²]	0,00	893,00	1039,00								Max [Δg/m²]		
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	286,46	125,32								St.abw. [Δg/m²]		
		Vp[er]	0,00	29,76	23,60								Vp[er]		
Lehmputzauflage	F-5	Δ [m³]	0,00	0,03	14,43	14,51							Messung [Δg]		Abgebrochen, da Probekörper auseinander gefallen ist
		δ [Δg/m²]	0,00	2,85	1482,00	1450,75							δ [Δg/m²]		
		Min [Δg/m²]	0,00	1,00	1366,00	1366,00							Min [Δg/m²]		
		Max [Δg/m²]	0,00	4,00	1600,00	1927,00							Max [Δg/m²]		
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	1,00	112,04	49,25							St.abw. [Δg/m²]		
		Vp[er]	0,00	40,40	2,90								Vp[er]		
Lehmziegelplatte + Lehmdegsputz	F-6	Δ [m³]	0,00	15,03	17,56								Messung [Δg]		Abgebrochen, da Probekörper auseinander gefallen ist
		δ [Δg/m²]	0,00	1503,75	1756,25								δ [Δg/m²]		
		Min [Δg/m²]	0,00	1248,00	1384,00								Min [Δg/m²]		
		Max [Δg/m²]	0,00	1643,00	2785,00								Max [Δg/m²]		
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	113,99	792,29								St.abw. [Δg/m²]		
		Vp[er]	0,00	10,11	13,05								Vp[er]		
Gipskartplatte + Kalkleiste	F-7	Δ [m³]	0,00	5,63	11,89	21,26	27,71	30,24	36,11	36,61	38,58	43,09	Messung [Δg]	43,09	5 min nicht gemessen
		δ [Δg/m²]	0,00	56,30	118,90	212,60	277,10	302,40	361,10	366,10	385,80	430,90	δ [Δg/m²]	430,90	
		Min [Δg/m²]	0,00	224,00	390,00	720,00	104,00	228,00	334,00	347,00	374,00	433,00	Min [Δg/m²]	433,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	950,00	1827,00	3170,00	3650,00	389,00	1754,00	1771,00	1898,00	2170,00	Max [Δg/m²]	2170,00	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	258,79	577,42	990,23	876,19	813,27	576,40	161,15	137,17	42,10	St.abw. [Δg/m²]	42,10	
		Vp[er]	0,00	40,76	40,46	47,26	29,36	38,06	45,86	3,76	1,51	20,20	Vp[er]	20,20	
Gipskartplatte + Dispersionsfarbe	F-8	Δ [m³]	0,00	0,71	1,48	1,88	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	Messung [Δg]	43,45	5 min nicht gemessen
		δ [Δg/m²]	0,00	870,75	2084,00	2964,25	3282,50	3448,00	3715,00	3730,00	3861,00	4345,25	δ [Δg/m²]	4345,25	
		Min [Δg/m²]	0,00	156,00	460,00	1020,00	1260,00	1360,00	1460,00	1460,00	1560,00	1740,00	Min [Δg/m²]	1740,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	1503,00	2884,00	3664,00	3760,00	3803,00	3851,00	3861,00	3861,00	4470,00	Max [Δg/m²]	4470,00	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	503,50	713,00	663,19	52,40	147,00	90,61	87,55	91,85	96,82	St.abw. [Δg/m²]	96,82	
		Vp[er]	0,00	17,89	34,85	23,45	16,00	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	Vp[er]	10,15	
Brettsperholz mit Lasuren	F-9	Δ [m³]	0,00	2,34	9,97	14,45	17,77	20,09	13,89	14,24	16,18	110,18	Messung [Δg]	110,18	
		δ [Δg/m²]	0,00	234,00	997,00	1445,00	1777,00	2009,00	1389,00	1424,00	1618,00	11017,75	δ [Δg/m²]	11017,75	
		Min [Δg/m²]	0,00	211,00	389,00	470,00	620,00	740,00	850,00	114,00	1200,00	2084,00	Min [Δg/m²]	2084,00	
		Max [Δg/m²]	0,00	296,00	479,00	691,00	939,00	1090,00	1263,00	1750,00	1828,00	1848,00	Max [Δg/m²]	1848,00	
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	78,15	93,31	85,44	127,88	128,78	113,31	233,94	239,51	121,91	St.abw. [Δg/m²]	121,91	
		Vp[er]	0,00	11,15	14,95	15,76	16,00	14,76	15,21	15,16	16,80	19,76	Vp[er]	19,76	
Brettsperholz	F-10	Δ [m³]	0,00	2,38	4,19	6,26	8,28	10,42	11,59	15,72	16,26	28,73	Messung [Δg]		Abgebrochen, da Probekörper auseinander gefallen ist
		δ [Δg/m²]	0,00	238,00	419,00	626,00	828,00	1042,00	1159,00	1572,00	1626,00	2873,00	δ [Δg/m²]		
		Min [Δg/m²]	0,00	120,00	204,00	320,00	400,00	480,00	510,00	1140,00	1159,00	1809,00	Min [Δg/m²]		
		Max [Δg/m²]	0,00	343,00	556,00	710,00	840,00	1210,00	1280,00	2010,00	2040,00	3990,00	Max [Δg/m²]		
		St.abw. [Δg/m²]	0,00	83,77	84,00	74,82	81,66	116,34	134,13	233,09	275,33	792,21	St.abw. [Δg/m²]		
		Vp[er]	0,00	35,16	20,76	12,06	9,96	13,06	13,06	16,06	16,06	27,06	Vp[er]	27,06	

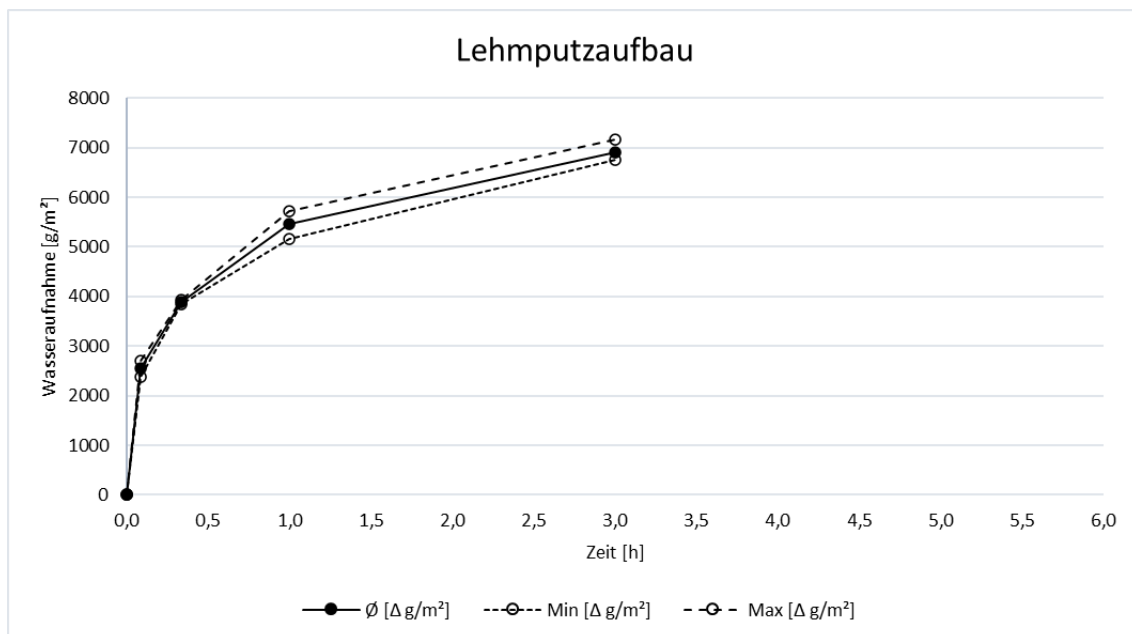
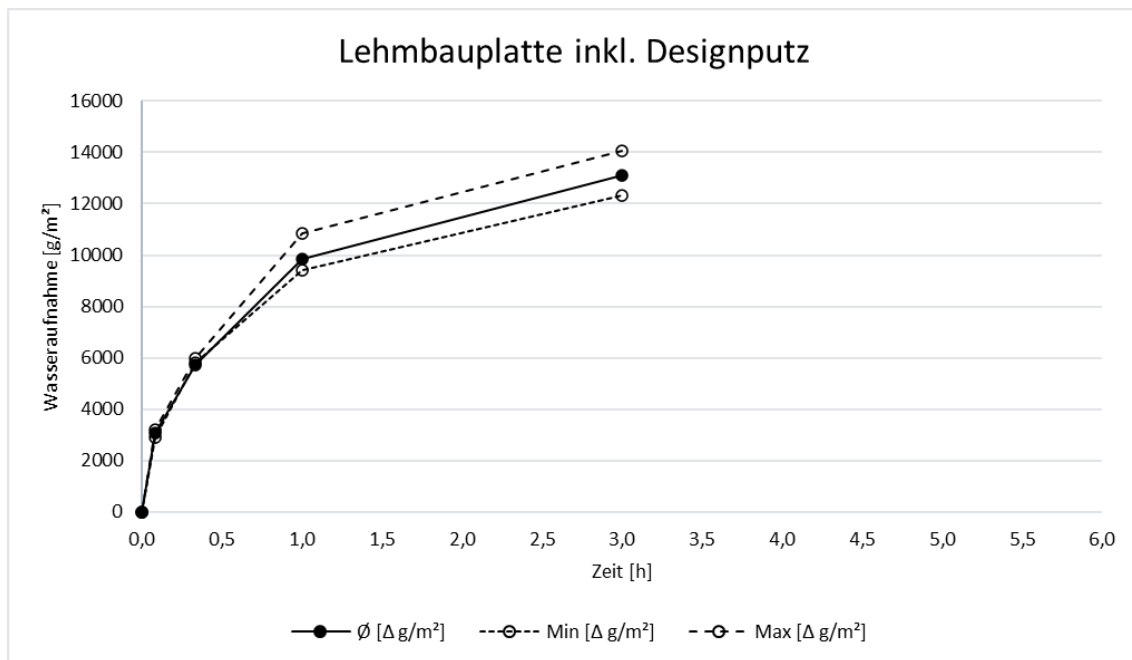
Graphische Darstellung der freien Wasseraufnahme der Baustoffe

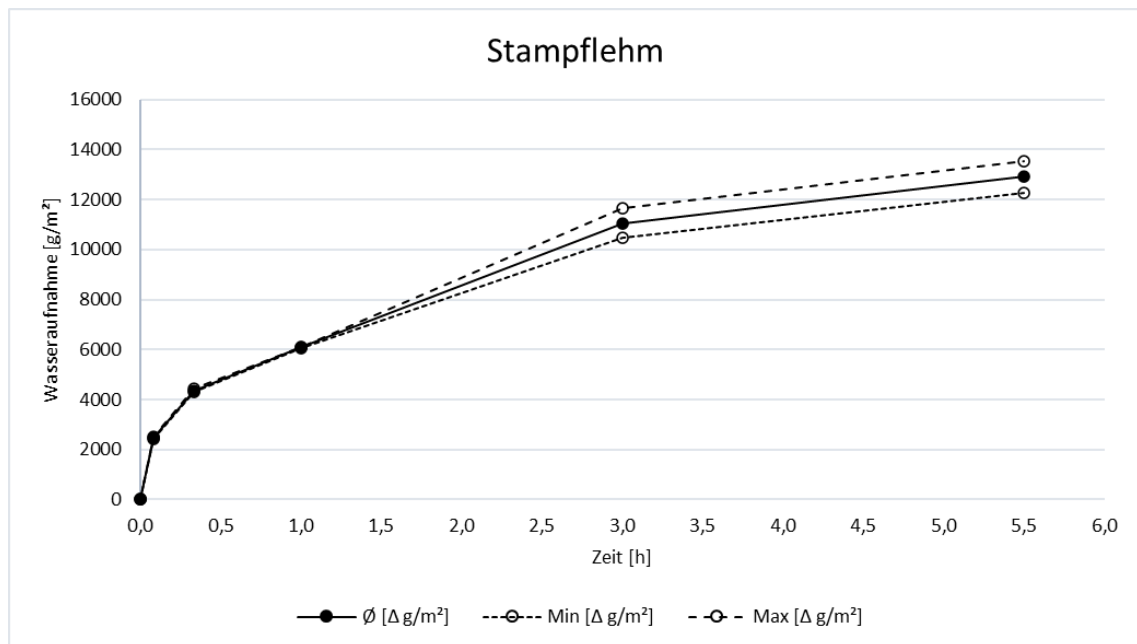










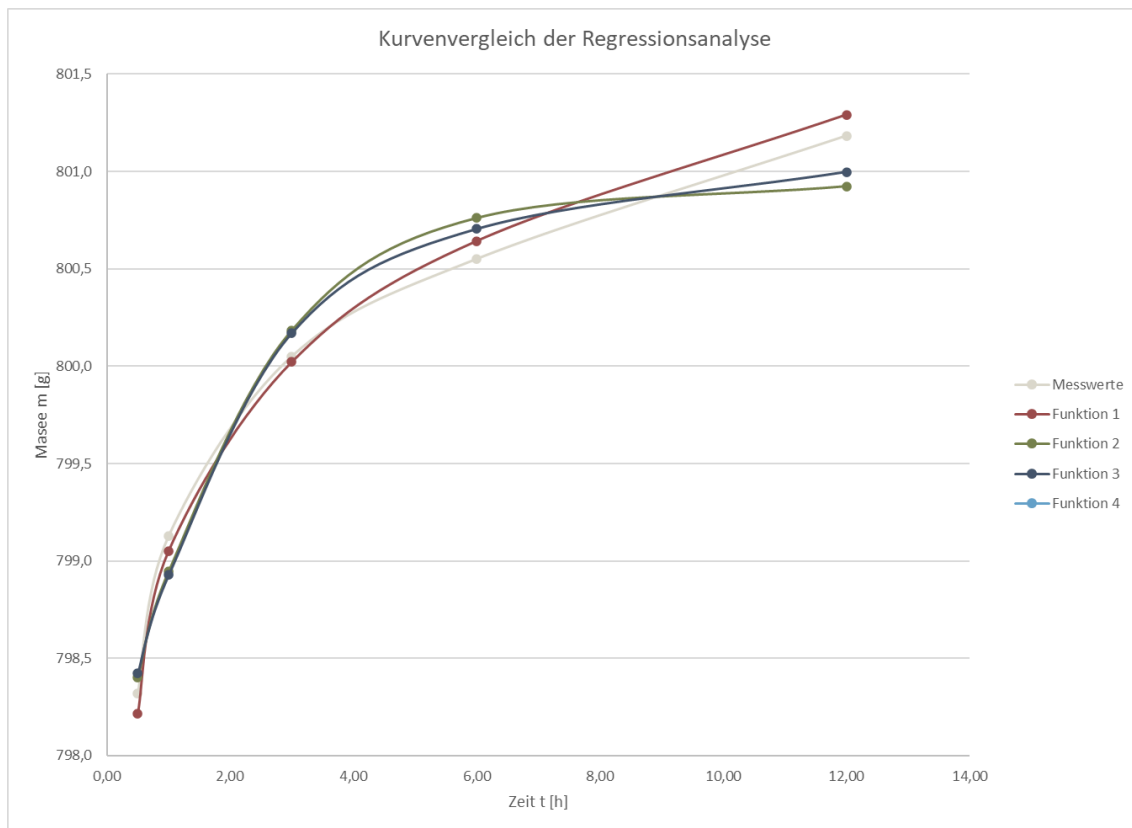


Anhang G.4 Dynamische Sorptionsfähigkeit

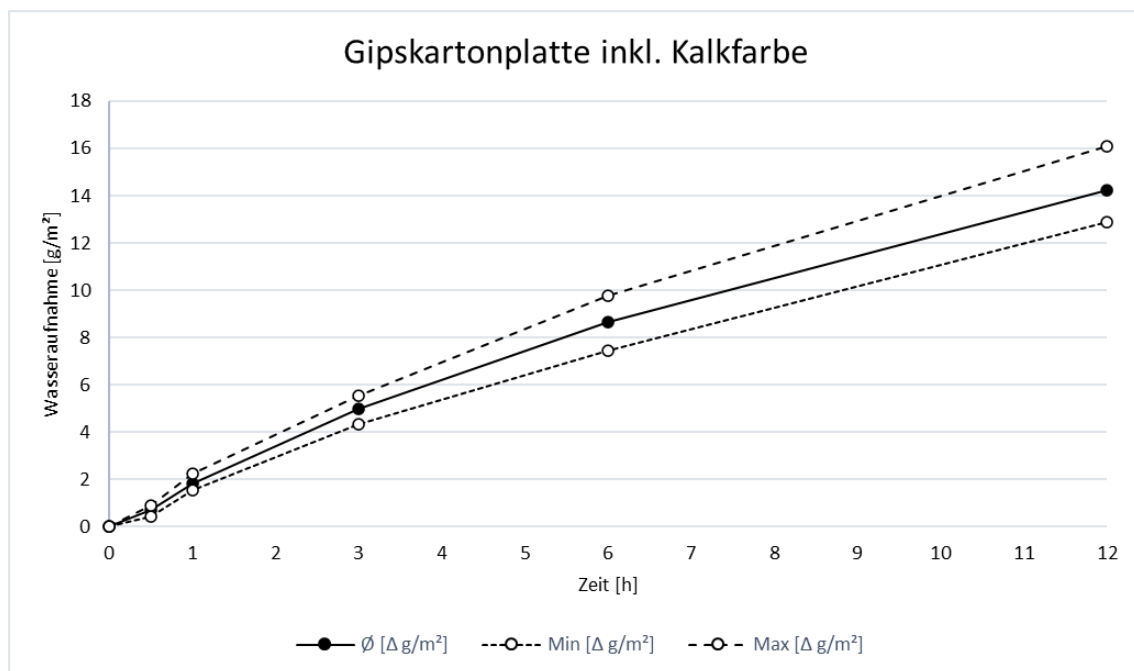
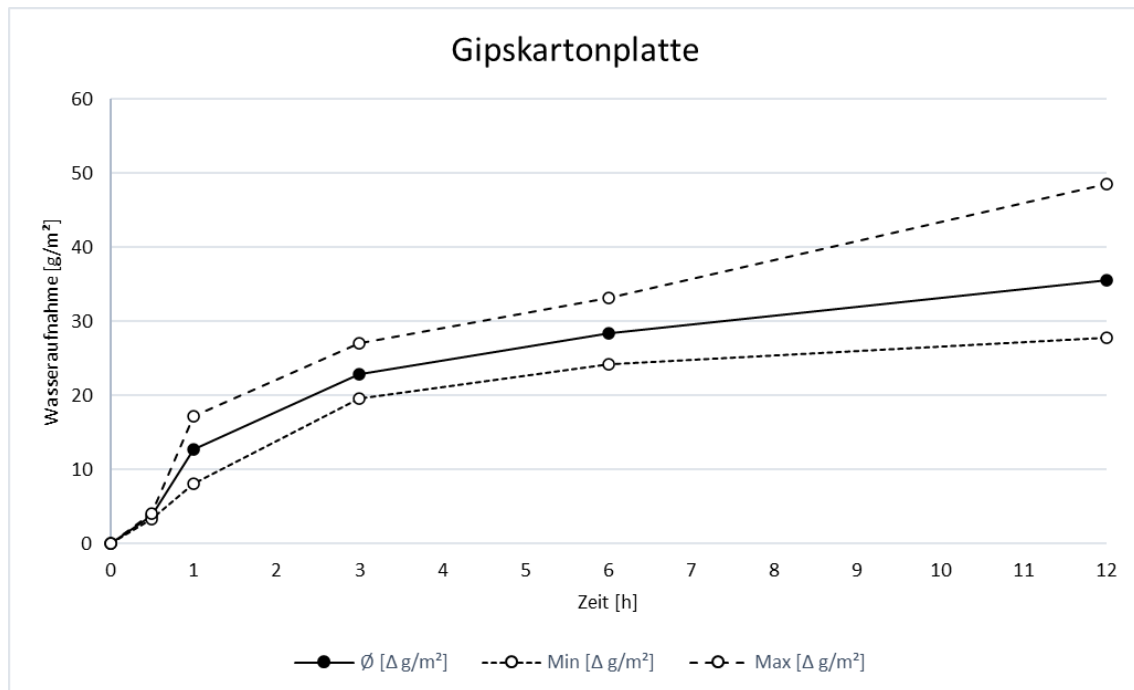
Messprotokoll

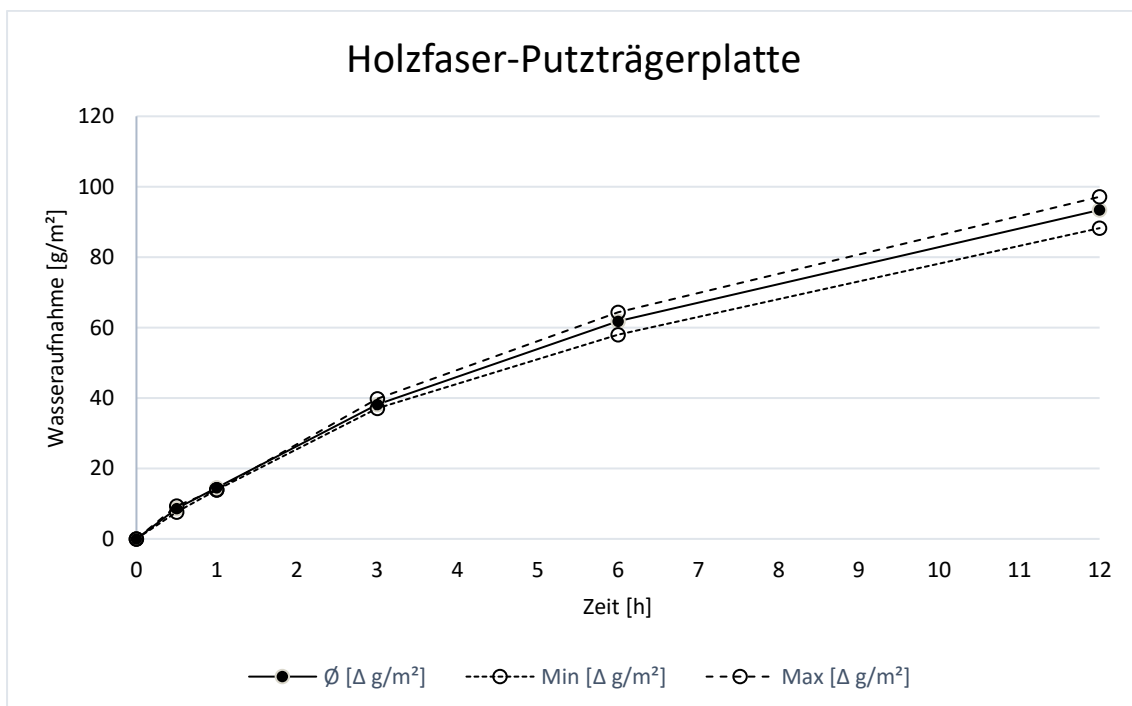
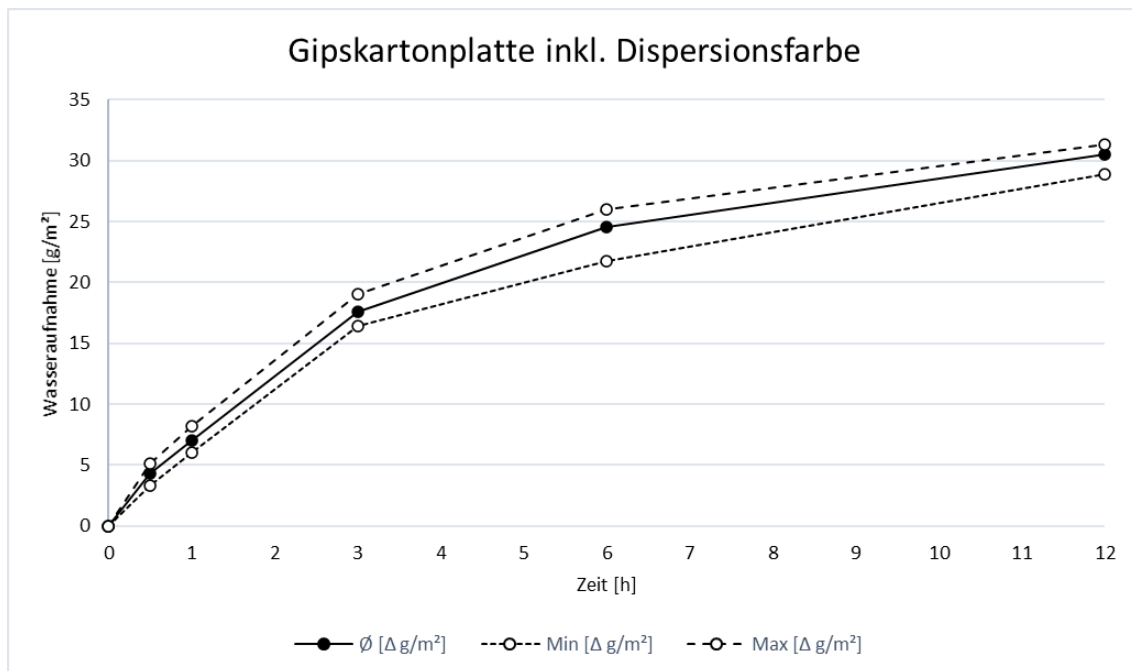
Material	Oberfläche m²	Zeit [h]	Auswertung						Kommentar	
			0,0	0,5	1,0	3,0	6,0	12,0		
Gipskartonplatte	D - 1	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,33	1,14	2,06	2,56	3,19	17%
			φ [Δ g/m²]	0,00	3,68	12,66	22,91	28,46	35,49	
			Min [Δ g/m²]	0,00	3,22	8,00	19,56	24,22	27,78	
			Max [Δ g/m²]	0,00	4,11	17,11	27,00	33,11	48,56	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	0,34	3,31	3,25	3,60	8,05	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		9%	26%	14%	13%	23%	
			WUFI [Δ g]	0,00	5,48	7,93	11,62	12,43	12,50	
			Messung [Δ g]	0,00	0,73	1,23	3,21	5,20	7,86	
			φ [Δ g/m²]	0,00	8,65	14,57	38,14	61,84	93,40	
			Min [Δ g/m²]	0,00	7,63	13,93	37,11	58,04	88,24	
Holzfaser-Putzträgerplatte	D - 2	0,084	Messung [Δ g]	0,00	0,51	1,07	2,71	4,48	7,01	5%
			φ [Δ g/m²]	0,00	5,70	10,73	30,06	49,75	77,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	3,67	8,01	27,90	48,01	75,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	6,89	12,89	31,67	52,85	82,40	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	1,21	1,96	1,41	1,88	2,76	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		21%	18%	5%	4%	4%	
			WUFI [Δ g]	0,00	9,06	12,75	22,97	33,46	48,62	
			Messung [Δ g]	0,00	0,37	0,74	1,93	3,21	4,85	
			φ [Δ g/m²]	0,00	4,14	8,22	21,44	35,67	53,89	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	7,56	19,00	30,11	48,89	
Holzfaserdämmung, weich	D - 3	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,30	0,67	1,80	3,11	5,20	15%
			φ [Δ g/m²]	0,00	3,33	7,50	20,06	34,53	57,81	
			Min [Δ g/m²]	0,00	2,33	5,33	18,00	32,56	55,89	
			Max [Δ g/m²]	0,00	4,11	9,44	21,00	36,56	61,11	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	0,64	1,80	1,21	1,44	1,97	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		19%	24%	6%	4%	3%	
			WUFI [Δ g]	0,00	1,42	4,13	13,53	24,98	42,61	
			Messung [Δ g]	0,00	0,07	0,17	0,45	0,78	1,28	
			φ [Δ g/m²]	0,00	0,72	1,83	5,00	8,64	14,25	
			Min [Δ g/m²]	0,00	0,44	1,56	4,33	7,44	12,89	
Lehmputzträgerplatte	D - 4	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,47	1,08	2,73	4,59	7,29	10%
			φ [Δ g/m²]	0,00	5,22	12,08	30,33	50,99	79,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	10,00	11,89	25,33	34,11	49,22	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	3,17	3,33	3,79	2,24	2,13	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		61%	47%	19%	7%	5%	
			WUFI [Δ g]	0,00	56,66	87,46	170,47	254,94	376,31	
			Messung [Δ g]	0,00	0,75	0,83	1,22	1,52	2,04	
			φ [Δ g/m²]	0,00	28,77	31,75	46,86	58,50	78,33	
			Min [Δ g/m²]	0,00	6,93	12,32	26,56	30,41	50,42	
Lehmputzaufbau	D - 5	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,51	1,07	2,71	4,48	7,01	16%
			φ [Δ g/m²]	0,00	5,70	10,73	30,06	49,75	77,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	3,67	8,01	27,90	48,01	75,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	6,89	12,89	31,67	52,85	82,40	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	1,21	1,96	1,41	1,88	2,76	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		21%	18%	5%	4%	4%	
			WUFI [Δ g]	0,00	9,06	12,75	22,97	33,46	48,62	
			Messung [Δ g]	0,00	0,30	0,67	1,80	3,11	5,20	
			φ [Δ g/m²]	0,00	3,33	7,50	20,06	34,53	57,81	
			Min [Δ g/m²]	0,00	2,33	5,33	18,00	32,56	55,89	
Lehmputzträgerplatte inkl. Lehmdesignputz	D - 6	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,30	0,67	1,80	3,11	5,20	11%
			φ [Δ g/m²]	0,00	3,33	7,50	20,06	34,53	57,81	
			Min [Δ g/m²]	0,00	2,33	5,33	18,00	32,56	55,89	
			Max [Δ g/m²]	0,00	4,11	9,44	21,00	36,56	61,11	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	0,64	1,80	1,21	1,44	1,97	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		19%	24%	6%	4%	3%	
			WUFI [Δ g]	0,00	1,42	4,13	13,53	24,98	42,61	
			Messung [Δ g]	0,00	0,07	0,17	0,45	0,78	1,28	
			φ [Δ g/m²]	0,00	0,72	1,83	5,00	8,64	14,25	
			Min [Δ g/m²]	0,00	0,44	1,56	4,33	7,44	12,89	
Gipskartonplatte inkl. Kalkfarbe	D - 7	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,38	0,63	1,58	2,21	2,74	9%
			φ [Δ g/m²]	0,00	4,28	6,97	17,58	24,58	30,47	
			Min [Δ g/m²]	0,00	3,32	5,99	16,44	21,77	28,88	
			Max [Δ g/m²]	0,00	5,11	8,22	19,00	26,00	31,33	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	0,68	0,85	1,07	1,71	1,00	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		16%	12%	6%	7%	3%	
			WUFI [Δ g]	0,00	2,77	4,62	8,68	11,20	12,25	
			Messung [Δ g]	0,00	0,11	0,46	1,30	2,30	3,91	
			φ [Δ g/m²]	0,00	1,22	5,11	14,42	25,53	43,47	
			Min [Δ g/m²]	0,00	0,44	1,78	12,33	23,00	38,22	
Gipskartonplatte inkl. Dispersionsfarbe	D - 8	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,47	1,08	2,73	4,59	7,29	27%
			φ [Δ g/m²]	0,00	5,22	12,08	30,33	50,99	79,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	10,00	11,89	25,33	34,11	49,22	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	3,17	3,33	3,79	2,24	2,13	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		61%	47%	19%	7%	5%	
			WUFI [Δ g]	0,00	56,66	87,46	170,47	254,94	376,31	
			Messung [Δ g]	0,00	0,75	0,83	1,22	1,52	2,04	
			φ [Δ g/m²]	0,00	28,77	31,75	46,86	58,50	78,33	
			Min [Δ g/m²]	0,00	6,93	12,32	26,56	30,41	50,42	
Brettsperholz	D - 9	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,75	1,08	2,73	4,59	7,29	28%
			φ [Δ g/m²]	0,00	8,33	12,08	30,33	50,99	79,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	10,00	11,89	25,33	34,11	49,22	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	3,17	3,33	3,79	2,24	2,13	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		61%	47%	19%	7%	5%	
			WUFI [Δ g]	0,00	56,66	87,46	170,47	254,94	376,31	
			Messung [Δ g]	0,00	0,47	0,64	1,75	2,73	4,17	
			φ [Δ g/m²]	0,00	5,22	7,08	19,42	30,33	46,39	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
Brettsperholz inkl. Lasur	D - 10	0,090	Messung [Δ g]	0,00	0,75	1,08	2,73	4,59	7,29	35%
			φ [Δ g/m²]	0,00	8,33	12,08	30,33	50,99	79,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	10,00	11,89	25,33	34,11	49,22	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	3,17	3,33	3,79	2,24	2,13	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		61%	47%	19%	7%	5%	
			WUFI [Δ g]	0,00	56,66	87,46	170,47	254,94	376,31	
			Messung [Δ g]	0,00	0,75	0,83	1,22	1,52	2,04	
			φ [Δ g/m²]	0,00	28,77	31,75	46,86	58,50	78,33	
			Min [Δ g/m²]	0,00	6,93	12,32	26,56	30,41	50,42	
Stampflehm	D - 11	0,026	Messung [Δ g]	0,00	0,75	1,08	2,73	4,59	7,29	17%
			φ [Δ g/m²]	0,00	8,33	12,08	30,33	50,99	79,86	
			Min [Δ g/m²]	0,00	1,67	3,22	16,11	28,67	44,11	
			Max [Δ g/m²]	0,00	10,00	11,89	25,33	34,11	49,22	
			St.abw. [Δ g/m²]	0,00	3,17	3,33	3,79	2,24	2,13	
			gewichtete St.abw. [Δ g/m²]		61%	47%	19%	7%	5%	
			WUFI [Δ g]	0,00	21,65	33,79	66,00	98,33	143,13	
			Messung [Δ g]	0,00	0,75	0,83	1,22	1,52	2,04	
			φ [Δ g/m²]	0,00	28,77	31,75	46,86	58,50	78,33	
			Min [Δ g/m²]	0,00	6,93	12,32	26,56	30,41	50,42	

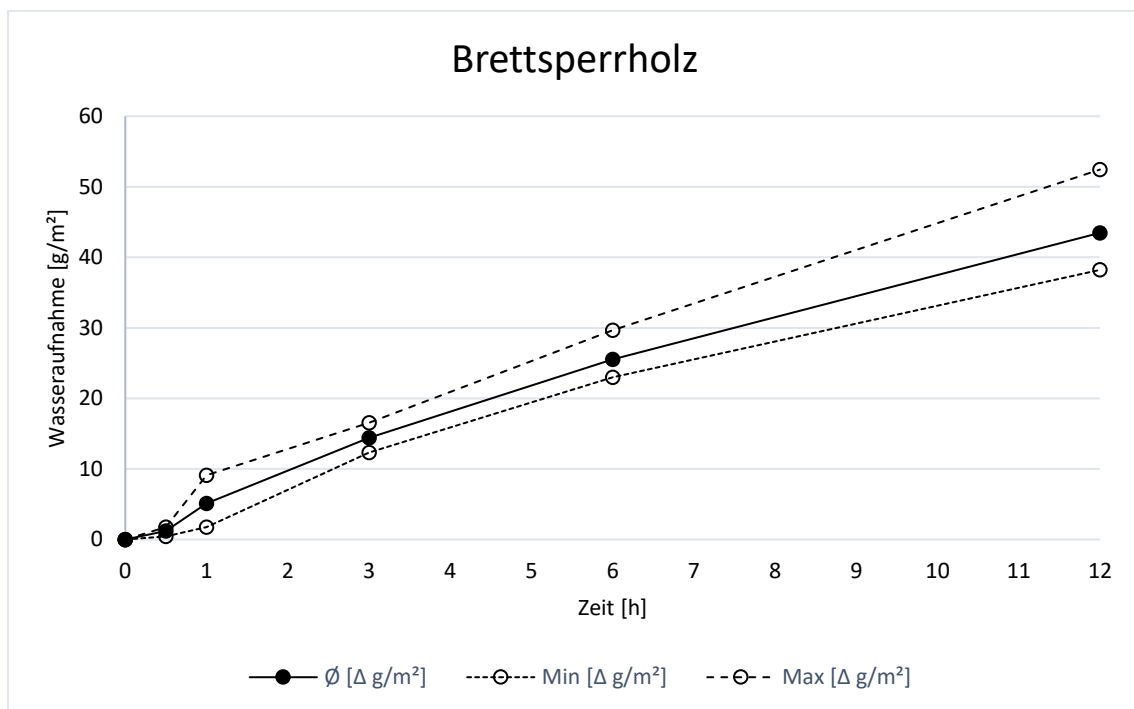
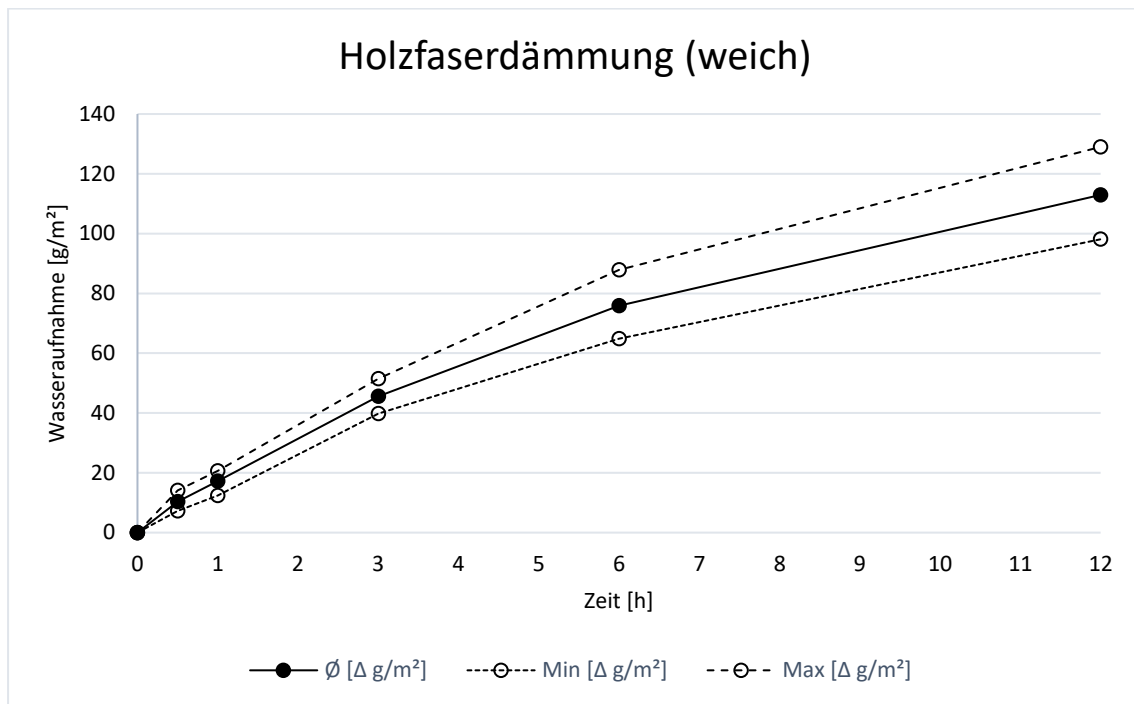
Formel 6-eck: $A = 3/2 \cdot a^2 \cdot \sqrt{3}$
 mit $a = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

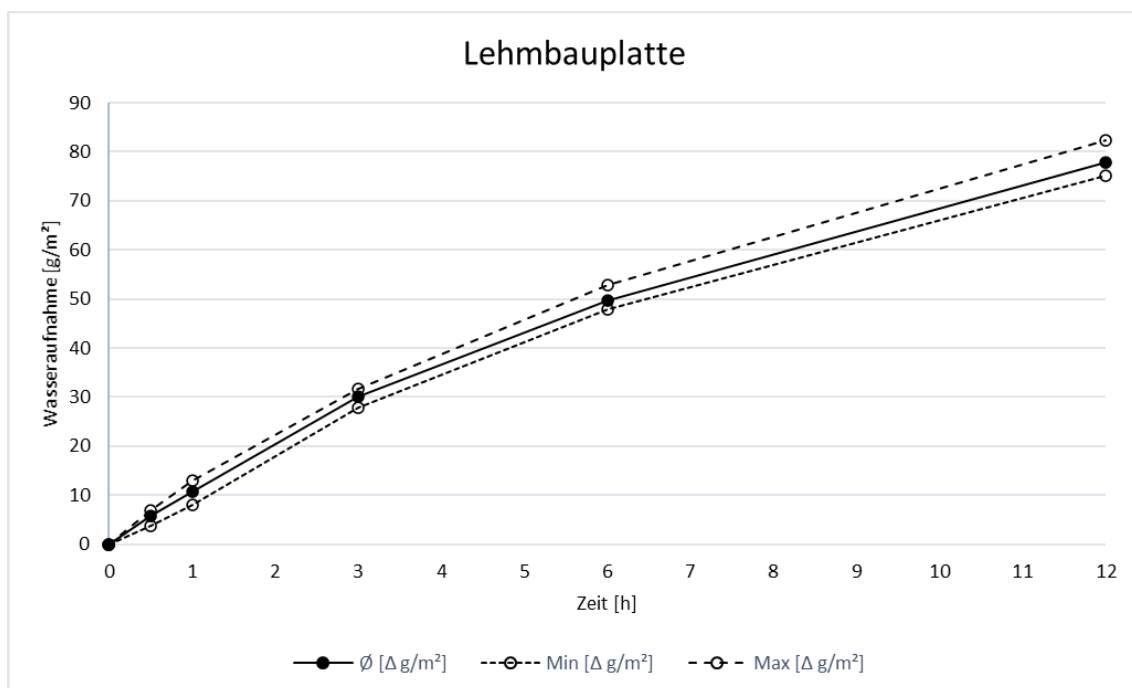
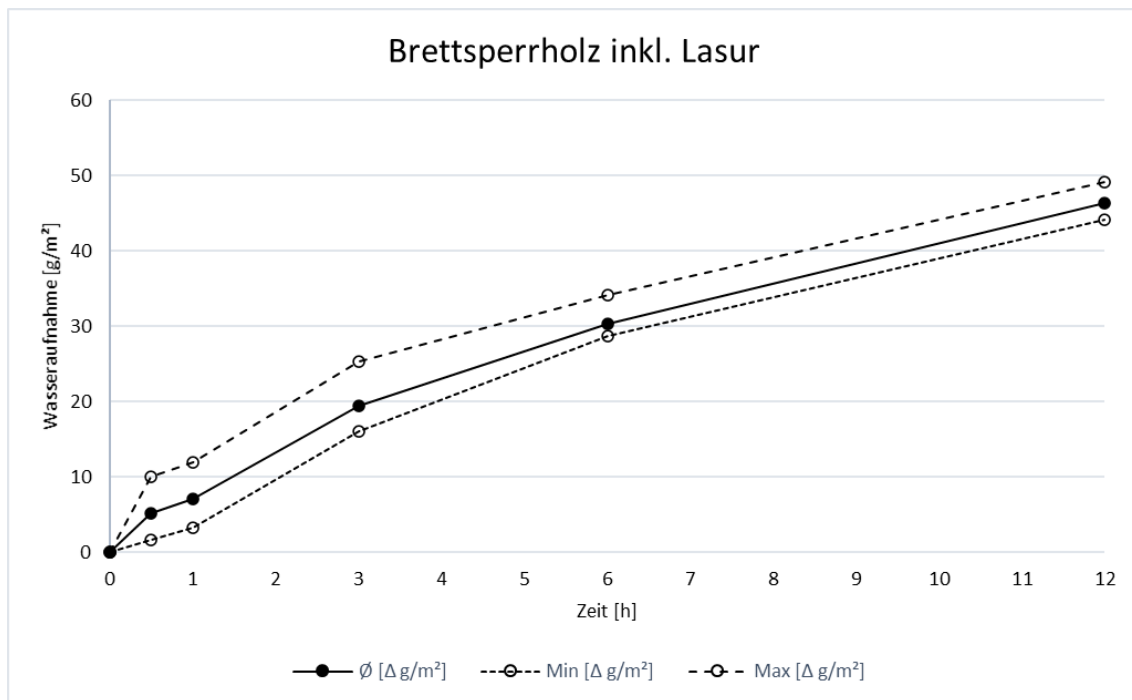


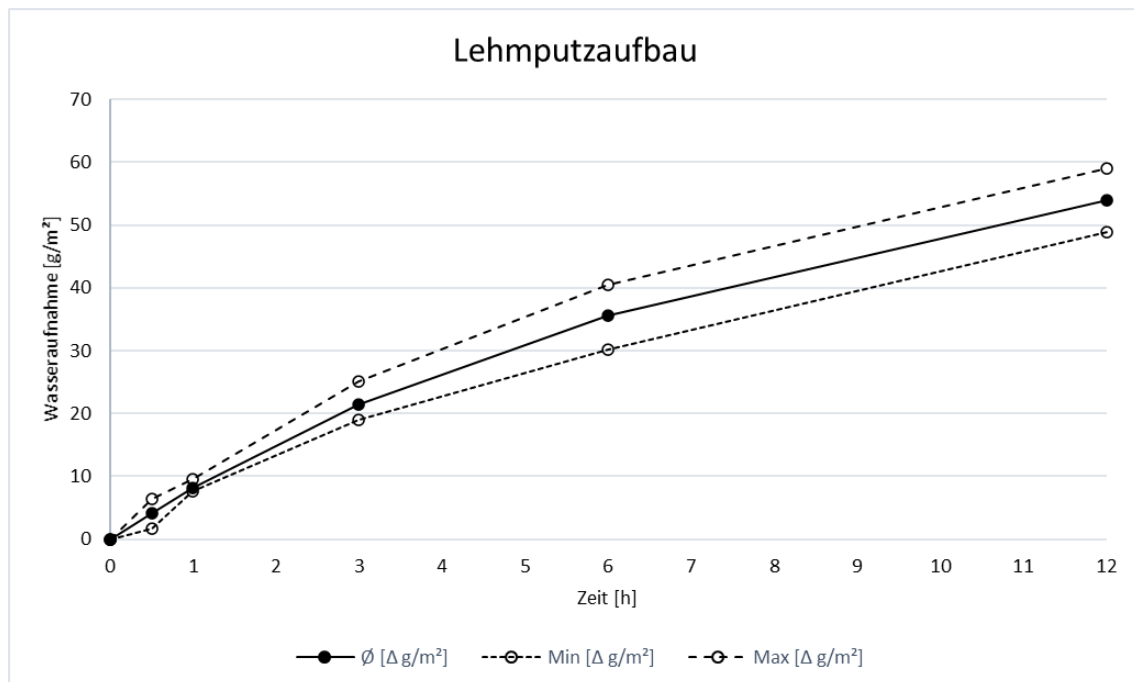
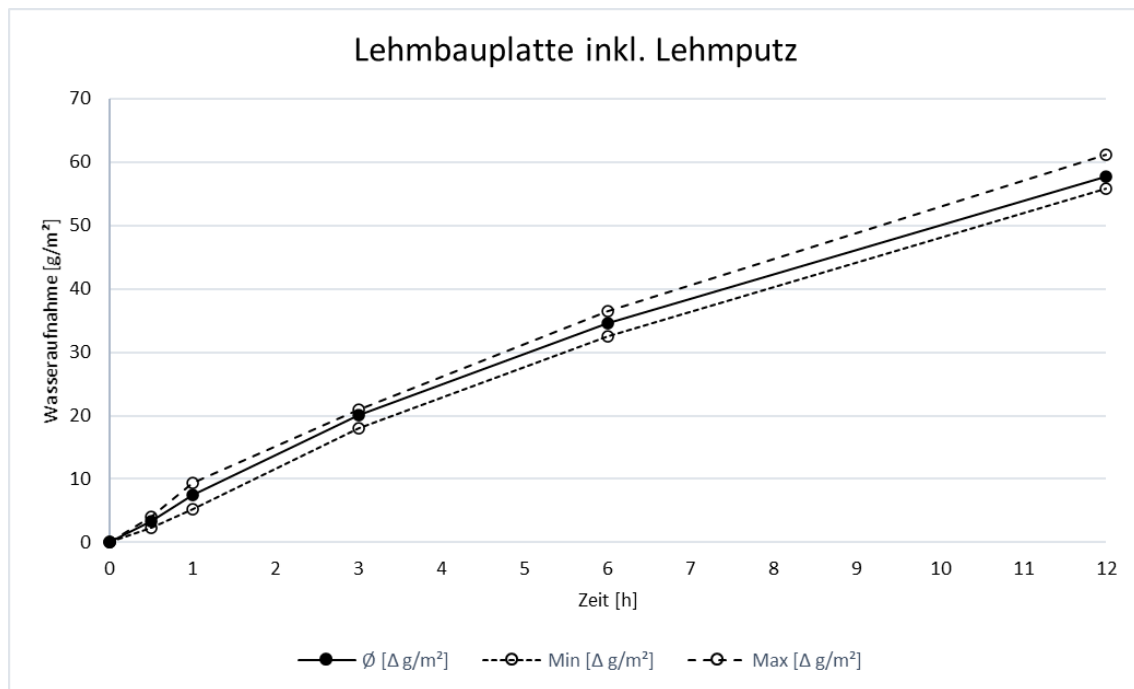
Graphische Darstellung der dynamische Sorptionsfähigkeit

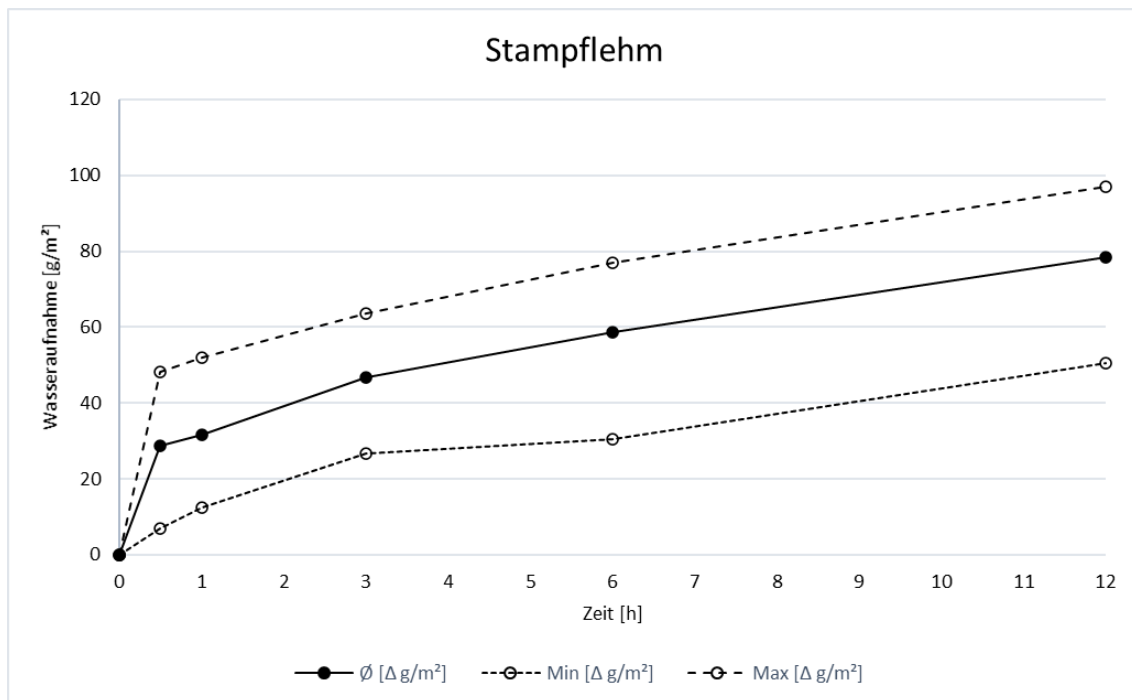




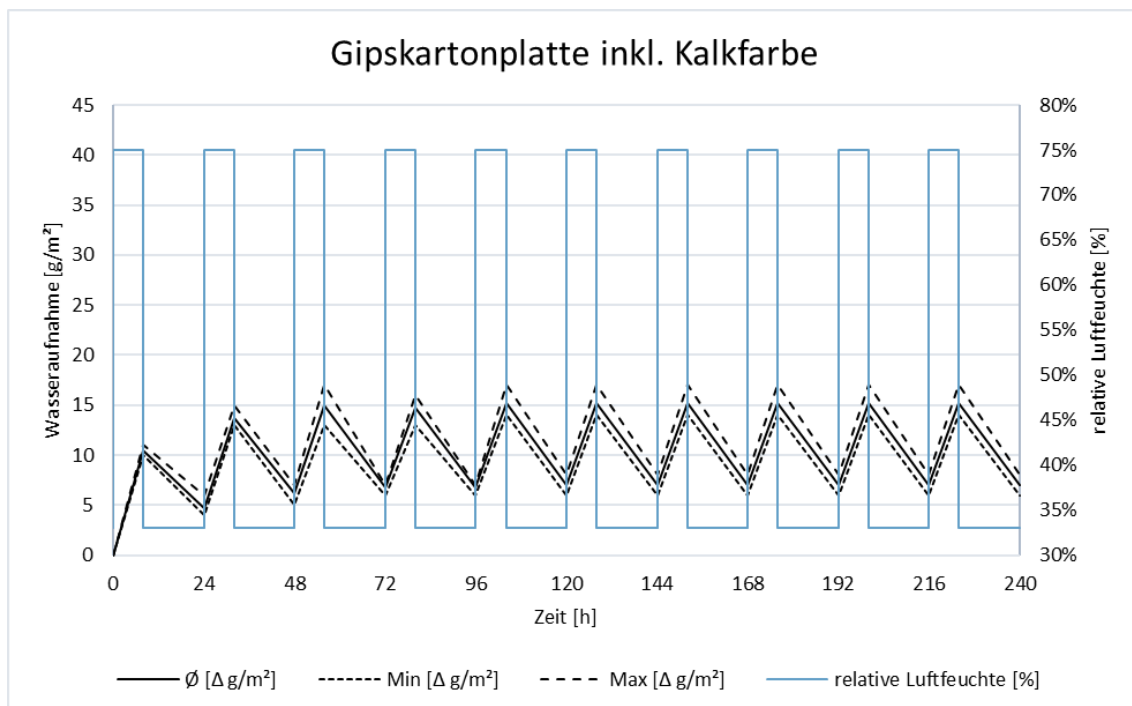
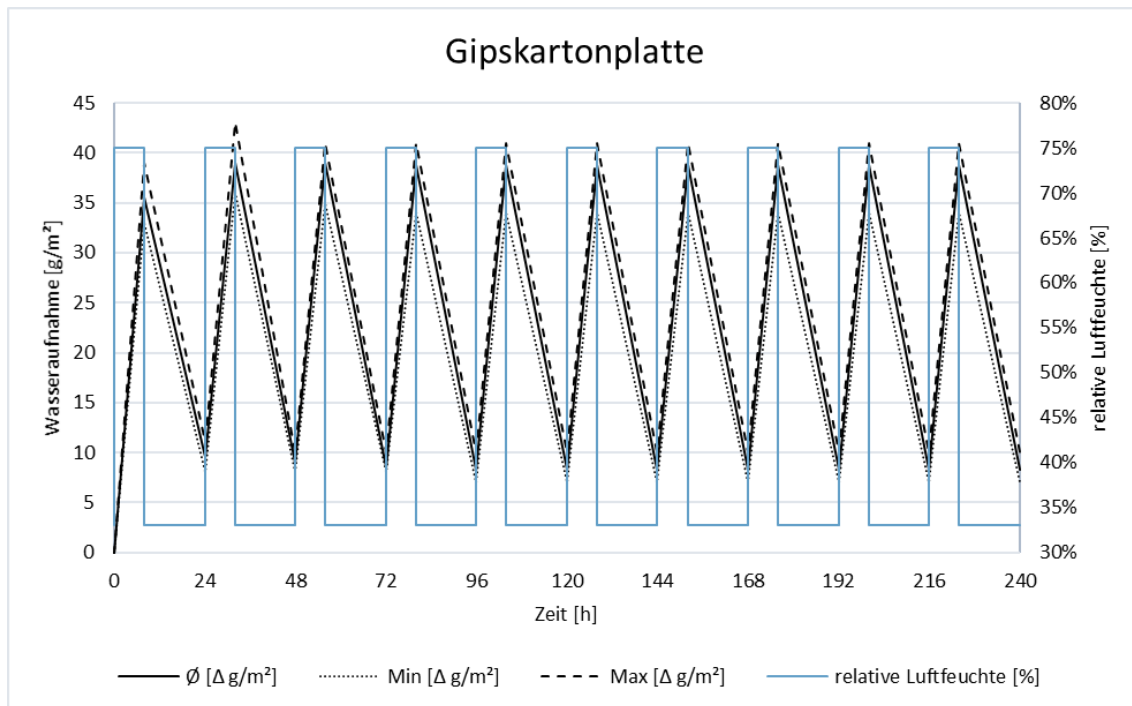


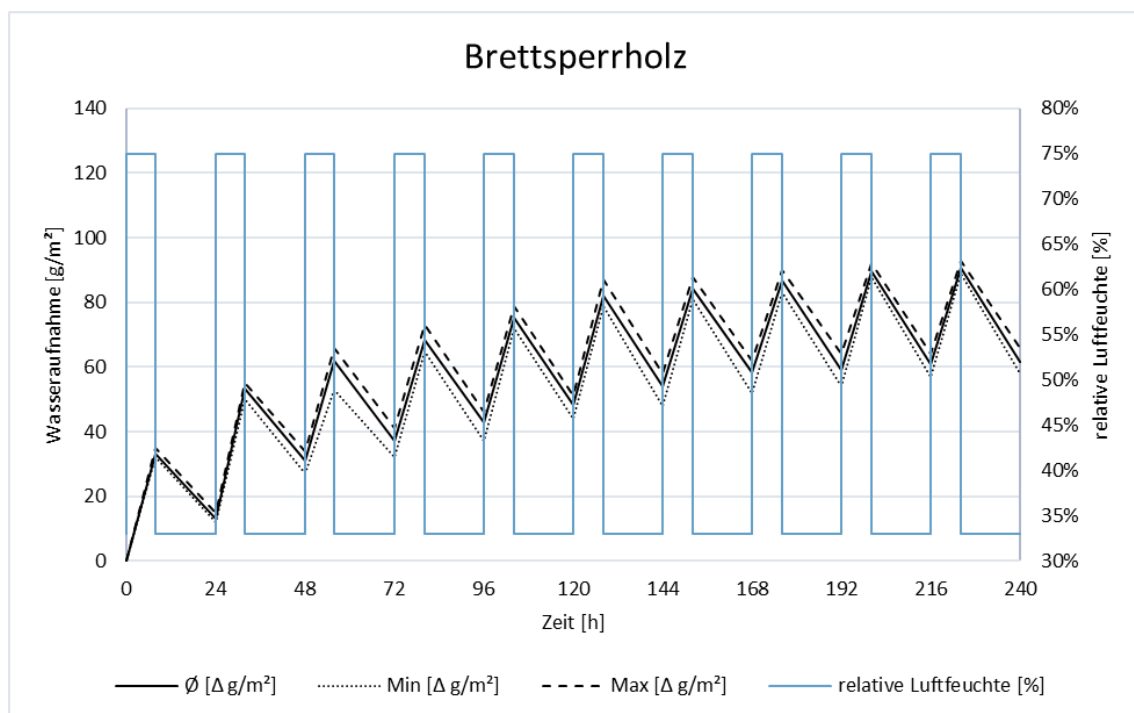
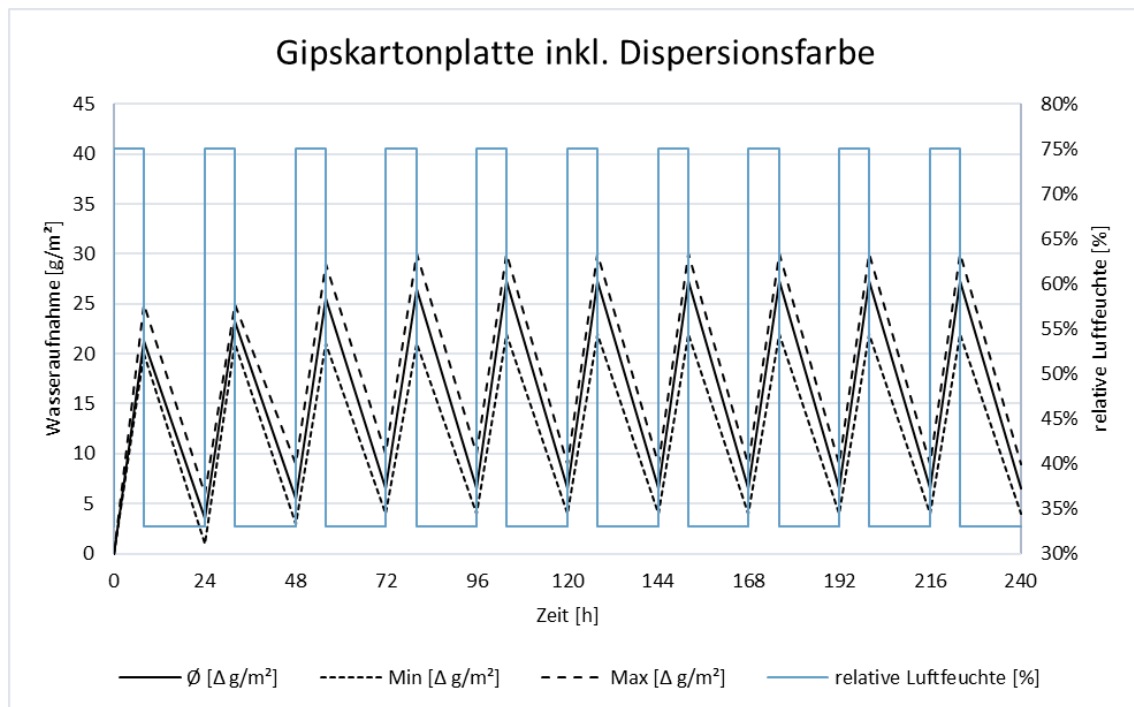


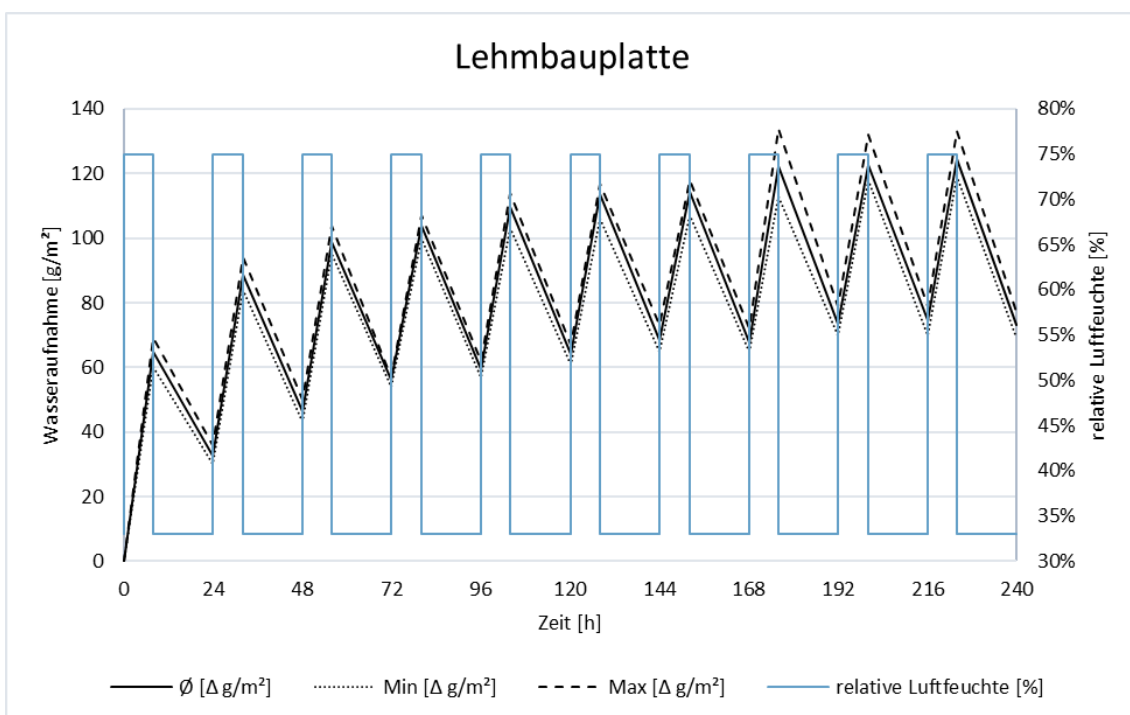
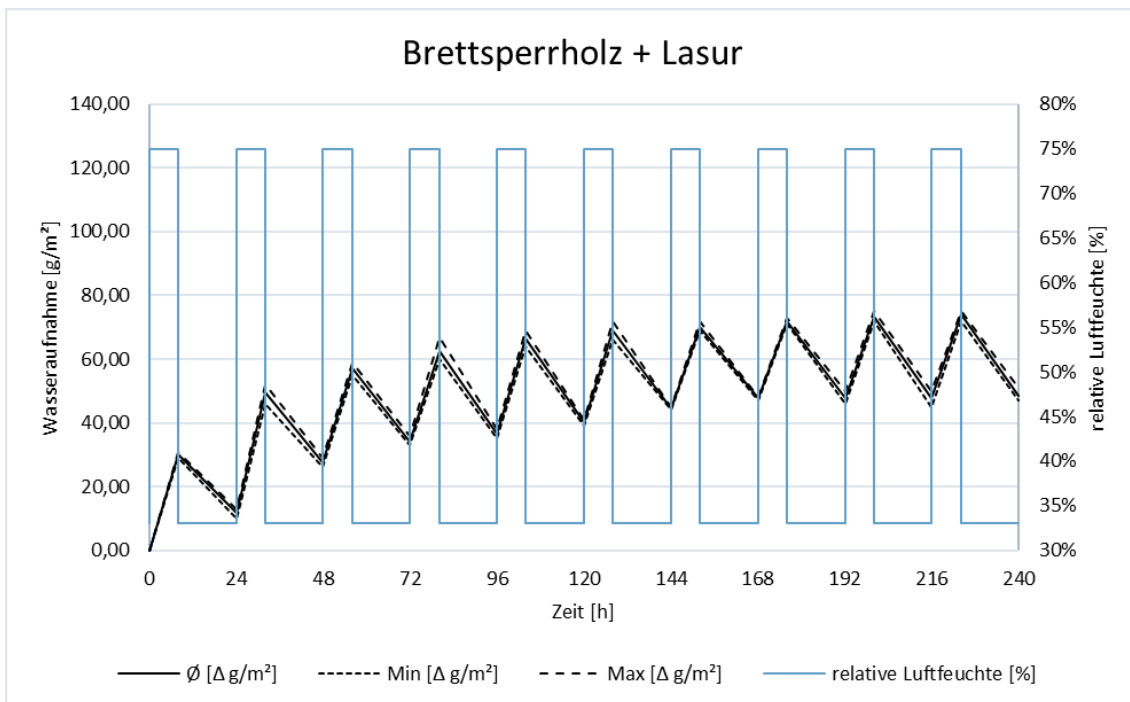


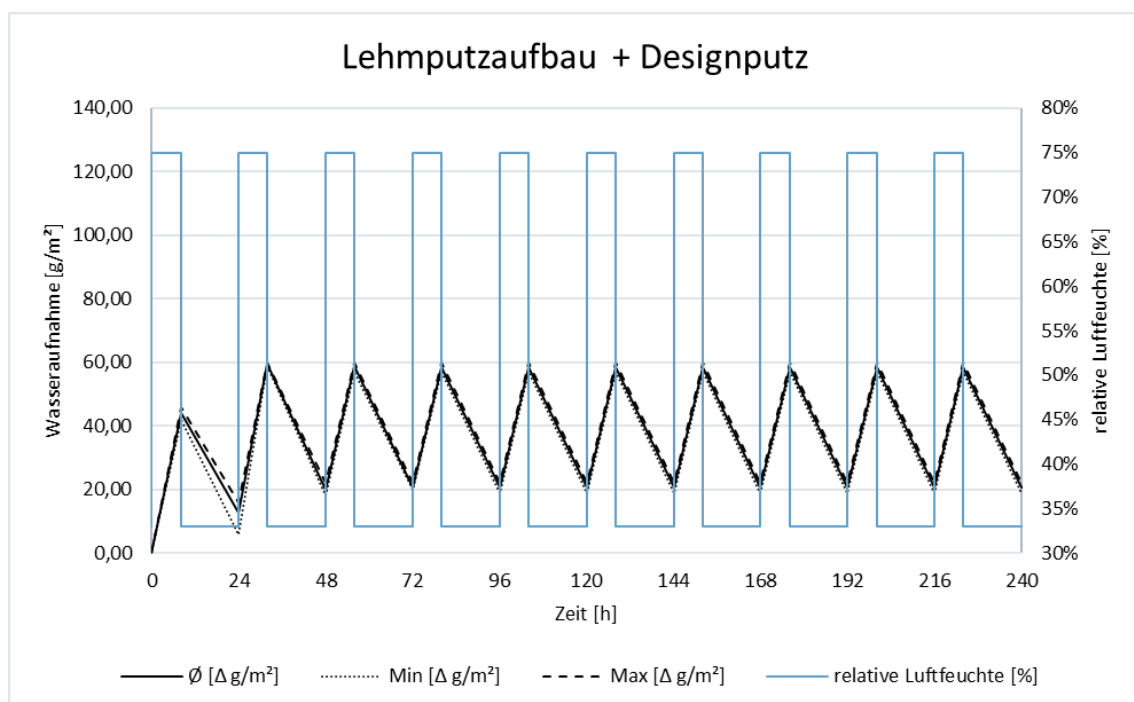
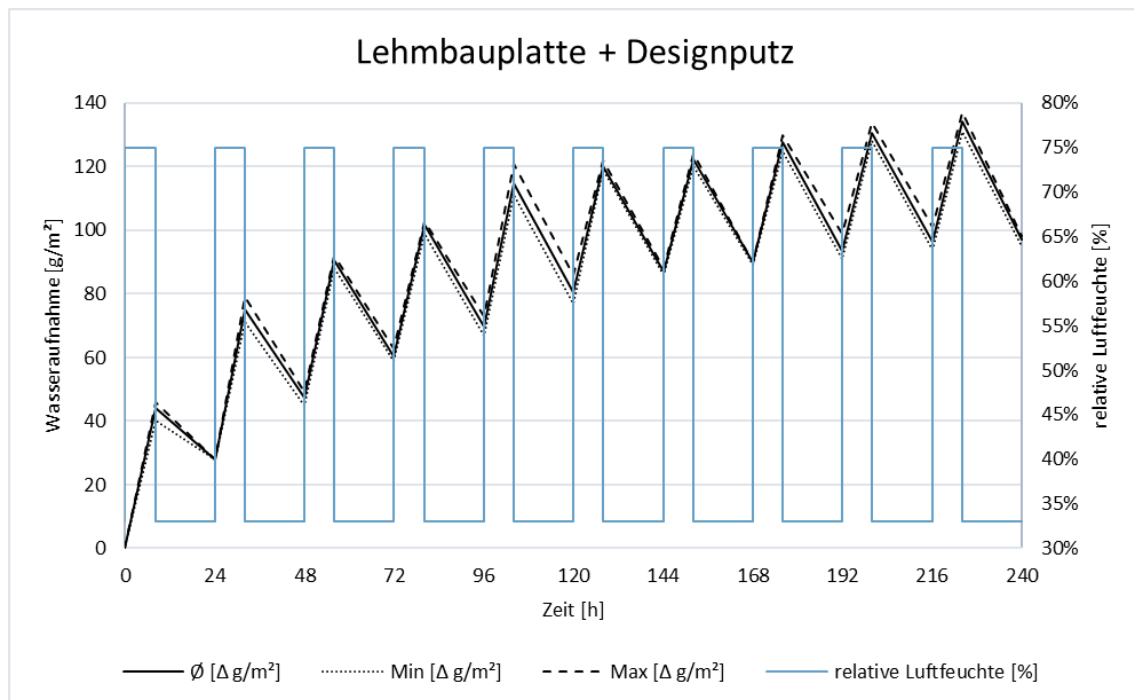


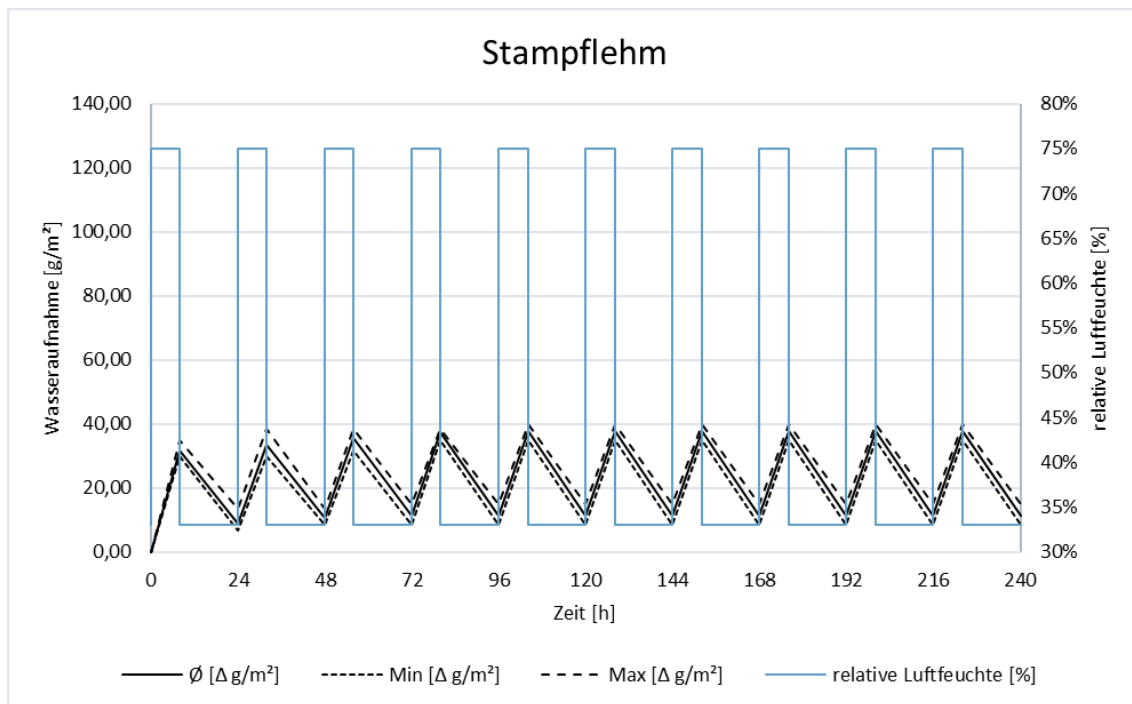
Graphische Darstellung der Feuchtepufferwirkung





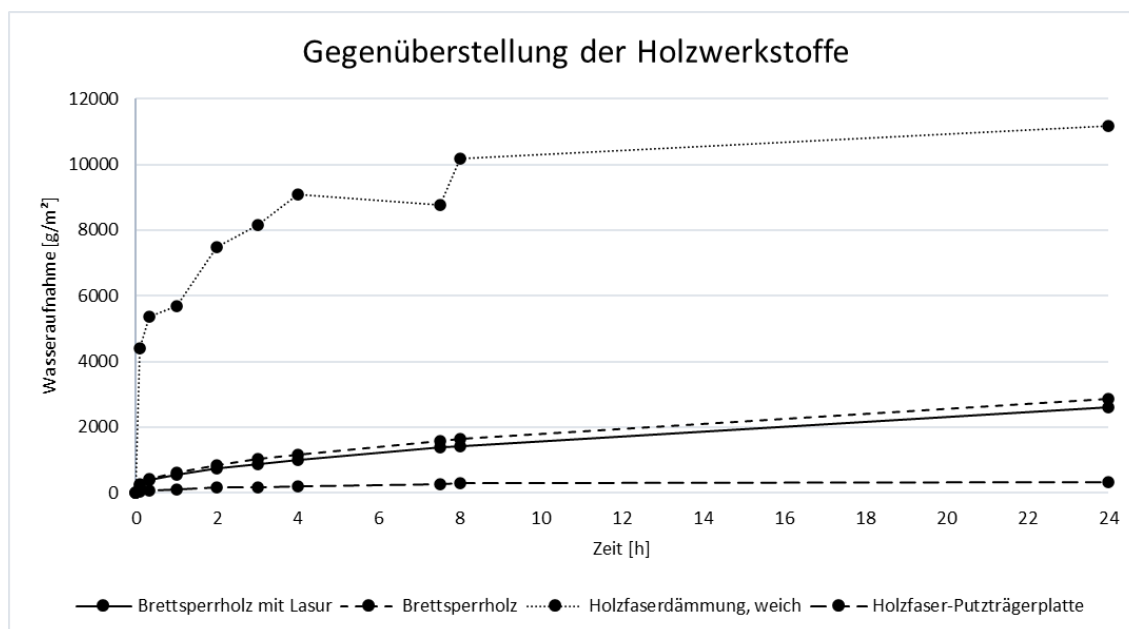
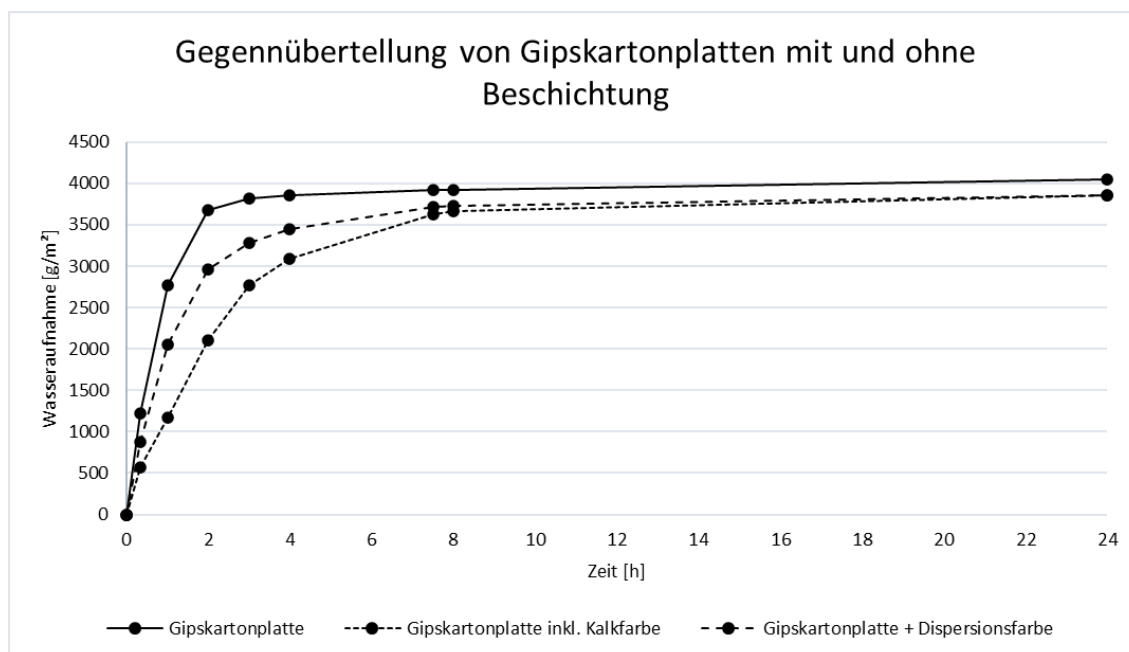


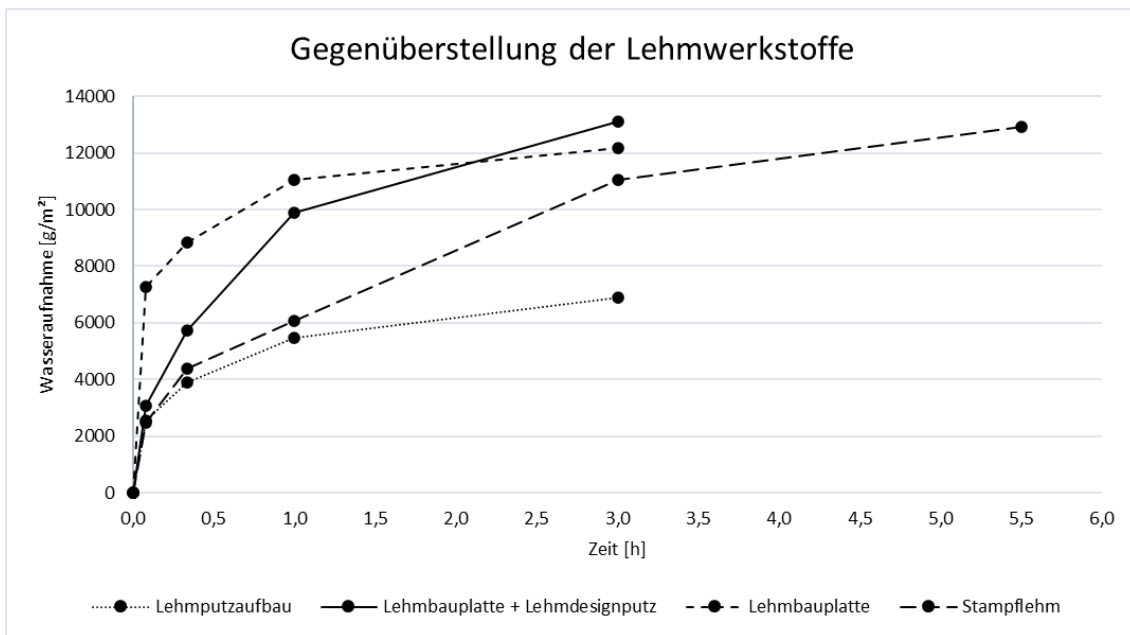




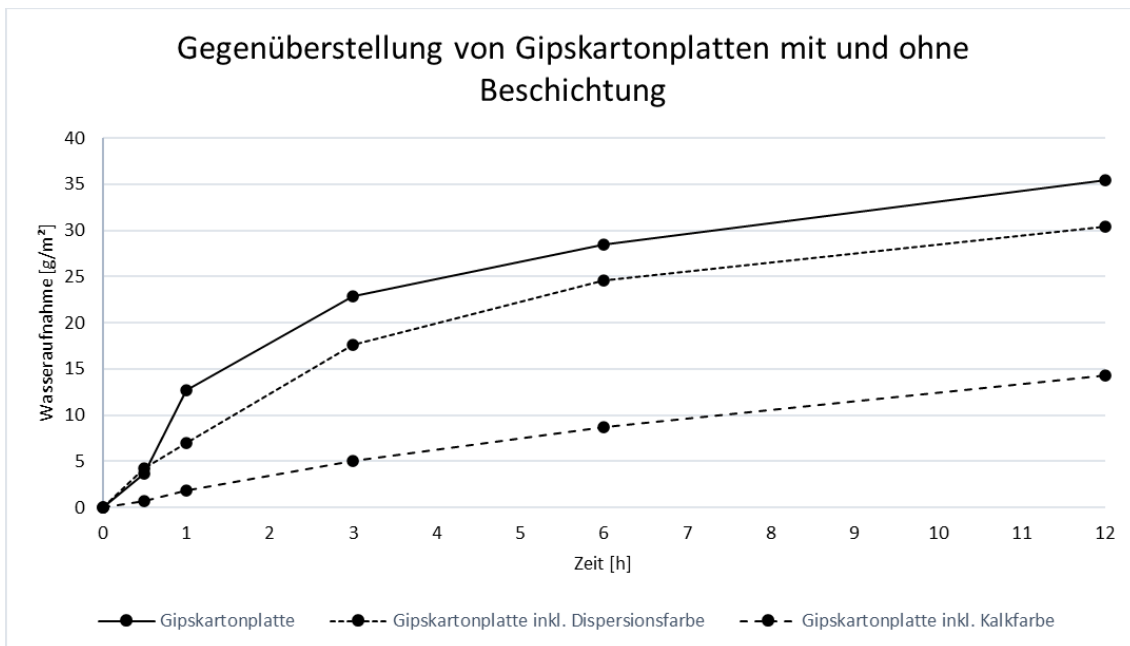
Anhang H Werkstoffvergleiche

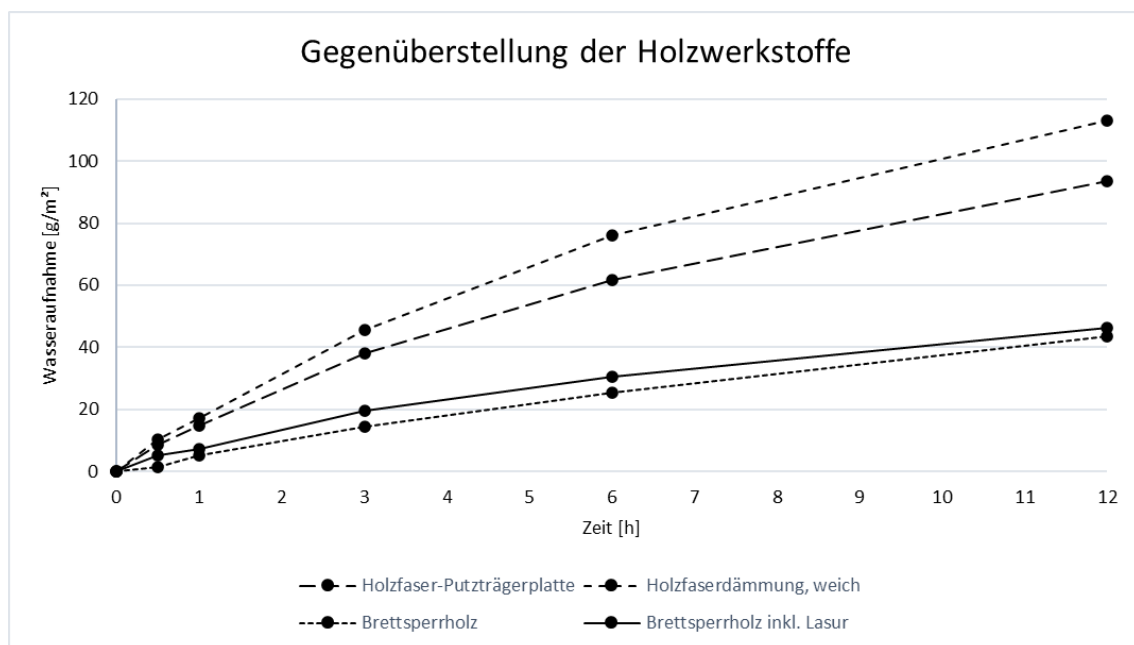
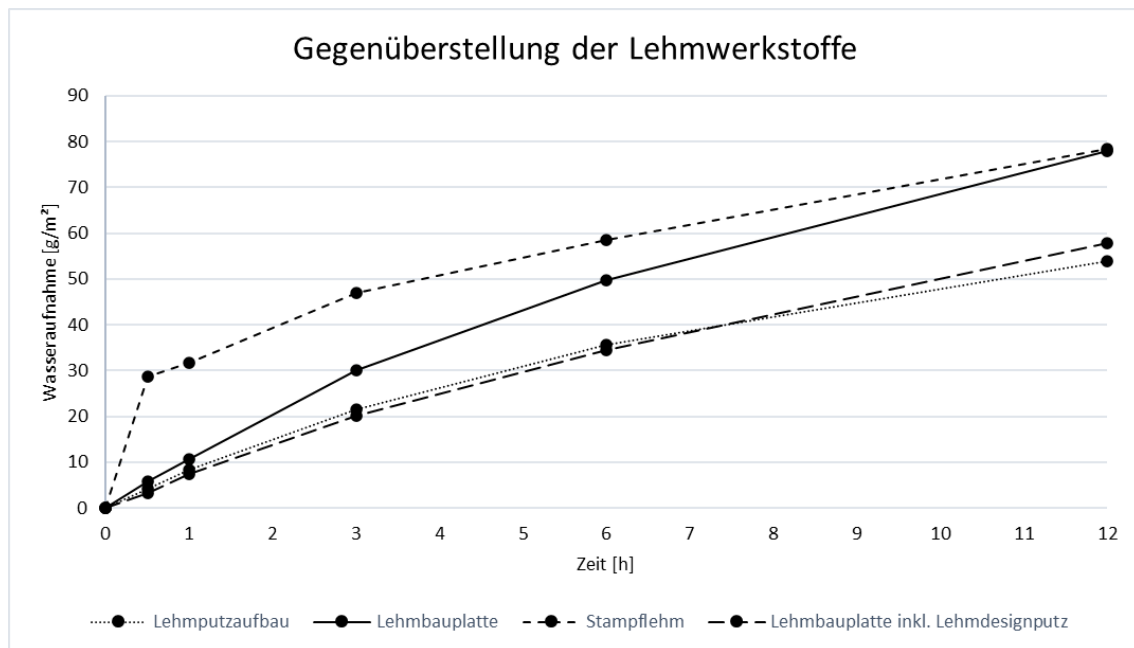
Anhang H.1 Freie Wasseraufnahme



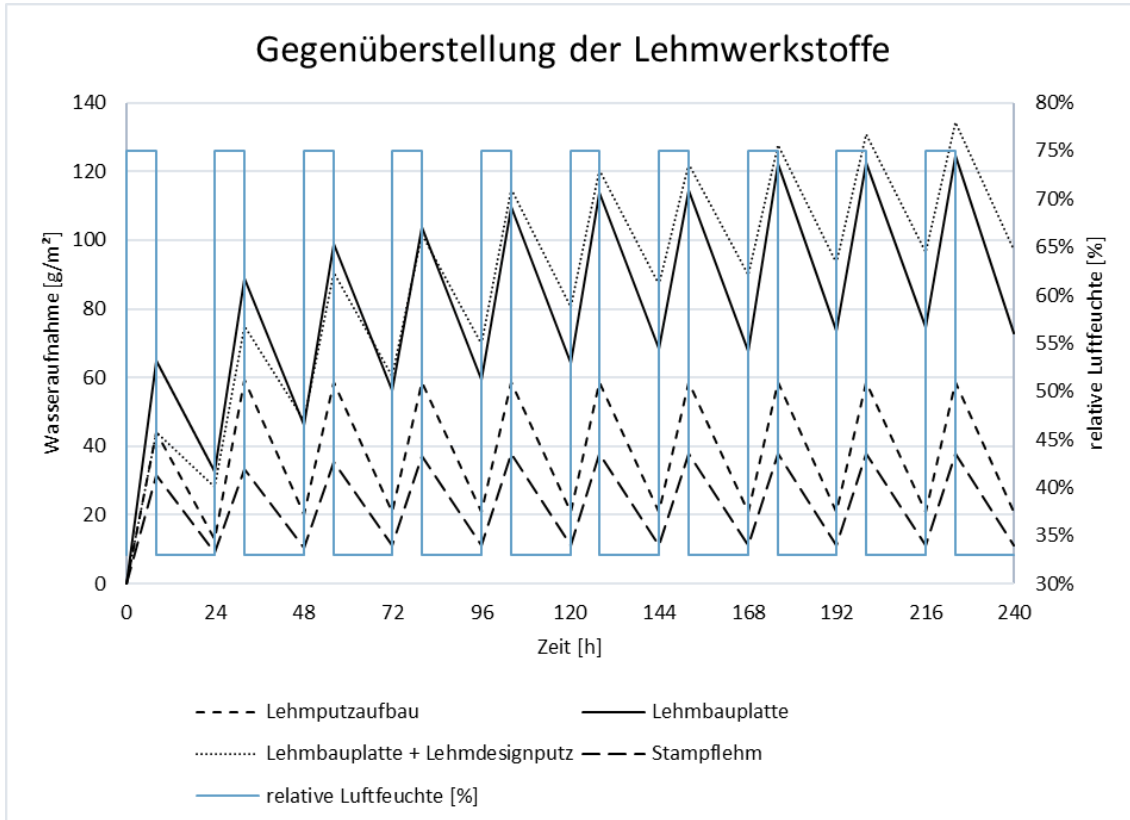
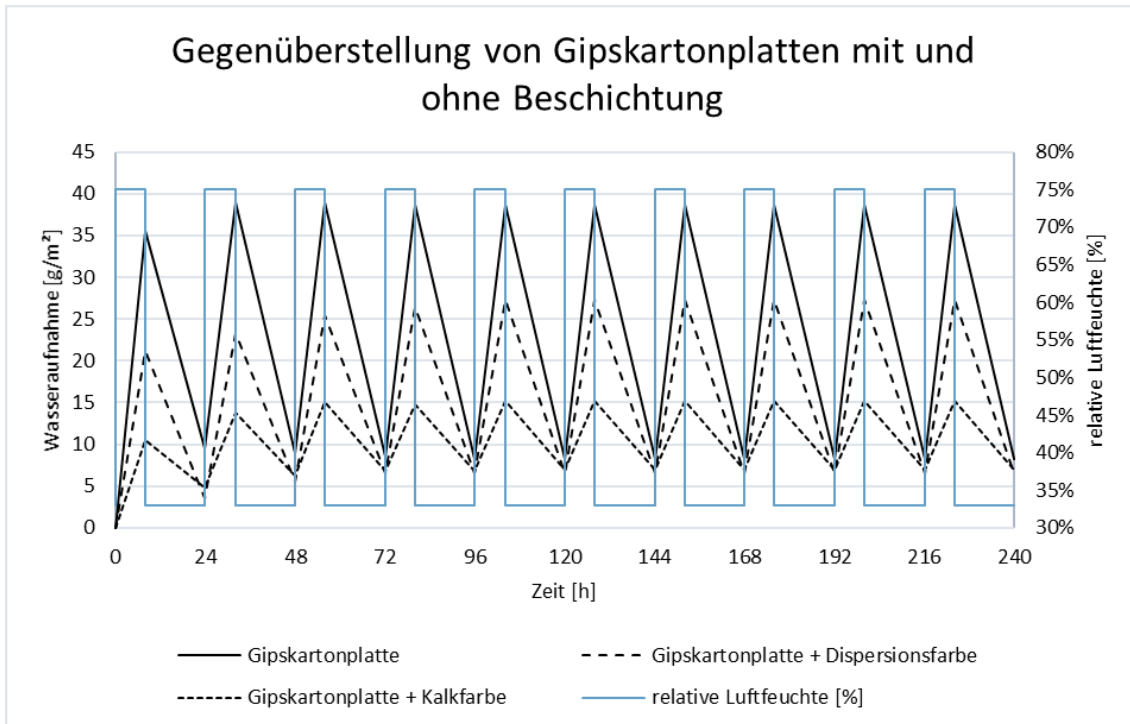


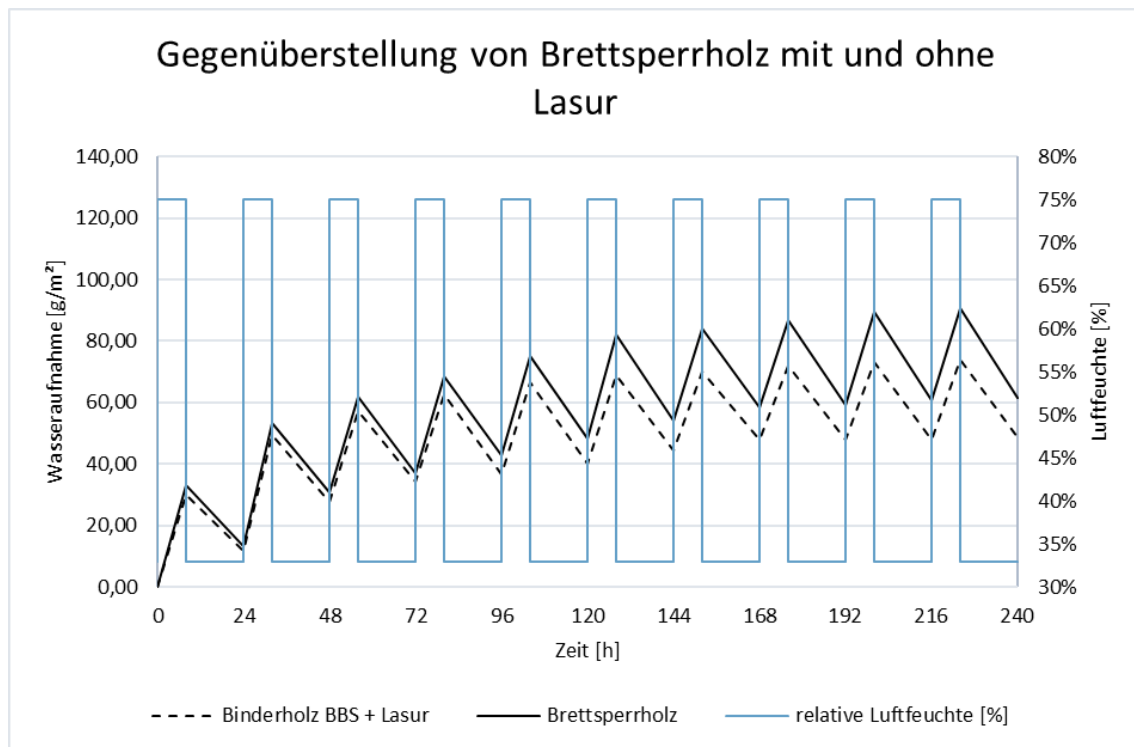
Anhang H.2 Dynamische Sorption





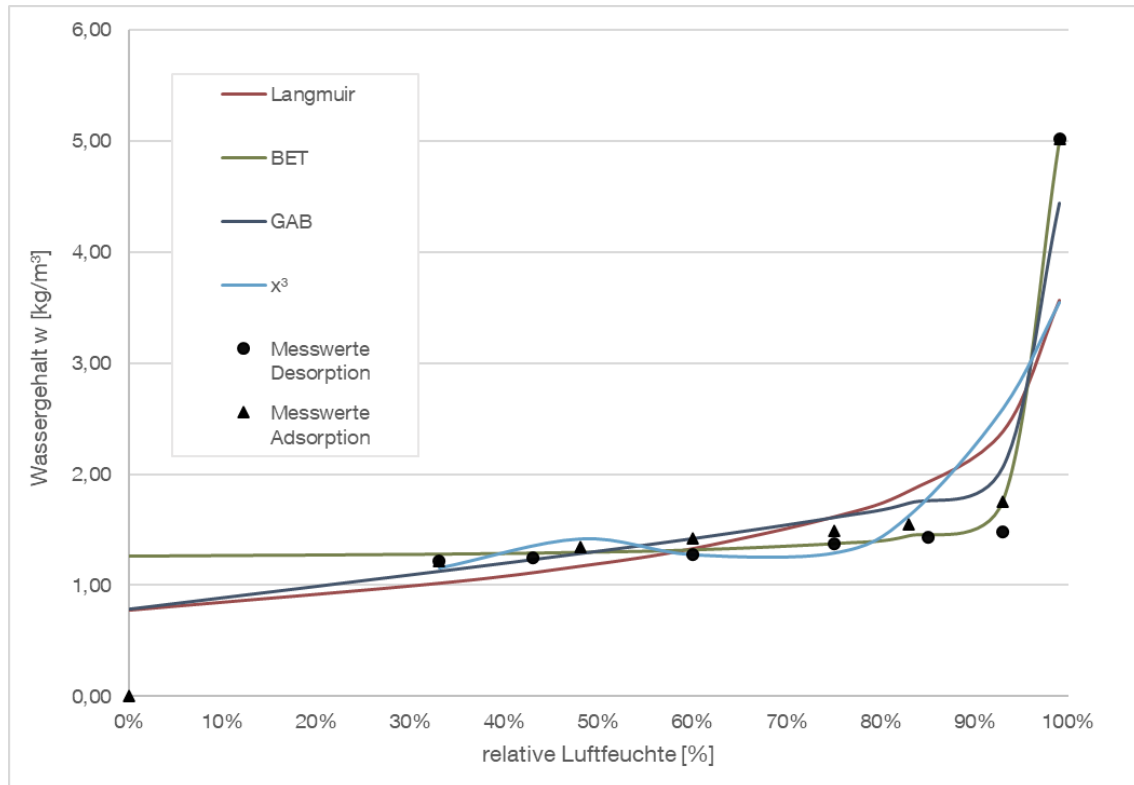
Anhang H.3 Feuchtepufferwirkung



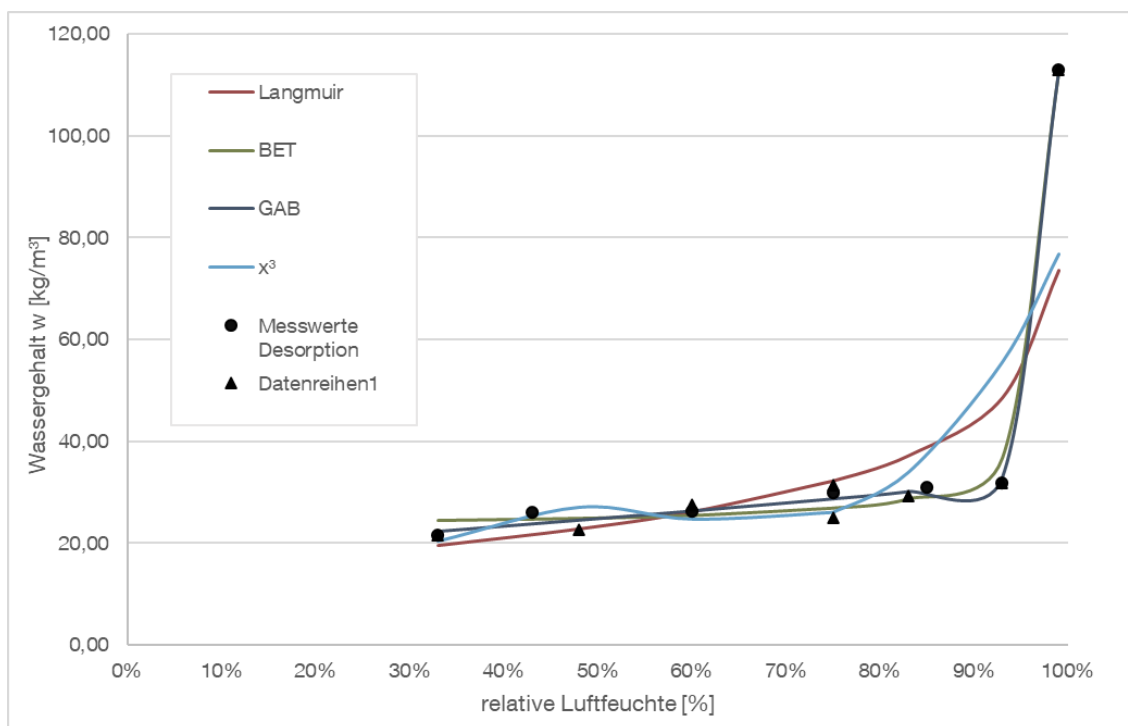


Anhang I.2 Graphische Darstellung der mittels der Regressionsanalyse ermittelten Sorptionsisothermen

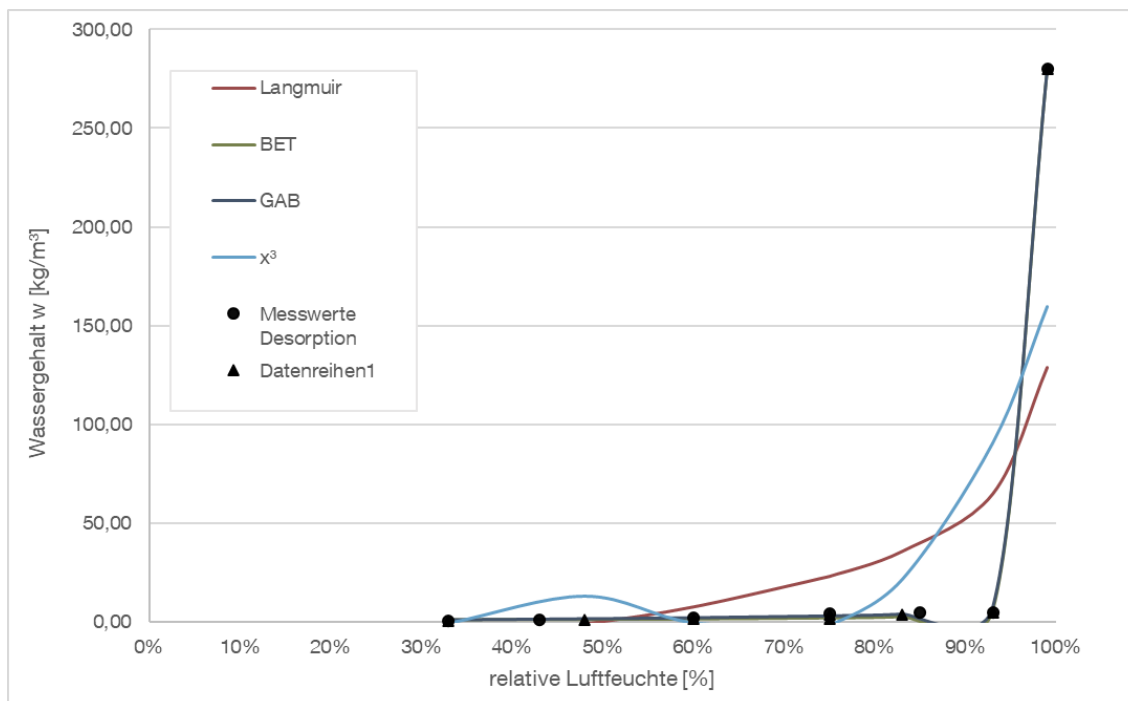
Gipskartonplatte



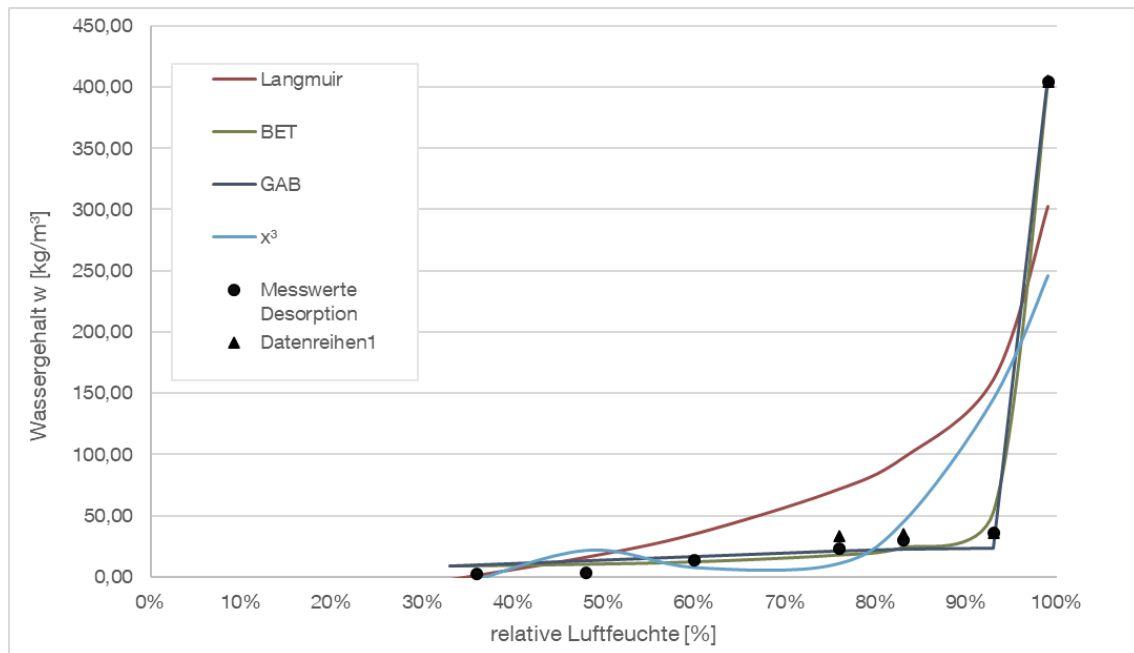
Holzfaserputzträgerplatte



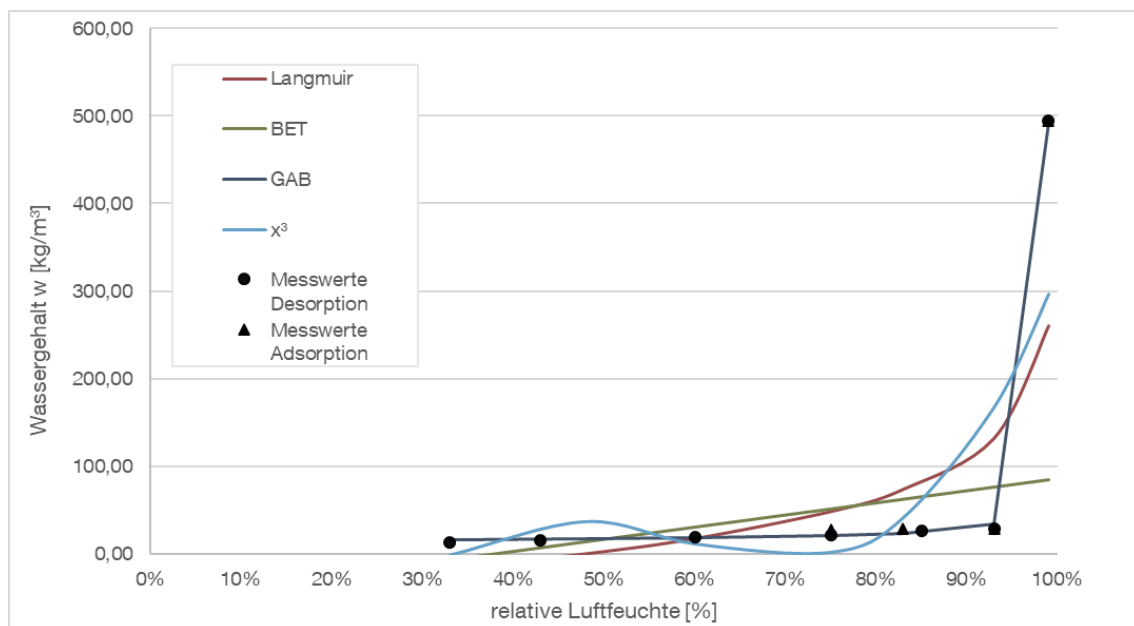
Holzfaserdämmung (weich)



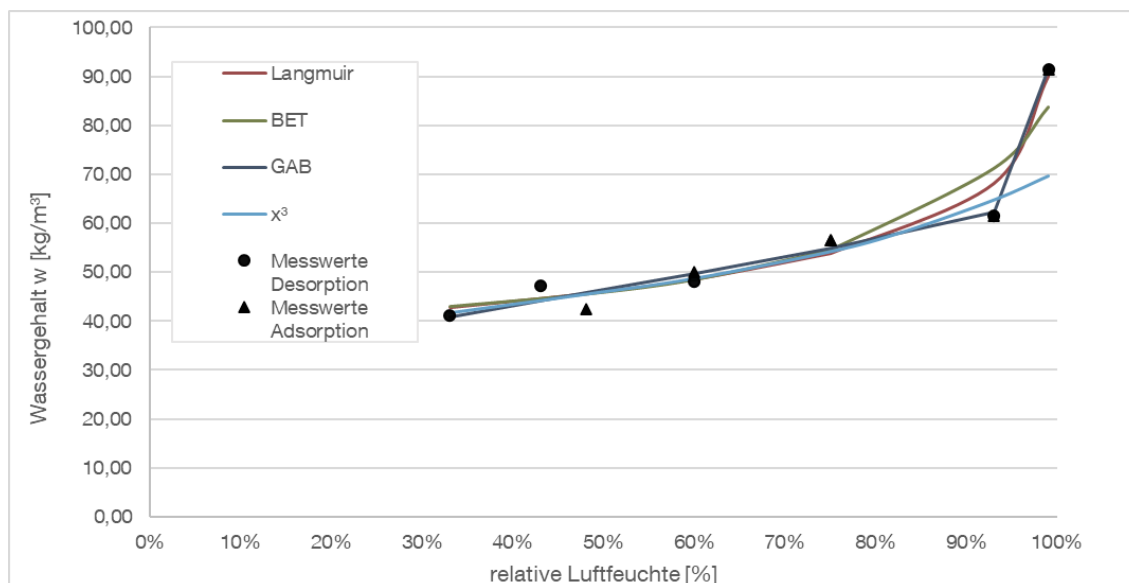
Lehmbauplatte



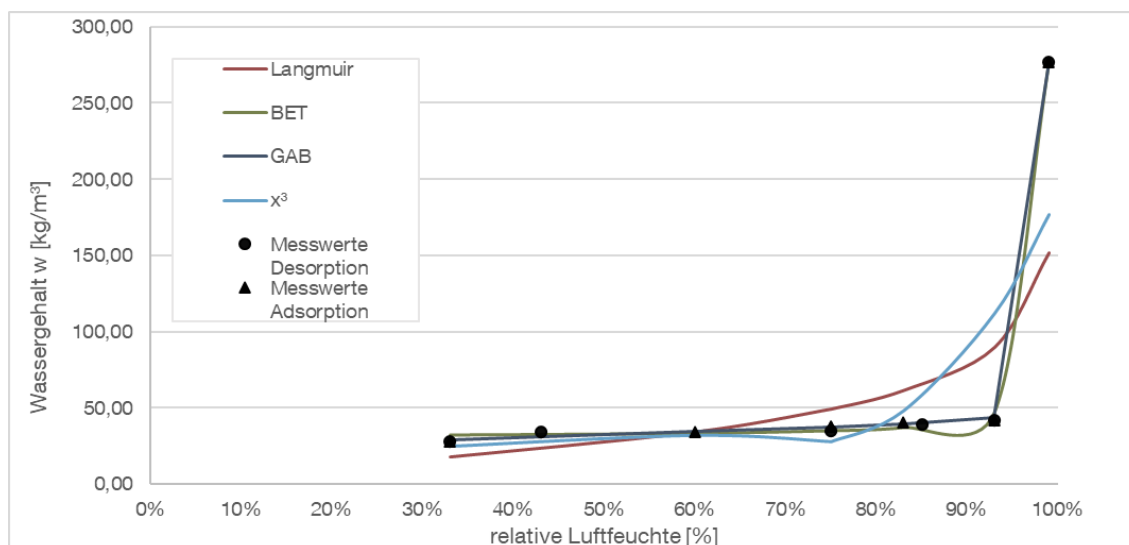
Lehmputzaufbau



Brettsperrholz

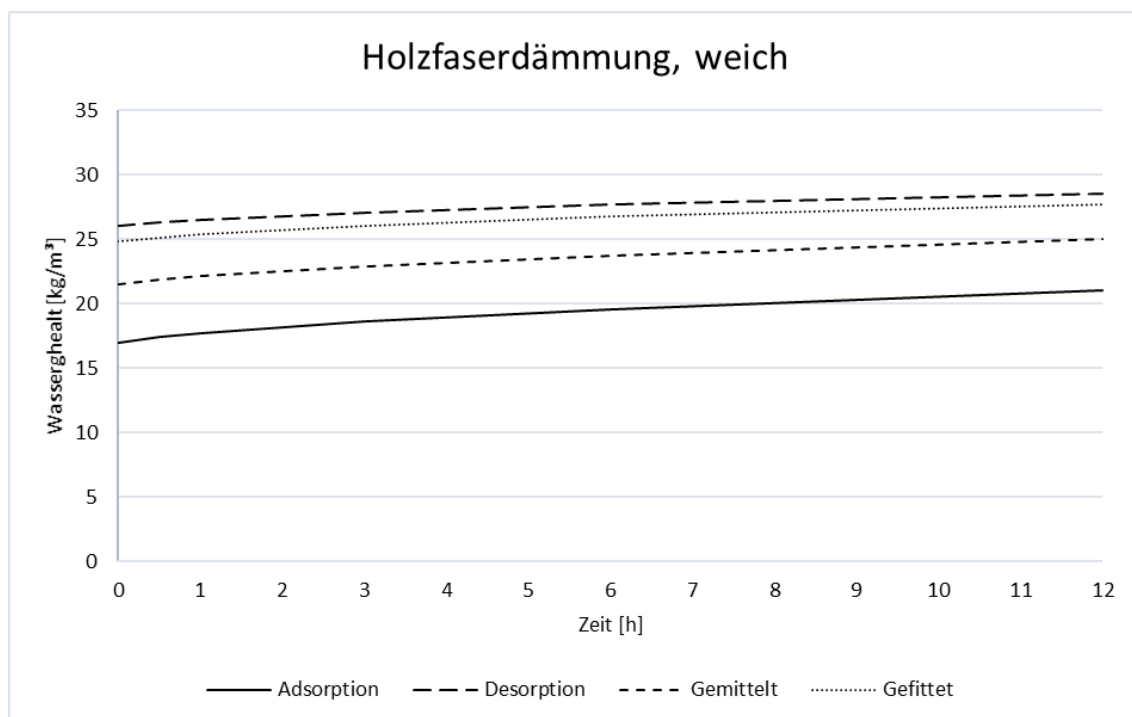


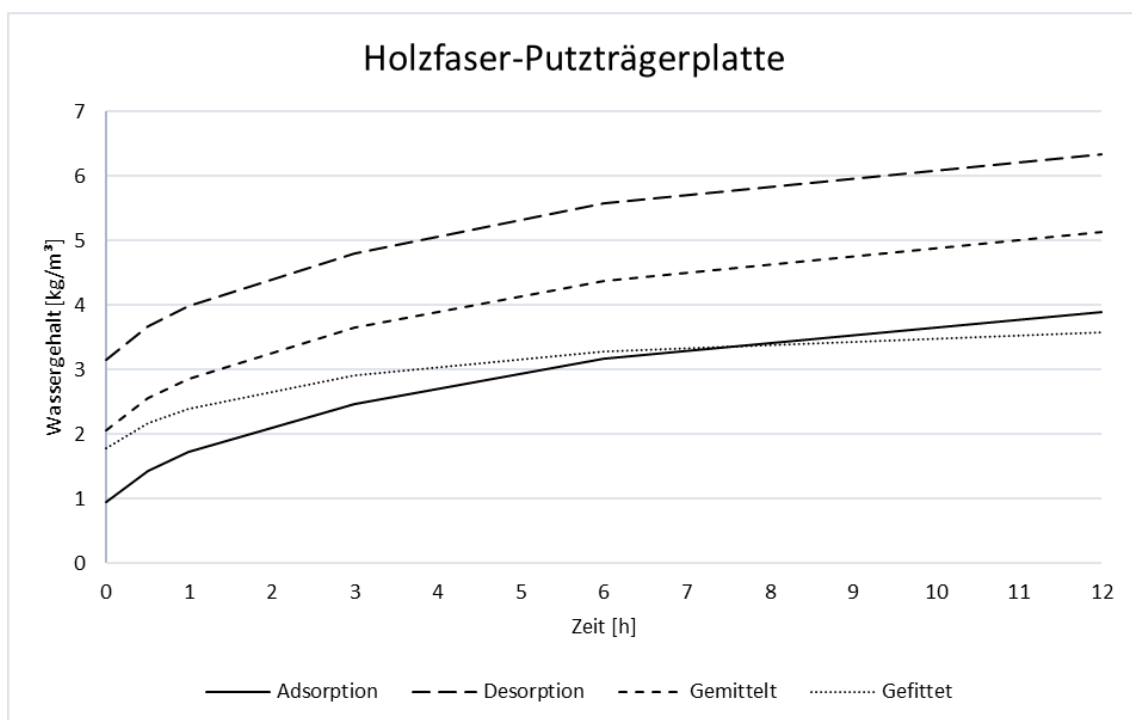
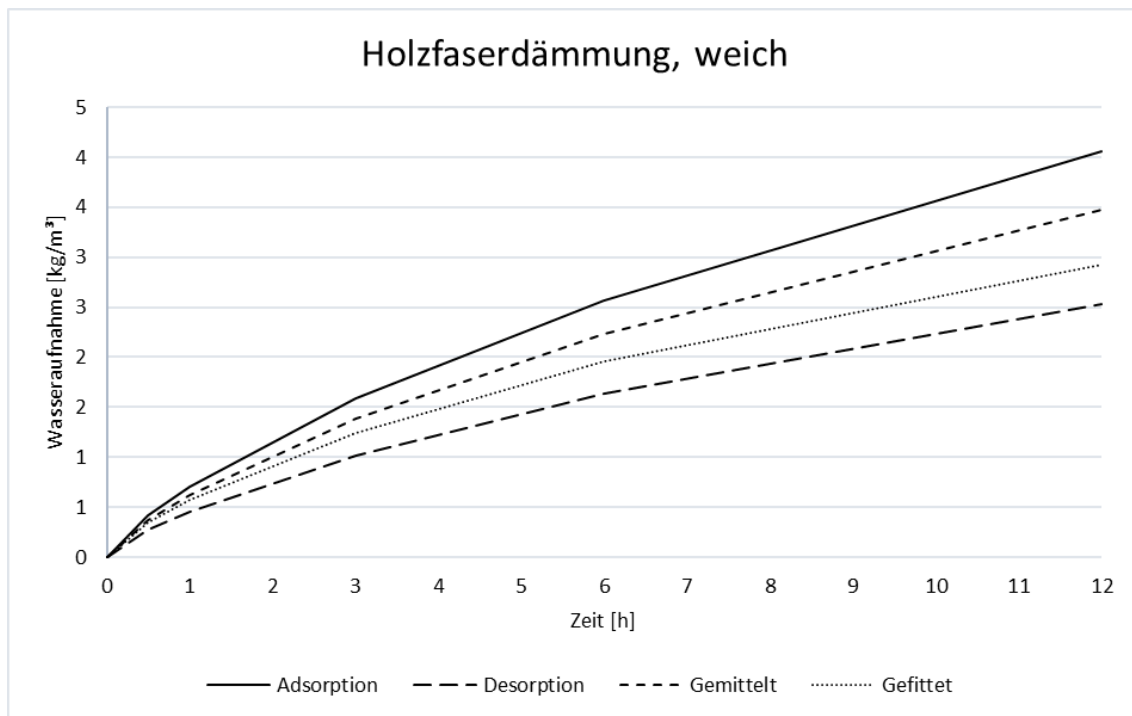
Stampflehm

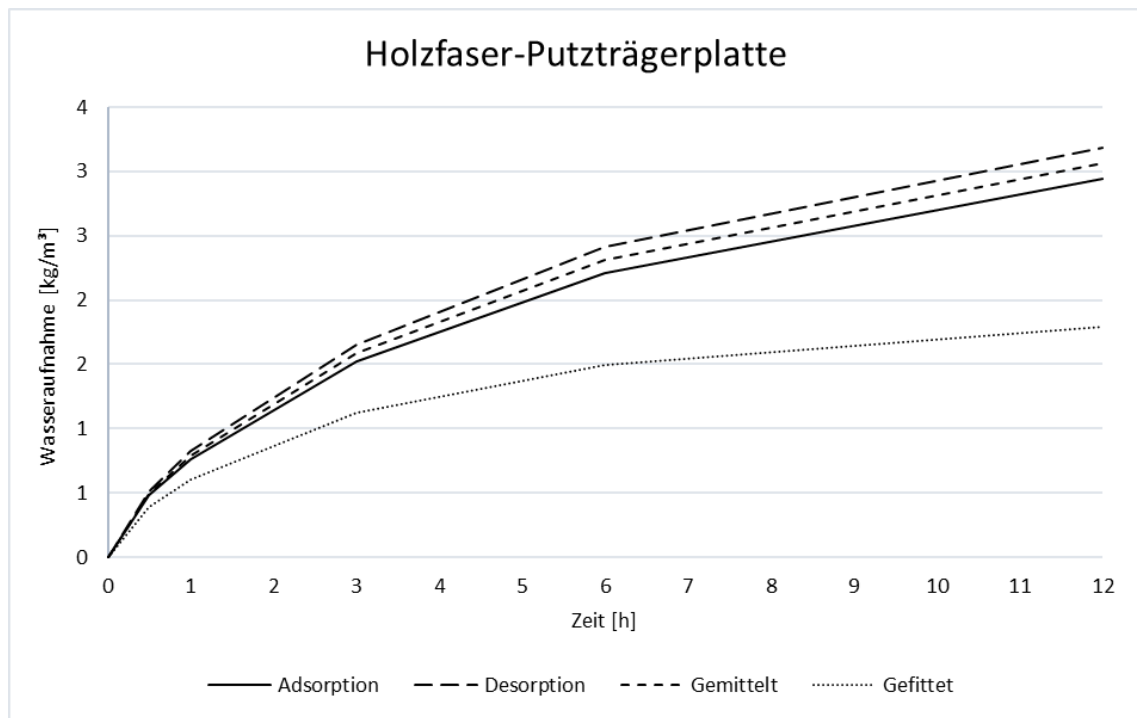


Anhang I.3 Numerische Lösungen der unterschiedlichen Kennwerte der Sorptionsisotherme

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die numerisch berechneten Wasseraufnahmen und Wassergehalte infolge eines relativen Feuchtesprungs von 50 % auf 80 % für eine Holzfaserdämmung (weich) und Holzfaser-Putzträgerplatte. Vier verschiedene Varianten für die Abbildung der Sorptionsisotherme von hysteretischen Baustoffen sind gegenübergestellt, die Abbildung mittels der gemessenen Adsorptionswerte (Adsorption), die Abbildung mittels gemessenen Desorptionswerten, die Abbildung mittel der gemittelten Werten aus Ad- und Desorptionswerte (Gemittelt) und die Abbildung mittels einer Regressionsanalyse gefitteten Werte (Gefittet).

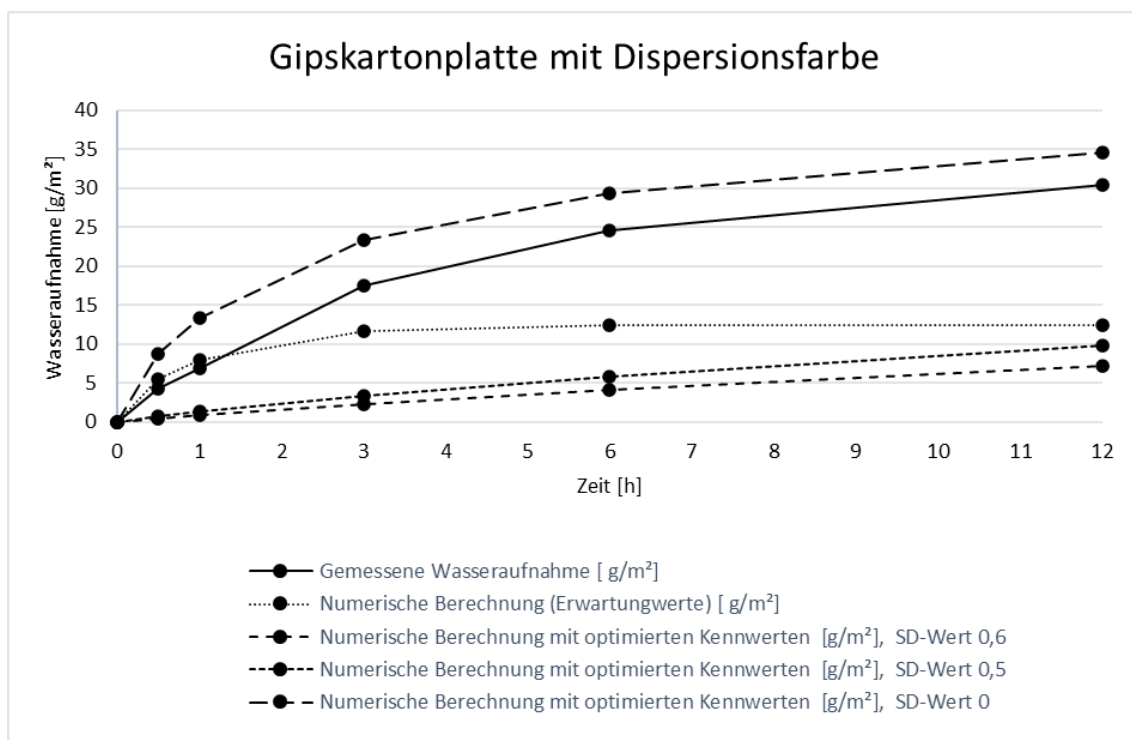
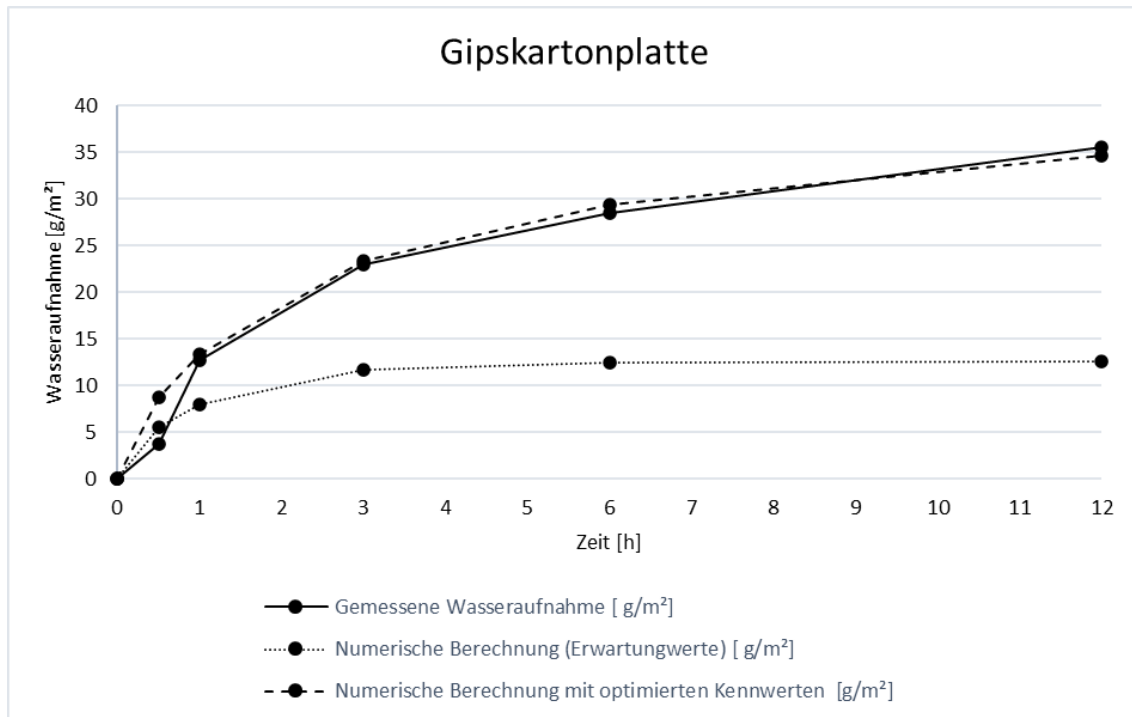


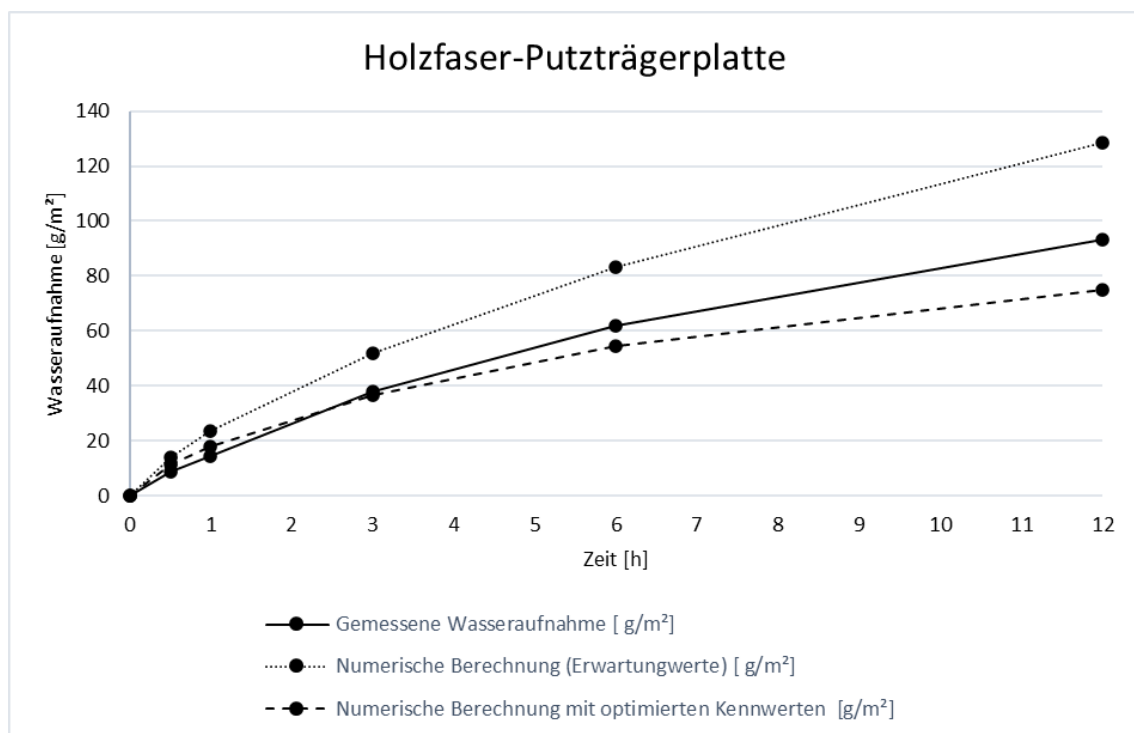
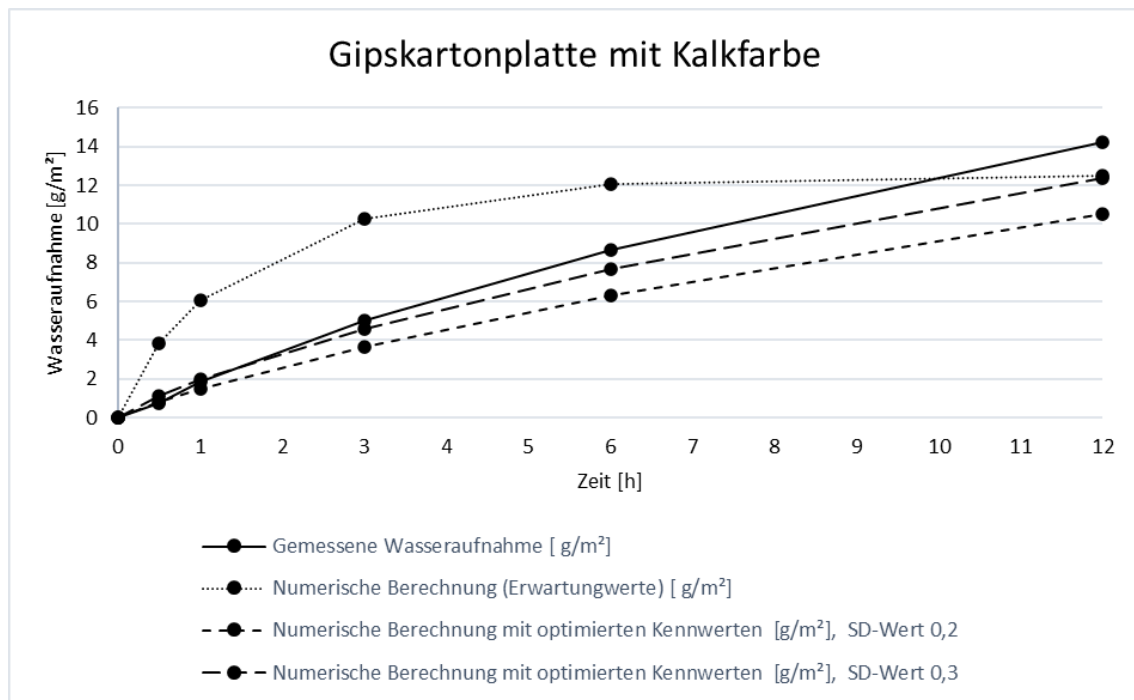


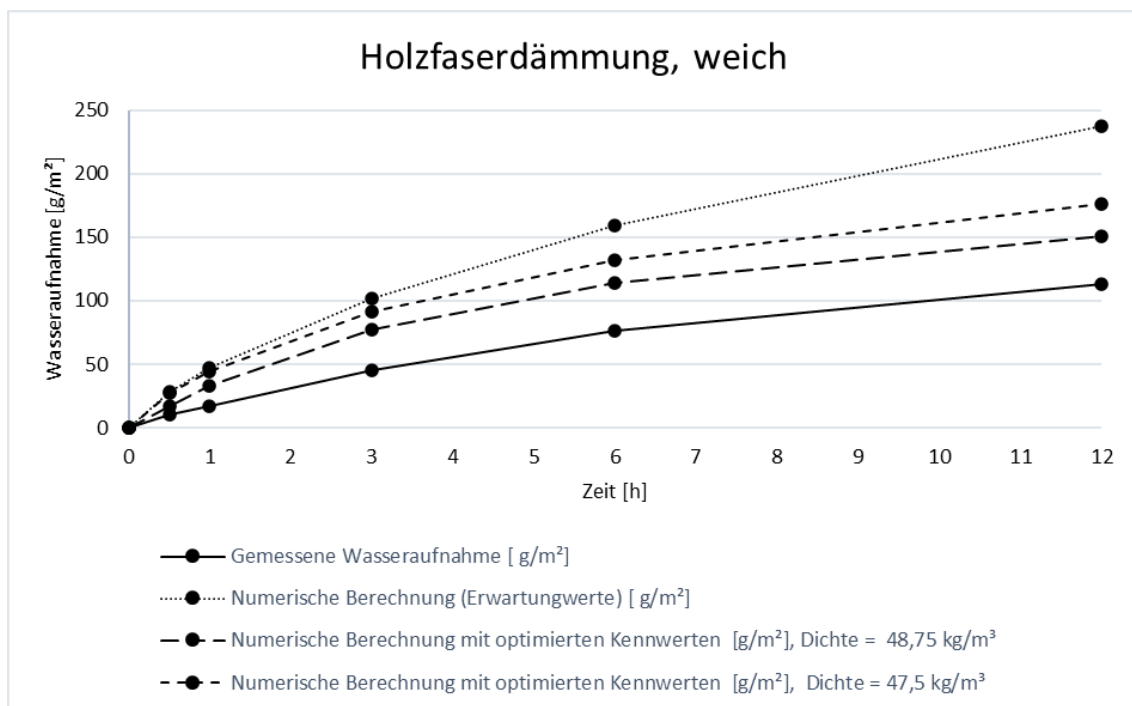
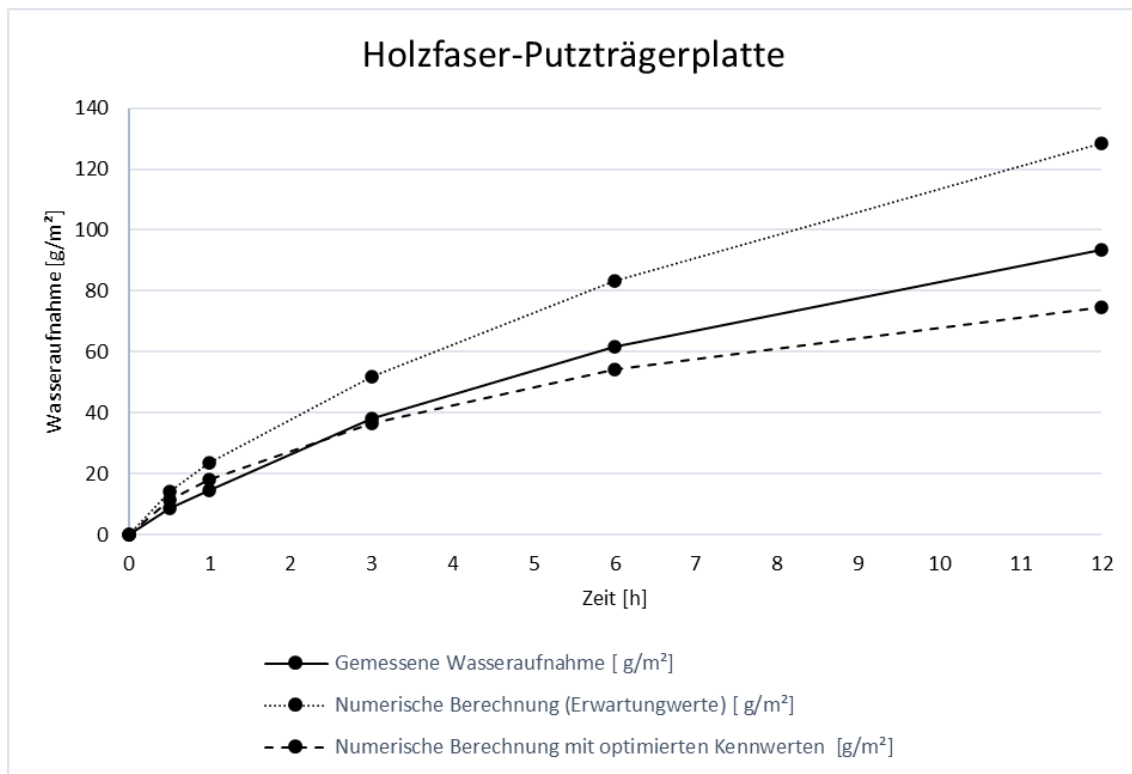


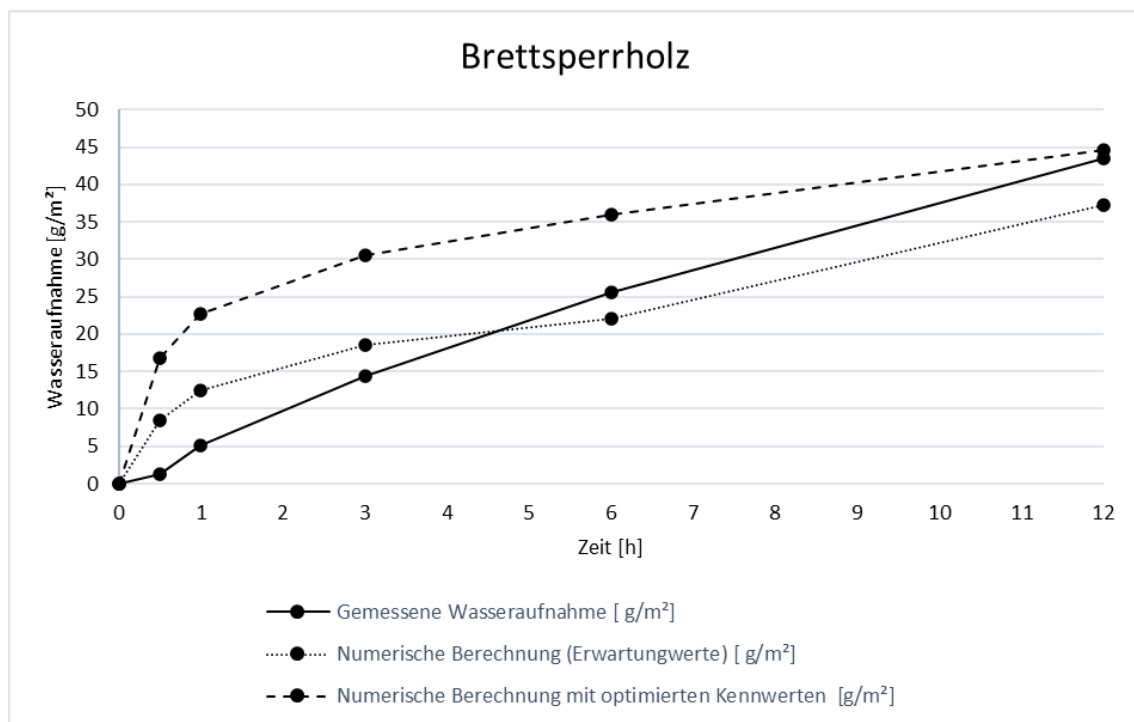
Anhang J Optimierte numerische Berechnung

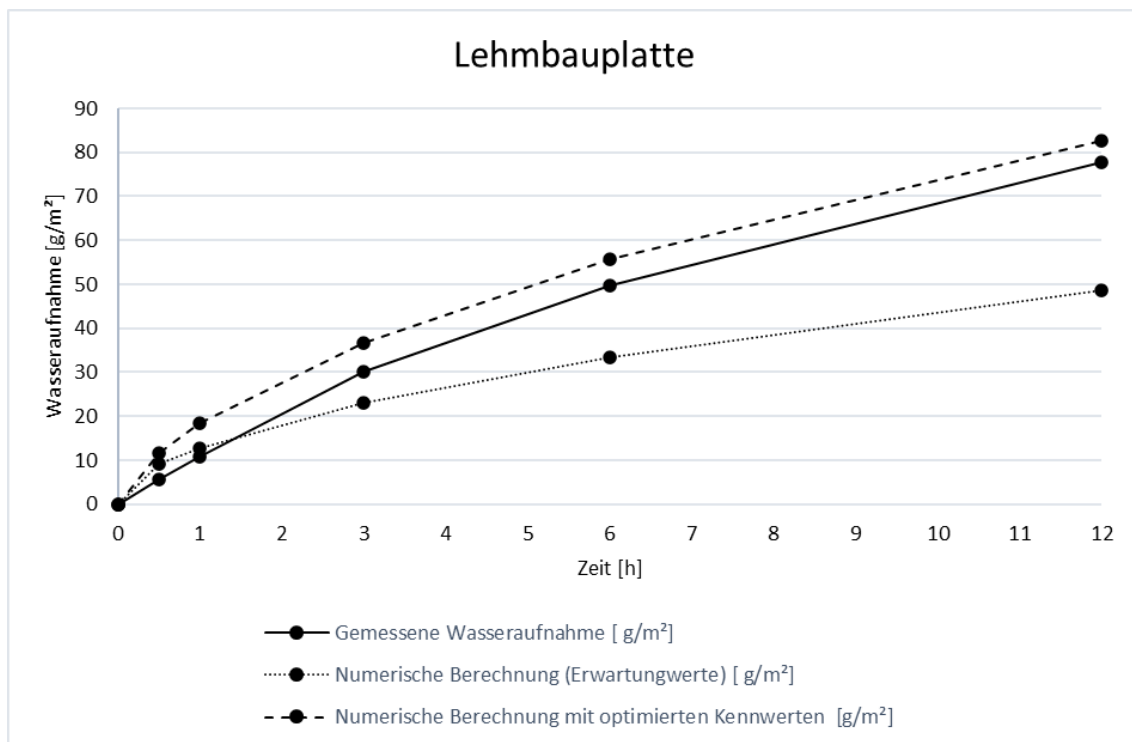
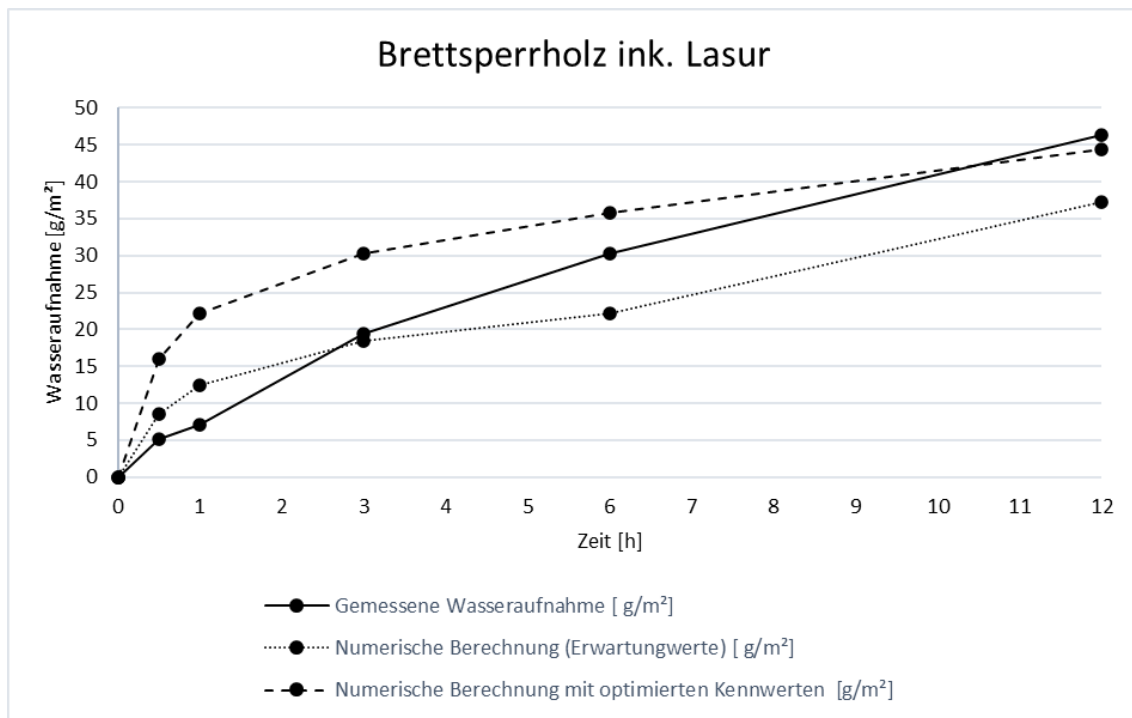
Anhang J.1 Vergleich der dynamischen Sorption

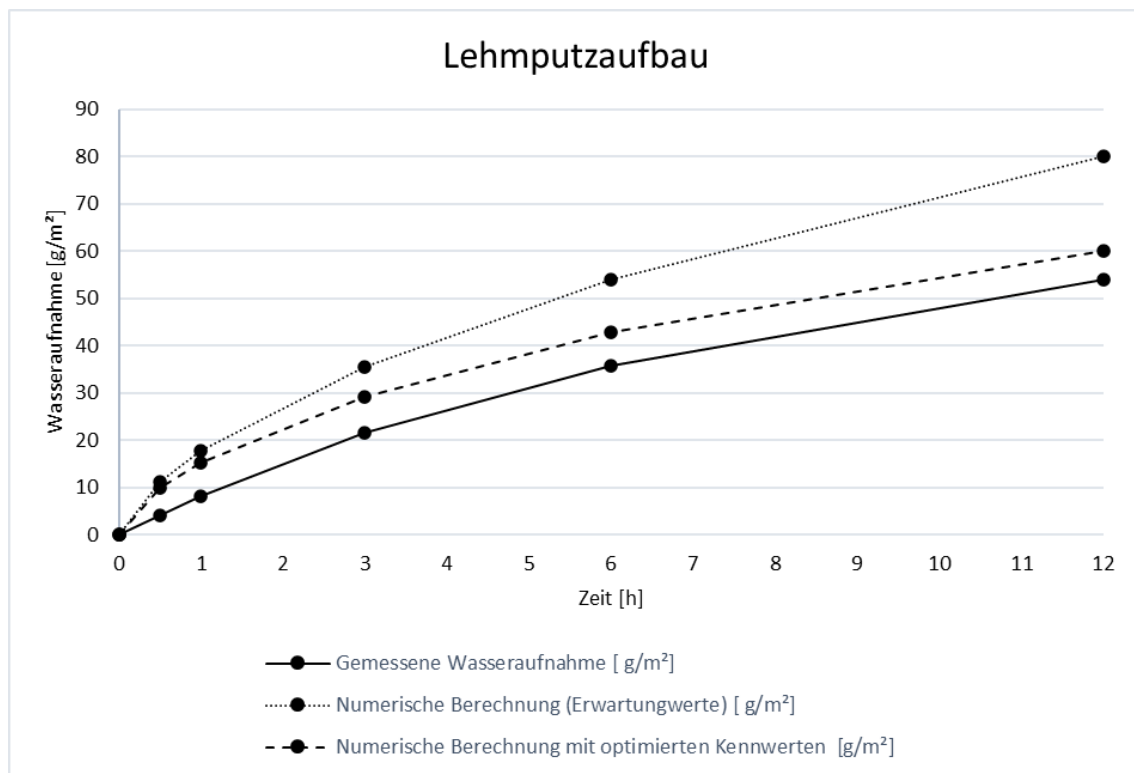
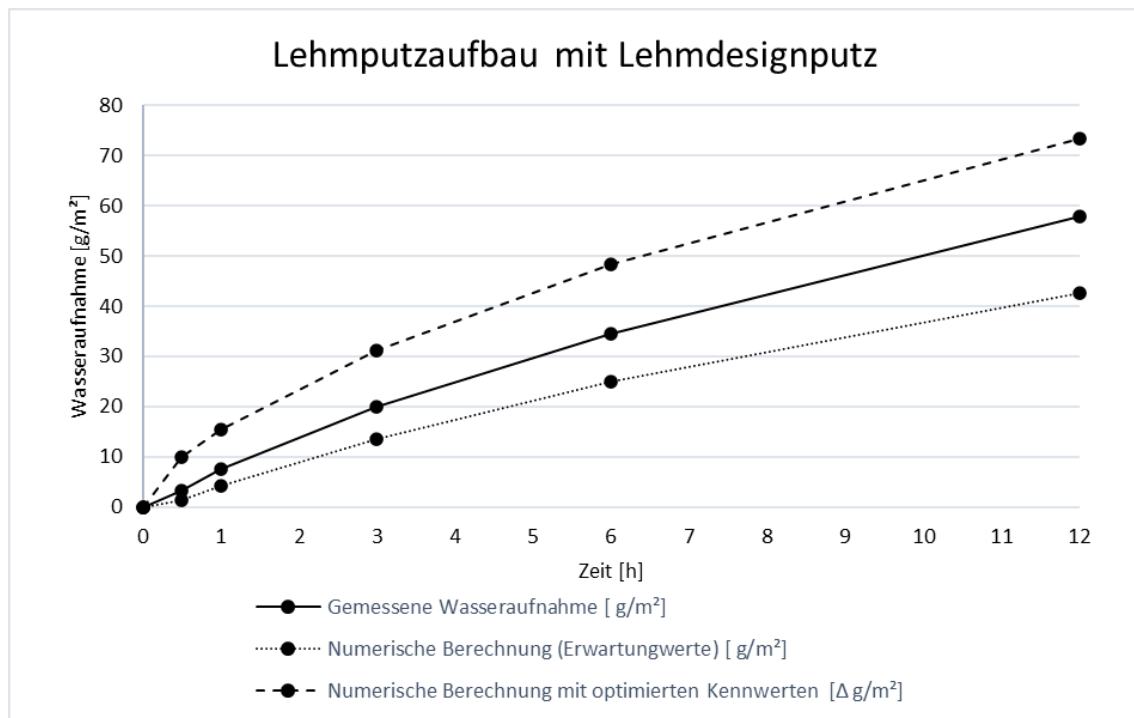


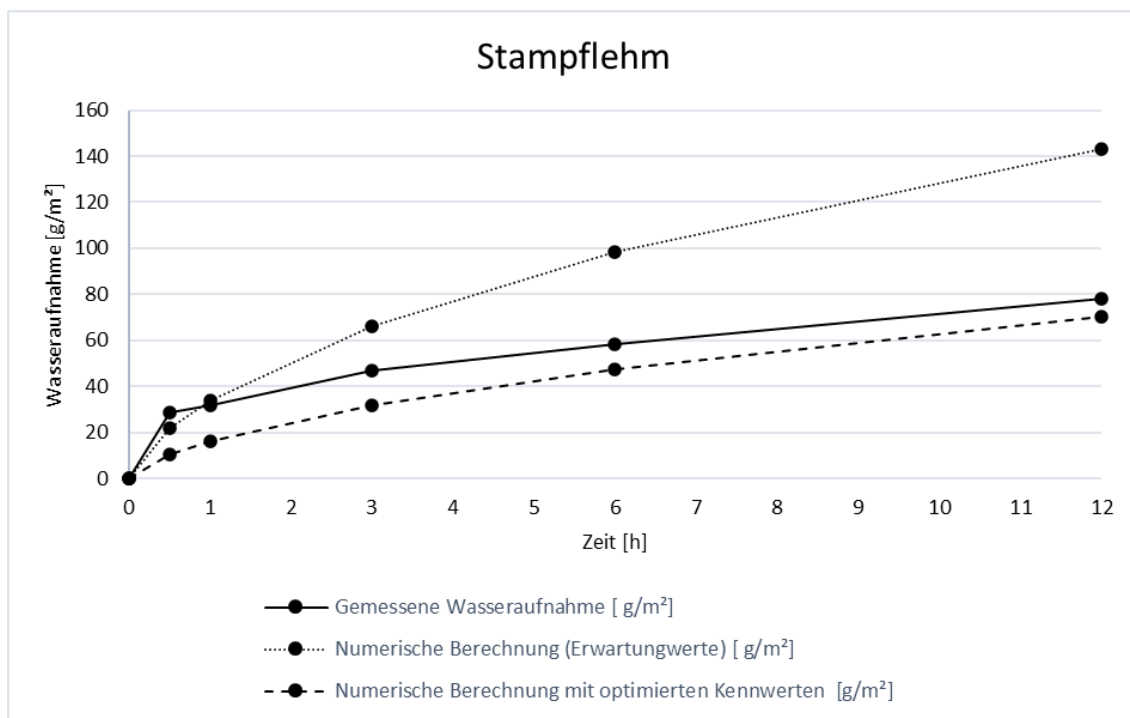




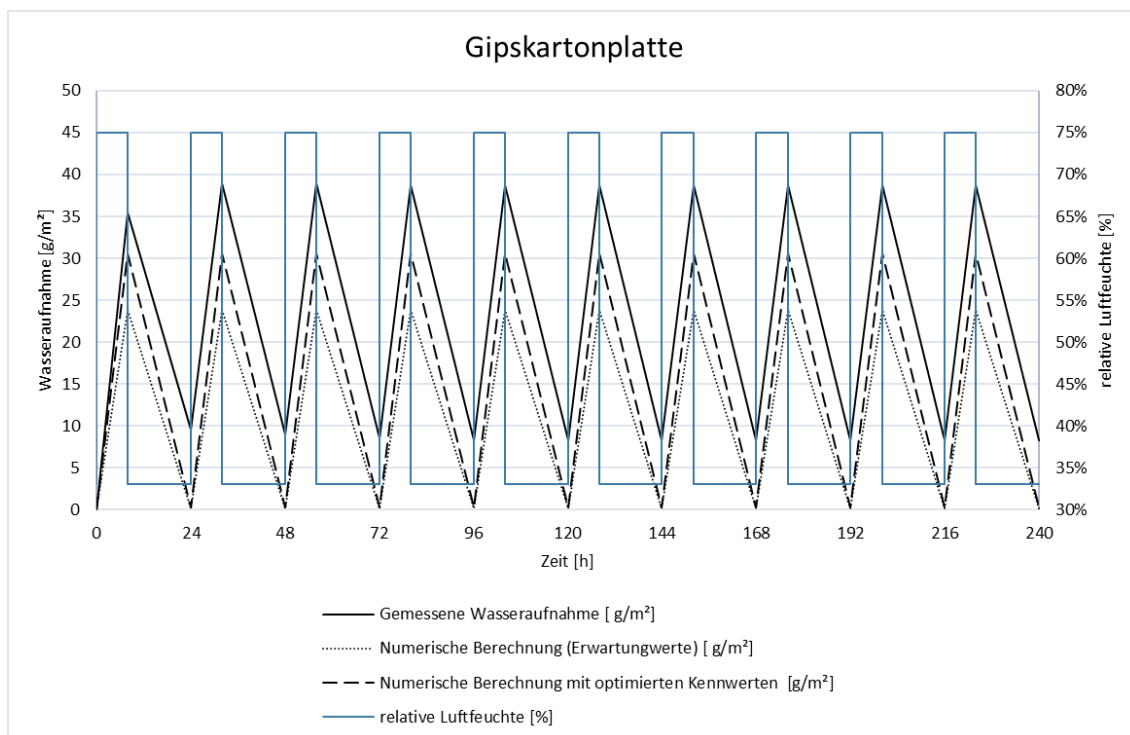


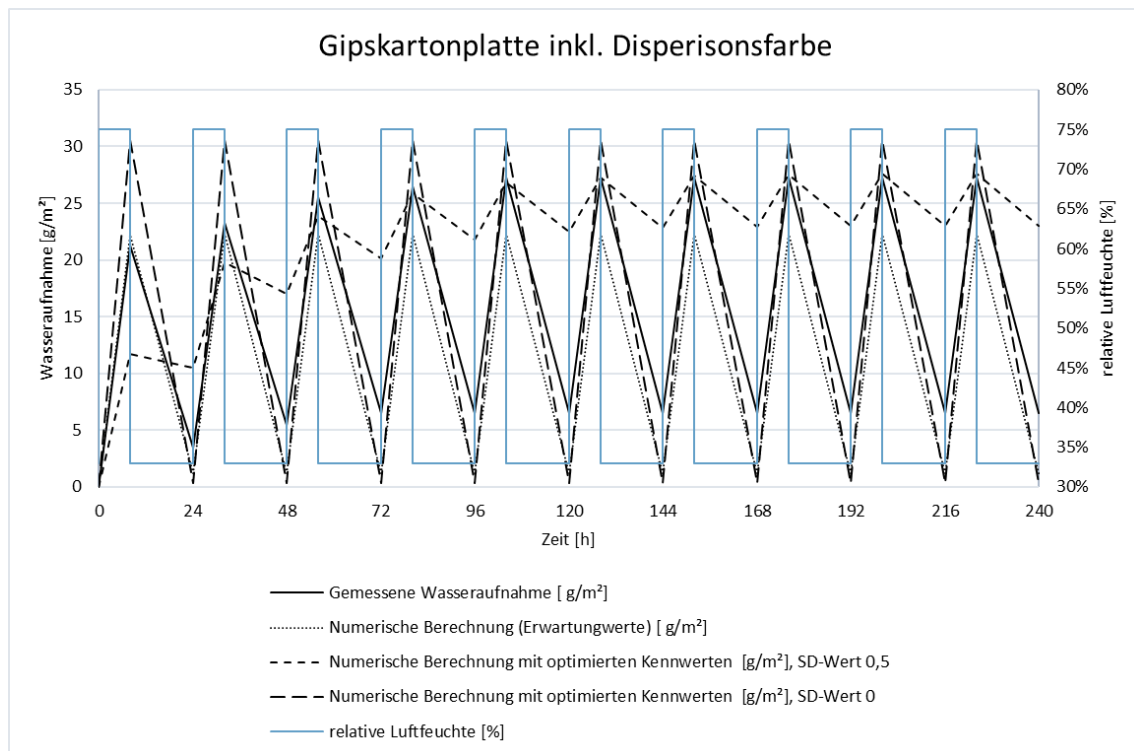
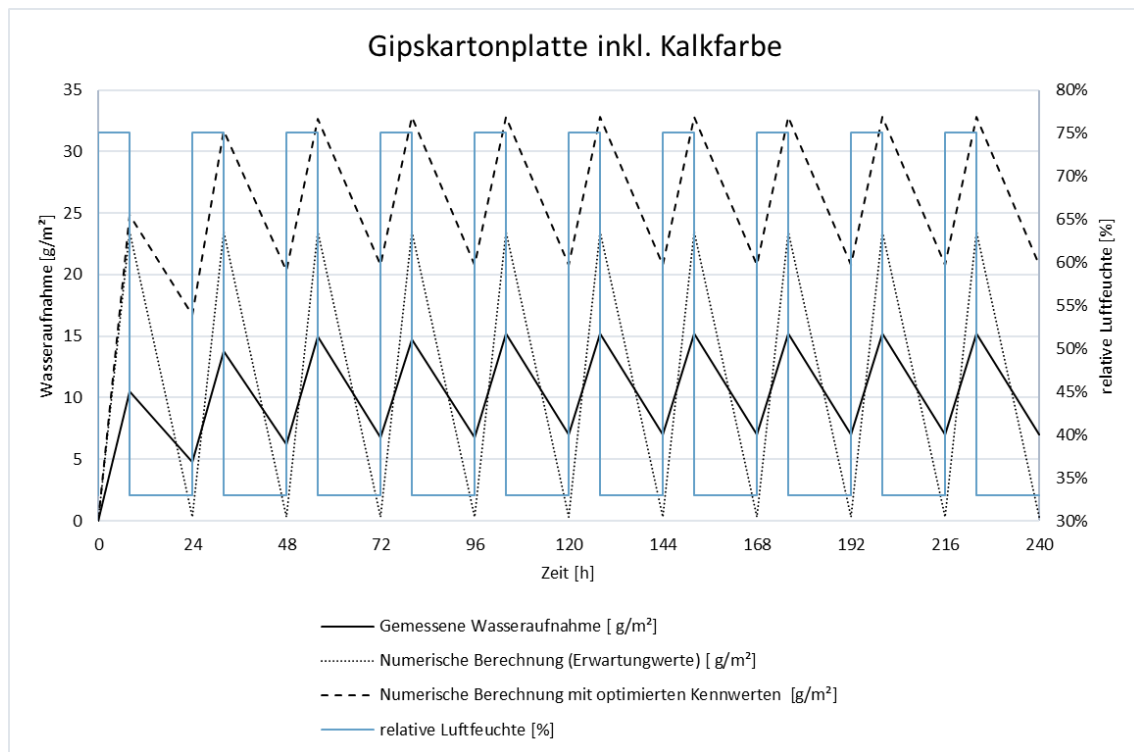


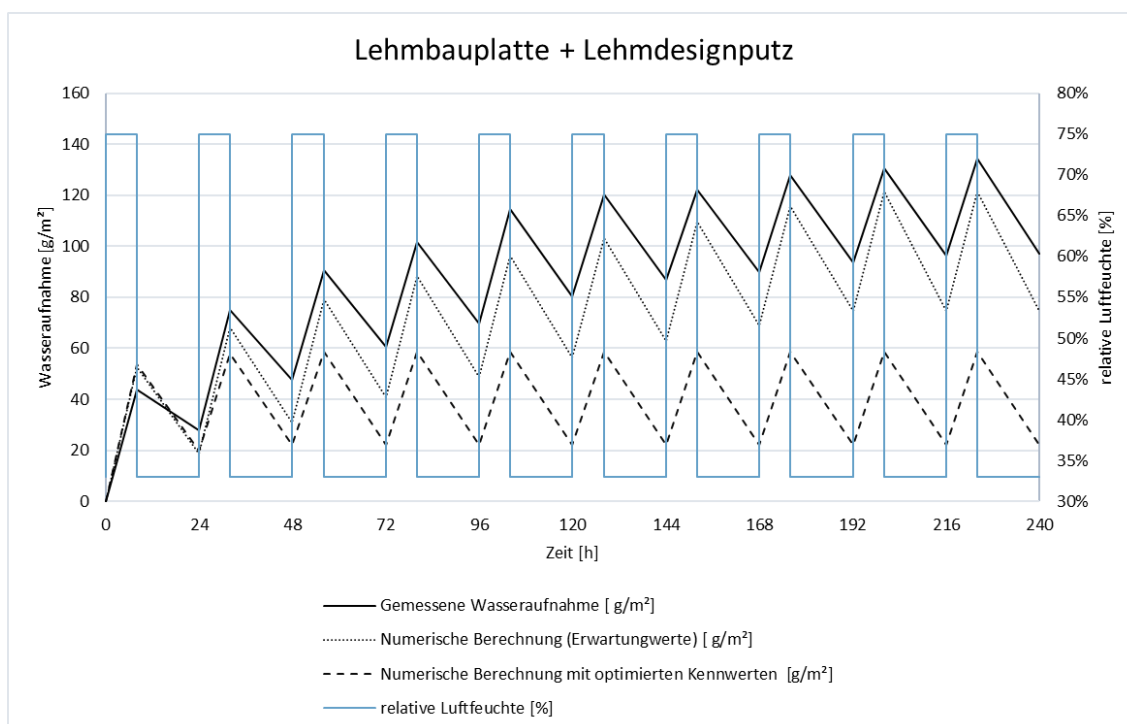
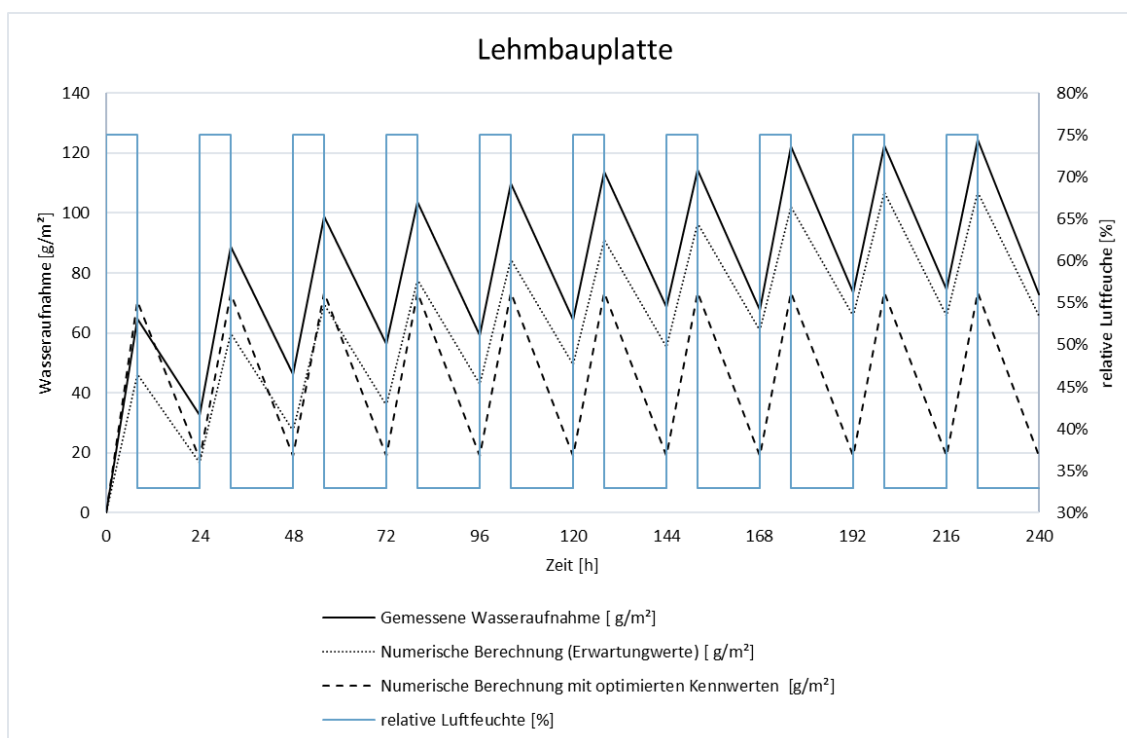


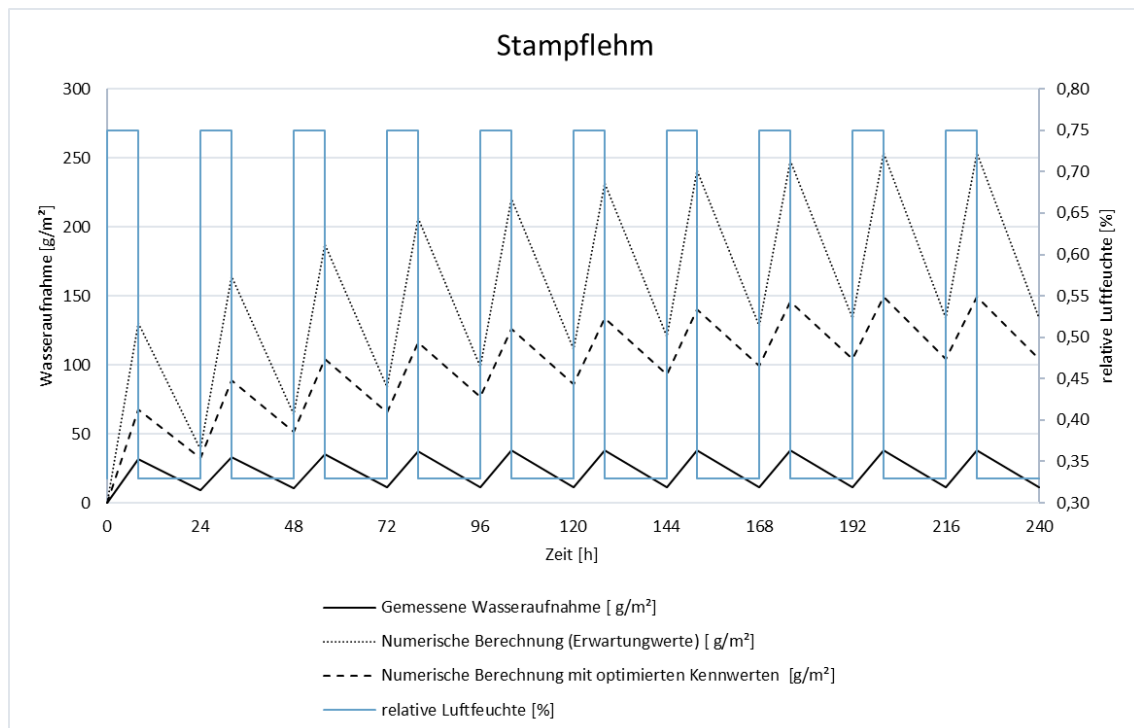
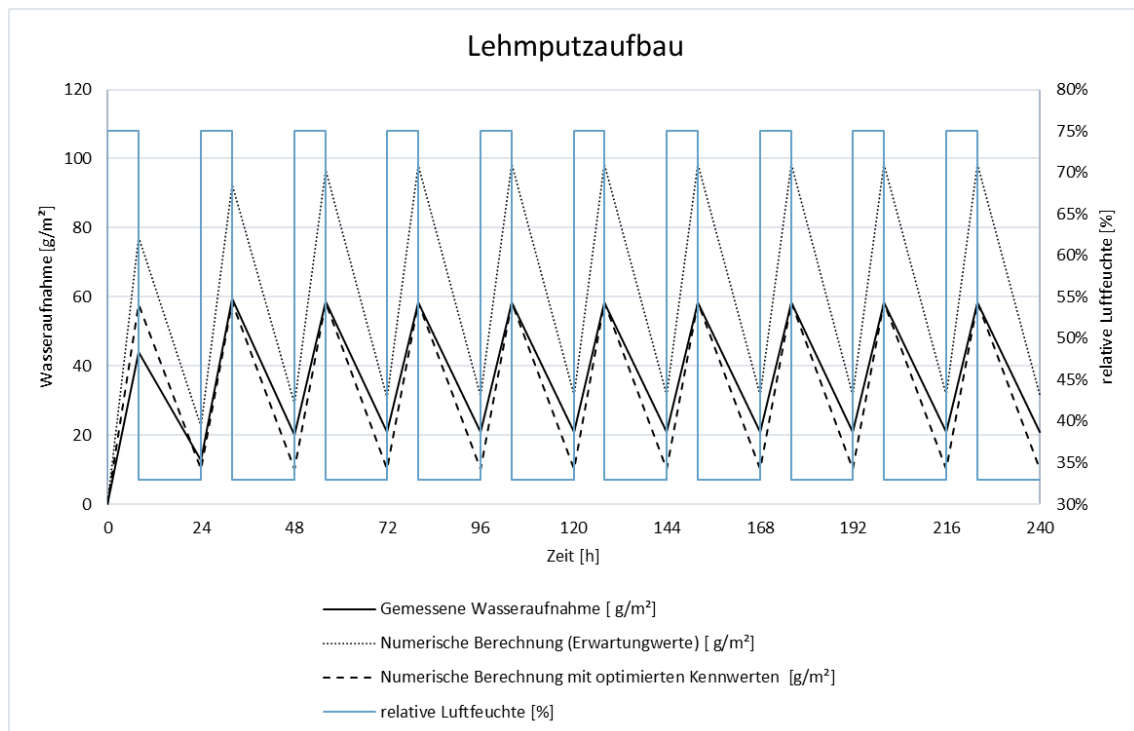


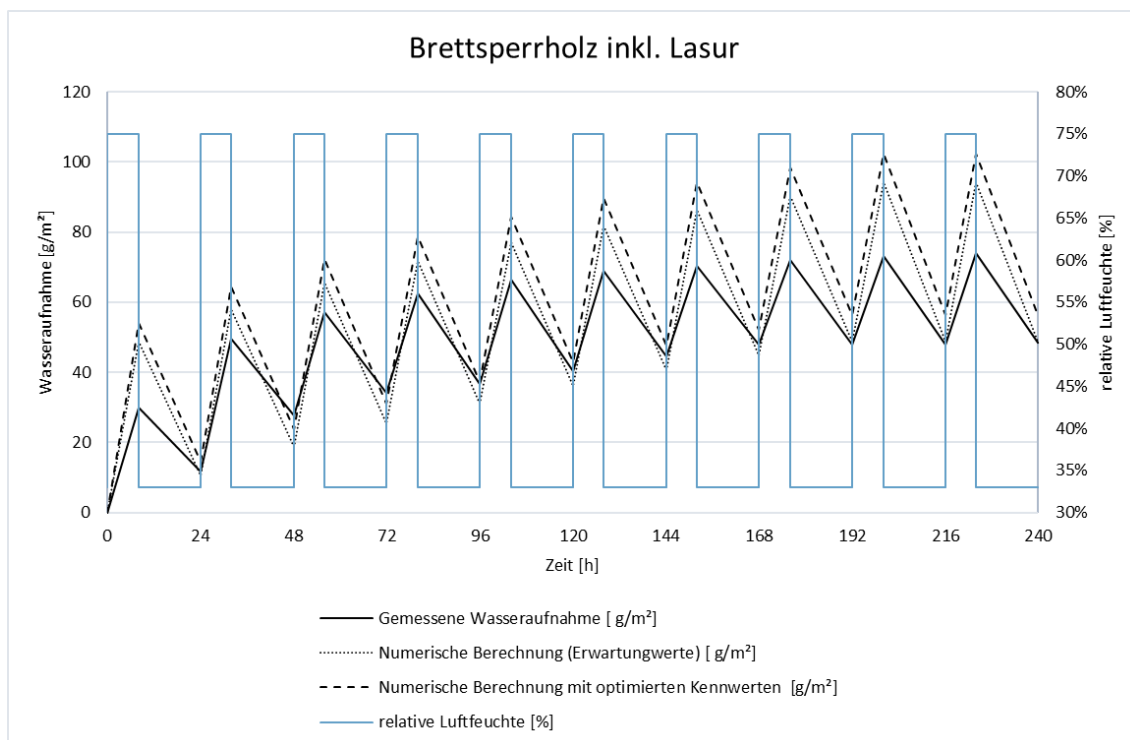
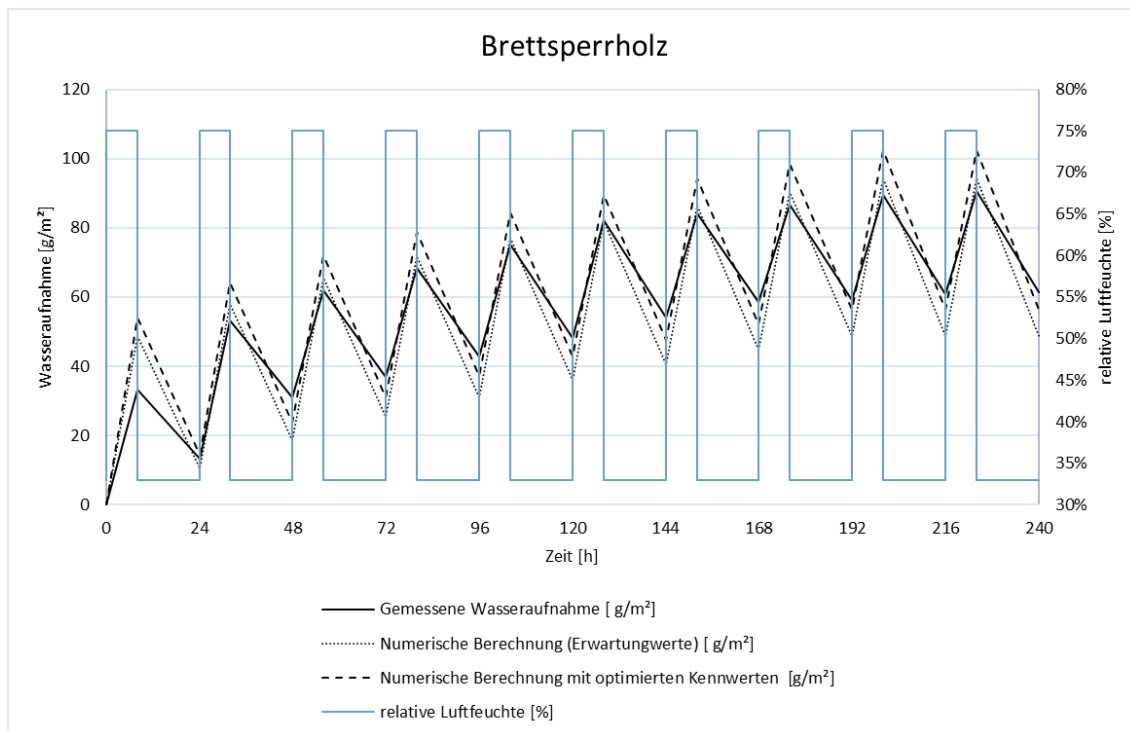
Anhang J.2 Vergleich der Feuchtepufferwirkung











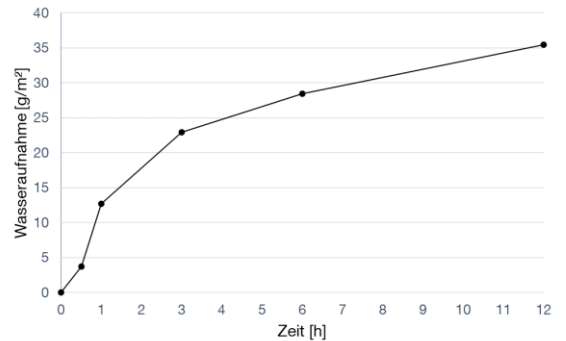
Baustoff- gruppe	Baustoff	Feuchtepuffer wert [kg/m ² ·%RH]		
		Gemessene Werte	Erwartungs- wert	Mit optimierten Kennwerten
Gipswerk- stoffe	Gipskartonplatte	0,73	0,57	0,72
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Dispersionsfarbe	0,49	0,50	0,49
	Gipskartonplatte mit Grundierung und Kalkfarbe	0,20	0,55	0,29
Holzwerk- stoffe	Brettsperrholz *)	0,70	0,97 (Var 3)	1,10 (Var 1)
	Brettsperrholz mit Lasur *)	0,61	0,97 (Var 3)	1,10 (Var 1)
Lehmwerk- stoffe	Lehmbauplatte	1,23	0,98	1,29
	Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz	0,89	0,98	0,86
	Lehmputzaufbau mit Lehmdesignputz	0,90	1,59	1,15
	Stampflehm	0,63	2,55	1,21
*) Brettsperrholz nach Variante 1 (Erwartungswerte) bringt bessere Übereinstimmung als Brettsperrholz nach Variante 3 mit optimierten Werten.				

Baustoffkennwerten

Gipskartonplatte



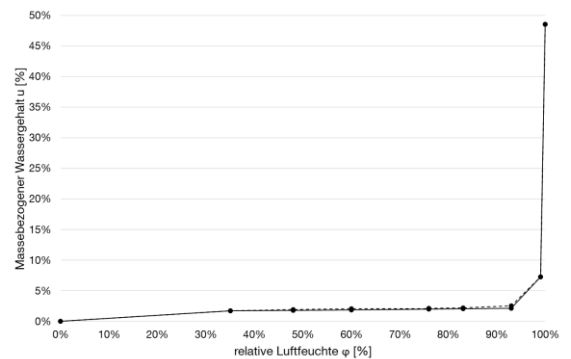
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	585
Porosität [m³/m³]:	0,65 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	850 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,02 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	1/2 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	281,25
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,038
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	0,73

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	12,18
48 %	13,48
60 %	14,20
75 %	15,46
85 %	17,52
93 %	50,22
99 %	333,96

Allgemeine Erkenntnisse:

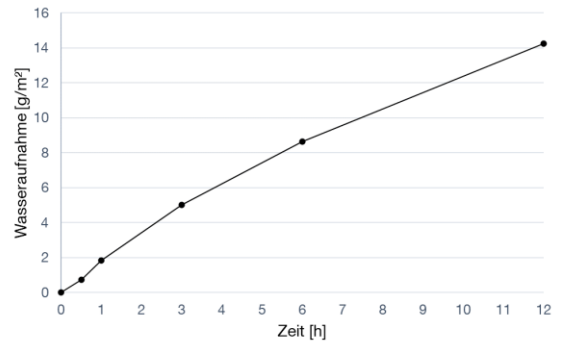
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Gipskartonplatte ohne Farbe oder mit Dispersionsfarbe.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Gipskartonplatte mit Kalkfarbe



Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Allgemeine Kennwerte entsprechen den Werten der Gipskartonplatte. Zusätzliche Definition des S_D -Wertes für die Abbildung der Kalkfarbe notwendig.

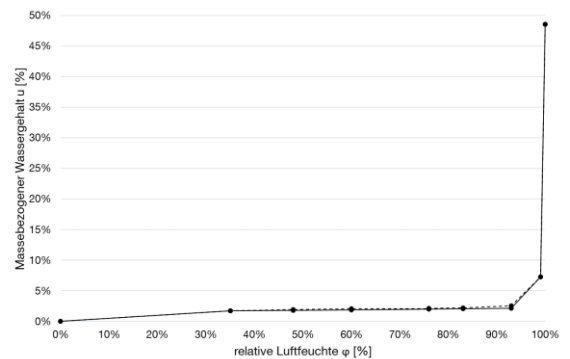
Wasserdampfdiffusions-
äquivalente Luftschichtdicke:

S_D [m] <0,5

Der tatsächliche S_D -Wert ist stark abhängig von der gewählten Grundierung und der Herstellung der Beschichtung.

Feuchtepufferwert
MBV [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ \%RH})$] 0,20

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte ϕ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w_ϕ [kg/m^3]
0 %	0
33 %	12,18
48 %	13,48
60 %	14,20
75 %	15,46
85 %	17,52
93 %	50,22
99 %	333,96

Allgemeine Erkenntnisse:

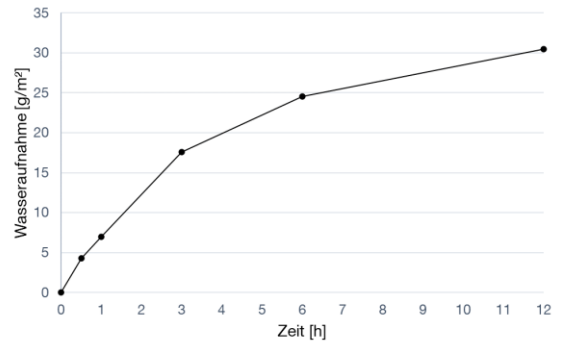
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Gipskartonplatte ohne Farbe oder mit Dispersionsfarbe. Grundierung hat einen verhältnismäßig großen S_D -Wert (<0,17), darf nicht vernachlässigt werden.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe



Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Allgemeine Kennwerte entsprechen den Werten der Gipskartonplatte. Zusätzliche Definition des S_D -Wertes für die Abbildung der Kalkfarbe notwendig.

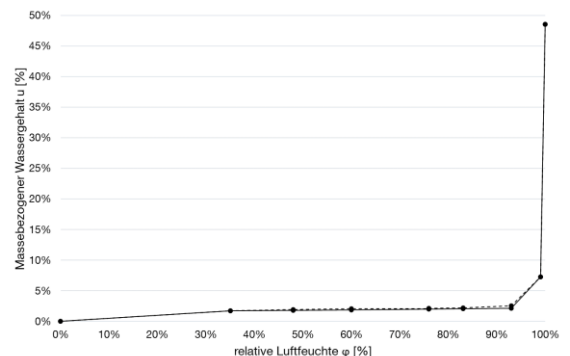
Wasserdampfdiffusions-
äquivalente Luftschichtdicke:

S_D [m] <0,3

Der tatsächliche S_D -Wert ist stark abhängig von der gewählten Grundierung und der Herstellung der Beschichtung.

Feuchtepufferwert
MBV [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ \%RH})$] 0,49

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte ϕ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w_ϕ [kg/m^3]
0 %	0
33 %	12,18
48 %	13,48
60 %	14,20
75 %	15,46
85 %	17,52
93 %	50,22
99 %	333,96

Allgemeine Erkenntnisse:

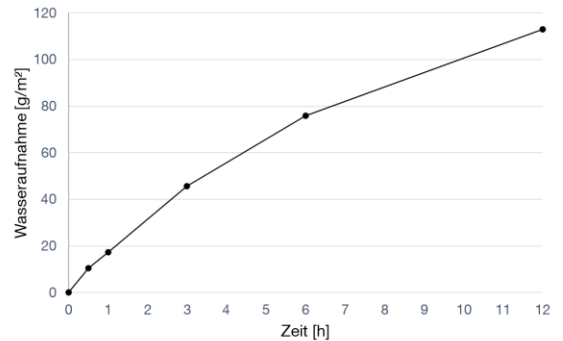
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Gipskartonplatte ohne Farbe oder mit Kalkfarbe. Hat einen kleineren S_D -Wert als die Gipskartonplatte mit Kalkfarbe..

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Holzfaserdämmung (weich)



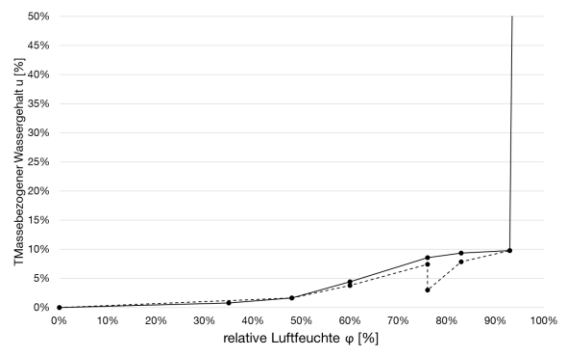
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	48,75
Porosität [m³/m³]:	0,97 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	2100 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,038 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	1/2 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	4,09
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	281,25
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,038
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	-

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	1,14
48 %	1,70
60 %	2,24
75 %	3,18
85 %	4,09
93 %	7,74
99 %	280,01

Allgemeine Erkenntnisse:

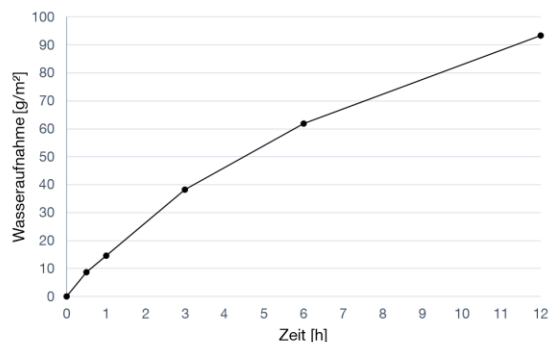
Freie Wasseraufnahme sehr schwierig zu bestimmen. Der Feuchtepufferwert ist nicht bestimmt, da dass Materialien für die untersuchten Bauteile nicht als Innenoberfläche vorkommt.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Holzfaser-Putzträgerplatte



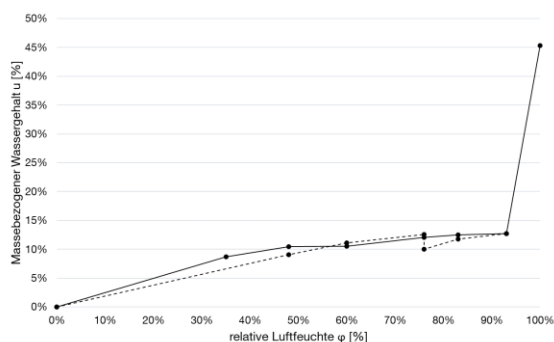
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	248
Porosität [m³/m³]:	0,83 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	2100 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,048 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	5 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	29,55
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	112,87
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,001
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	-

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	22,30
48 %	24,51
60 %	26,31
75 %	28,68
85 %	30,12
93 %	32,97
99 %	112,87

Allgemeine Erkenntnisse:

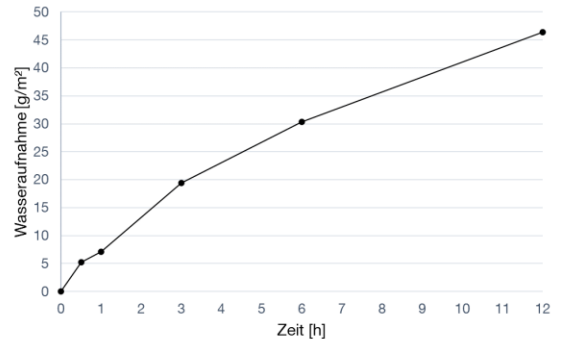
Der Feuchtepufferwert ist nicht bestimmt, da dass Materialien für die untersuchten Bauteile nicht als Innenoberfläche vorkommt

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Brettsperrholz (1)



Dynamische Sorption:



Kennwerte:

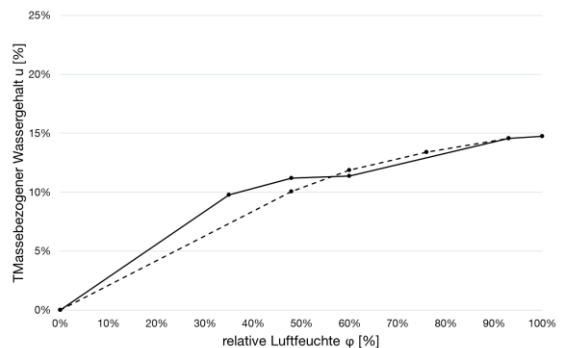
Es hat sich gezeigt, dass die Abbildung von Brettsperrholz als homogener Baustoff für die numerische Berechnung der Feuchte- und Wärmeverläufe im Material keine zuverlässigen Resultate liefert. Die Verläufe der Sorptionsisotherme, der freien Wasseraufnahme und der dynamischen Sorption lassen sich darstellen, sind aber nur für qualitative Aussagen geeignet.

Der Feuchtepufferwert lässt sich ermitteln und kann für vergleichende Aussagen verschiedener Materialien benutzt werden:

Feuchtepufferwert
MBV [kg/(m² %RH)] **0,70**

Für die weiteren Berechnungen eignet sich die Unterteilung des Brettsperrholzelements in die verleimten Schichten aus Fichte und den Kleber. Die Kennwerte finden sich auf der folgenden Seite.

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m ³]
0 %	0
33 %	40,84
48 %	45,76
60 %	49,73
75 %	54,82
85 %	58,48
93 %	62,34
99 %	91,48

Allgemeine Erkenntnisse:

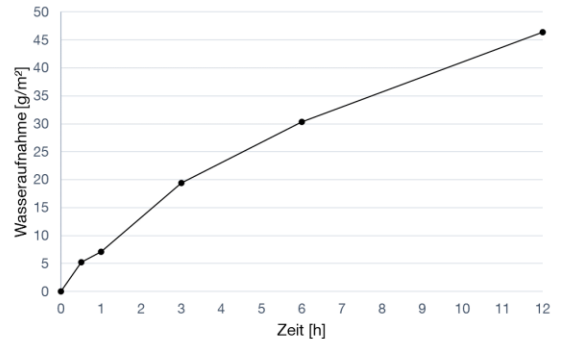
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Brettsperrholz mit Lasur.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Brettsperrholz (2)



Dynamische Sorption:



Kennwerte Fichte:

Rohdichte [kg/m³]:	422
Porosität [m³/m³]: ¹⁾	0,73
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]: ¹⁾	1400
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]: ¹⁾	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	65
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	56,59
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	91,48
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³]	0,009

Kennwerte Kleber:

Rohdichte [kg/m³]:	4
Porosität [m³/m³]: ¹⁾	0,95
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]: ¹⁾	1500
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]: ¹⁾	0,03
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	500
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	-
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	-
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³]	-
Schichtdicke [m]	0,001

Allgemeine Erkenntnisse:

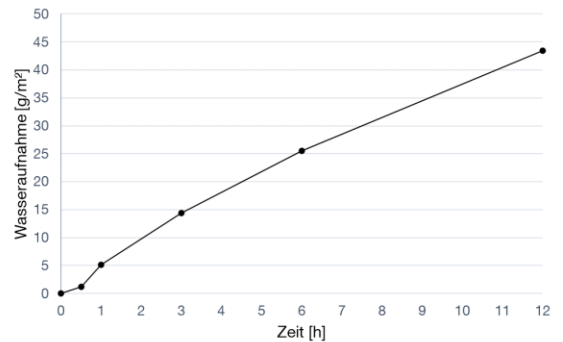
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Brettsperrholz mit Lasur. Die Eingabe des Klebers erfolgt als PU mit einer Schichtdicke von 0,001 m. Der Feuchtpufferwert wird für den gesamten Baustoff bestimmt.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Brettsperrholz mit Lasur



Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Allgemeine Kennwerte entsprechen den Werten des Brettsperrholz. Zusätzliche Definition des S_D -Wertes für die Abbildung der Lasur notwendig.

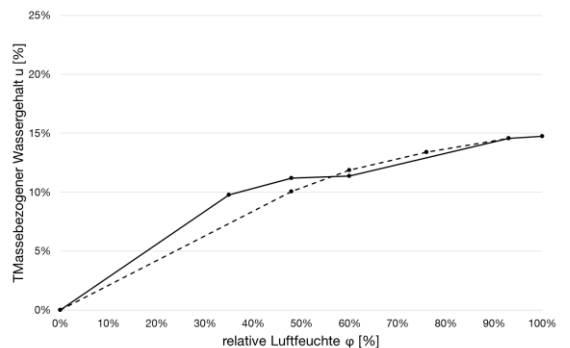
Wasserdampfdiffusions-
äquivalente Luftschichtdicke:

S_D [m] < 0,1

Der tatsächliche SD-Wert ist stark abhängig von der gewählten Lasur und der Herstellung der Beschichtung.

Feuchtepufferwert
MBV [kg/(m² %RH)] 0,61

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte ϕ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w_ϕ [kg/m³]
0 %	0
33 %	40,84
48 %	45,76
60 %	49,73
75 %	54,82
85 %	58,48
93 %	62,34
99 %	91,48

Allgemeine Erkenntnisse:

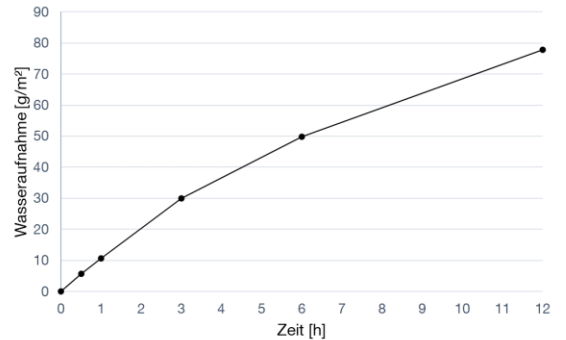
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Gipskartonplatte ohne Farbe oder mit Dispersionsfarbe.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Lehmbauplatte



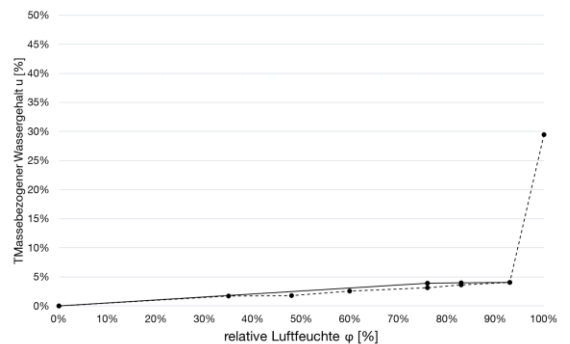
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	1470
Porosität [m³/m³]:	0,7 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	1100 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,353 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	5/10 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	20,57
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	403,87
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,07
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	1,23

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	8,68
48 %	13,05
60 %	16,50
75 %	20,63
85 %	22,57
93 %	23,31
99 %	409,05

Allgemeine Erkenntnisse:

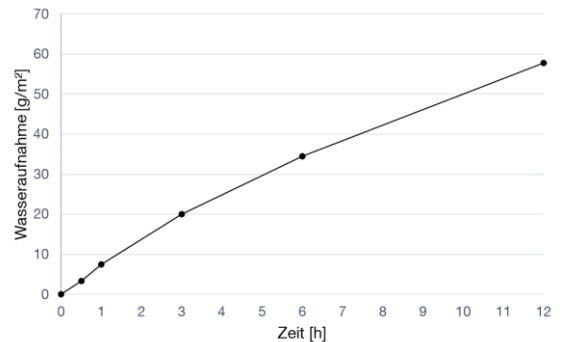
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Lehmbauplatte mit Designputz. Die Kennwerte der Lehmbauplatte streuen sehr stark. Die Probekörper sind sehr inhomogen.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Lehmbauplatte mit Lehmdesignputz



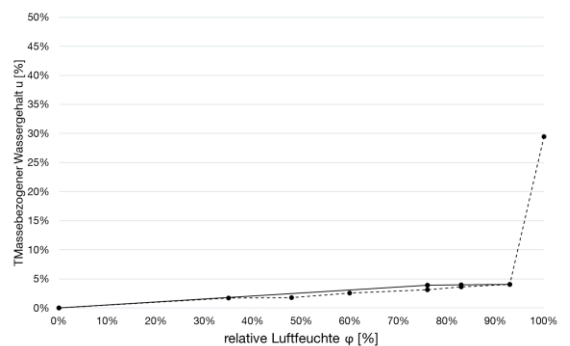
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	1470
Porosität [m³/m³]:	0,7 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	1100 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,353 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	5/10 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	20,57
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	403,87
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,07
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	0,89

Feuchtespeicherfunktion



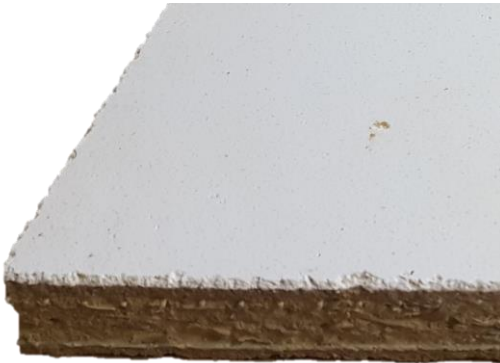
Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	8,68
48 %	13,05
60 %	16,50
75 %	20,63
85 %	22,57
93 %	23,31
99 %	409,05

Allgemeine Erkenntnisse:

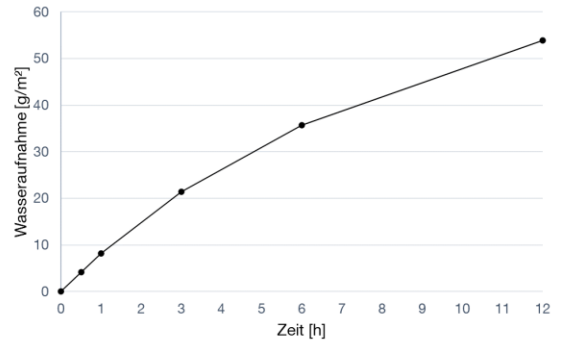
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Lehmbauplatte ohne Beschichtung. Die Kennwerte der Lehmbauplatte streuen sehr stark. Die Probekörper sind sehr inhomogen.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Lehmputz Aufbau



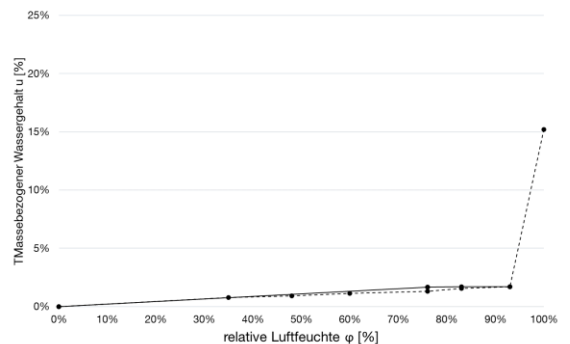
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	1710
Porosität [m³/m³]:	0,65 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	1000 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,59 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	5/10 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	22,28
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	492,36
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,081
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	0,90

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	15,86
48 %	17,12
60 %	18,39
75 %	20,87
85 %	23,46
93 %	34,56
99 %	492,36

Allgemeine Erkenntnisse:

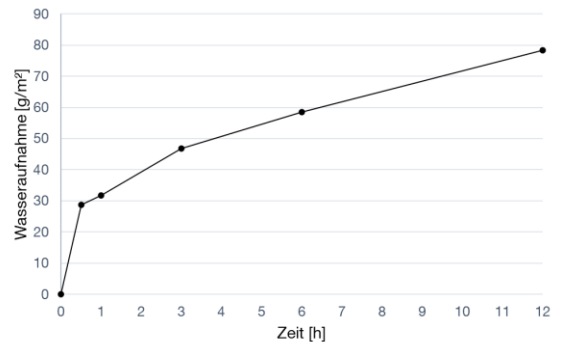
Die Oberflächengestaltung hat großen Einfluss auf das Materialverhalten. Siehe Lehmbauplatte mit und ohne Designputz.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Stampflehm



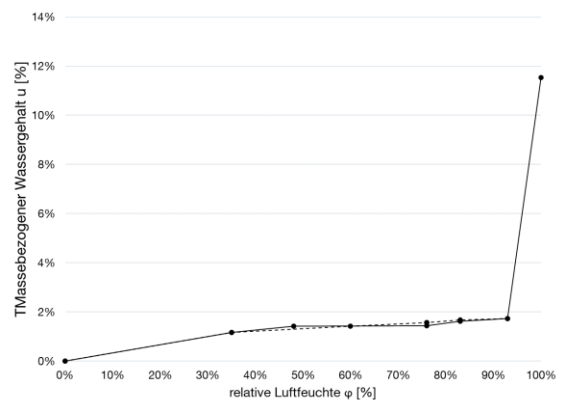
Dynamische Sorption:



Kennwerte:

Rohdichte [kg/m³]:	2404
Porosität [m³/m³]:	0,45 ¹⁾
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]:	8500 ¹⁾
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]:	0,70 ¹⁾
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]:	23 ¹⁾
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m³]:	38,71
Freie Wassersättigung [kg/m³]:	277,16
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m³·√s]	0,12
Feuchtepufferwert [kg/(m² %RH)]	0,63

Feuchtespeicherfunktion



Relative Luftfeuchte φ [%]	Volumenbezogener Wassergehalt w _φ [kg/m³]
0 %	0
33 %	40,84
48 %	45,76
60 %	49,73
75 %	54,82
85 %	58,48
93 %	62,34
99 %	91,48

Allgemeine Erkenntnisse:

Die Kennwerte von Stampflehm streuen sehr stark. Die Probekörper sind sehr inhomogen.

¹⁾ Werte aus bestehenden Herstellerangaben, im Rahmen dieser Arbeit nicht neu bestimmt worden.

Herstellerangaben

Baustoff	Technisches Merkblatt	Bild
Gipskartonplatte	https://www.knauf.de/profi/sortiment/produkte/bauplatte-gkb.html#showtab-tab_989_4	https://mdbapi.knauf.com/v1/asset_download.php?p=g&action=download&a=208911&f=434x326&c=0fc223dc1c92082818bd5be1a47dd5e3
Gipskartonplatte mit Kalkfarbe	https://gima-profi.de/produkte/grundierungen-und-farben/grundierungen/182/gima-gk-grund-basic?c=36 https://gima-profi.de/produkte/grundierungen-und-farben/kalk-o-lith-kalksystem/277/klima-pro-grund-basic	https://mdbapi.knauf.com/v1/asset_download.php?p=g&action=download&a=208911&f=434x326&c=0fc223dc1c92082818bd5be1a47dd5e3
Gipskartonplatte mit Dispersionsfarbe	-	https://mdbapi.knauf.com/v1/asset_download.php?p=g&action=download&a=208911&f=434x326&c=0fc223dc1c92082818bd5be1a47dd5e3
Holzfaserdämmung (weich)	https://www.steico.com/produkte/holz-faser-daemmstoffe/steicoflex-038/ueberblick/?gclid=EAlaQobChMlr8jzgJXW7AIVSv7VCh1OpAvoEAAAYASAAEgJcxfD_BwE	https://www.steico.com/produkte/holz-faser-daemmstoffe/steicoflex-038/ueberblick/?gclid=EAlaQobChMlr8jzgJXW7AIVSv7VCh1OpAvoEAAAYASAAEgJcxfD_BwE
Holzfaser-Putzträgerplatte	https://www.steico.com/de/produkte/holz-faser-daemmstoffe/steicobase/ueberblick/	https://www.steico.com/de/produkte/holz-faser-daemmstoffe/steicobase/ueberblick/
Brettsperrholz	https://www.binderholz.com/produkte/brettsperrholz-bbs/	https://www.binderholz.com/produkte/brettsperrholz-bbs/
Brettsperrholz mit Lasur	-	https://www.binderholz.com/produkte/brettsperrholz-bbs/
Lehmbauplatte	https://www.claytec.de/Produkte/Bilder-und-Dokumente/3_Lehm-Trockenbau/Lehmbauplatte-schwer-D-22/Produktblatt-Lehmbauplatte-schwer-D22/2020-08_09-014.pdf	https://www.claytec.de/Produkte/Bilder-und-Dokumente/3_Lehm-Trockenbau/Lehmbauplatte-schwer-D-22/Produktblatt-Lehmbauplatte-schwer-D22/2020-08_09-014.pdf
Lehmbauplatte mit Designputz	https://www.claytec.de/de/produkte/feine-oberflaechen/yosima-lehm-designputz_pid6	https://www.claytec.de/Produkte/Bilder-und-Dokumente/3_Lehm-Trockenbau/Lehmbauplatte-schwer-D-22/Produktblatt-Lehmbauplatte-schwer-D22/2020-08_09-014.pdf
Lehmputzaufbau mit Designputz	https://www.claytec.de/de/produkte/lehmputze/lehm-unterputz-mit-stroh_pid150	Eigene Aufnahme
Stampflehm	Alnatura-Datensatz	Eigene Aufnahme