

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit Master's Thesis

Einfluss von Schlagregen auf das Risiko des Konstruktionsversagens und der Schimmelpilzbildung an Innenoberflächen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic

E 206
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur

von

Catrin Humer
Matr.Nr.: 0325129
Adalbert-Konrad-Straße 5
4707 Schlüßlberg

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, Juni 2011

Danksagung

Ich möchte Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. Thomas Bednar herzlich für die Betreuung dieser Diplomarbeit und für die vielen wertvollen Ratschläge und Hinweise danken. Seine stete Diskussionsbereitschaft ermöglichte das Gelingen dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich Frau Univ.Ass. Dipl.Ing. Dr.techn. Azra Korjenic und dem ganzen Team des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien für die Bereitstellung von Messergebnissen und die Unterstützung bei Versuchen.

An dieser Stelle möchte ich meinen Eltern für die große Unterstützung, das Verständnis und die Förderung während meines Studiums und dem Verfassen dieser Arbeit danken. Meiner Schwester, Petra, danke ich für den Zuspruch und die Antworten auf meine vielen Fragen.

Meinem Freund, Günther, möchte ich für sein stetes Interesse an meiner Arbeit und sein Verständnis während arbeitsreicher Zeiten danken.

Für die stete Diskussionsbereitschaft und die vielen Anregungen danke ich meinen Chefs, Walter Weissenböck und Reinhard Kainberger. Durch sie war es möglich, die baupraktische Seite des Themas immer im Blick zu behalten.

Kurzfassung

Einfluss von Schlagregen auf das Risiko des Konstruktionsversagens und der Schimmelpilzbildung an Innenoberflächen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Einfluss von Schlagregen auf verputzte Fassaden auf das gesamte Bauteil und die Auswirkungen auf das Innenklima und die Schimmelpilzbildung an Innenoberflächen. Speziell in älteren Gebäuden mit Außenwänden aus verputzten 38er-Ziegeln ohne Wärmedämmverbundsystem treten vermehrt Schimmel- und Kondensatprobleme auf. Dies lässt vermuten, dass stark schlagregenbelastete und verschattete Fassaden die aufgenommene Feuchtigkeit nicht ausreichend nach außen abgeben können und die Feuchtigkeit nach innen transportiert wird. Damit kann es zu einer starken Durchfeuchtung des Mauerwerks beziehungsweise des Innenputzes und in weiterer Folge zur Erhöhung der Raumlufffeuchte kommen, was Schimmelbildung ermöglicht oder begünstigt.

Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen zur Berechnung und Messung der Schlagregenmenge, zu Außenputzen sowie zur Schimmelkeimung und zum Schimmelpilzwachstum zusammengefasst. Des Weiteren werden die hygrothermischen Vorgänge in Bauteilen – Wärmeleitung, Wasseraufnahme, Feuchtetransport, Diffusion – dargestellt und beschrieben. Die unterschiedlichen Messverfahren zur Feststellung des Wasseraufnahmekoeffizienten, der Diffusion, der Rohdichte und der Biegezug- und Druckfestigkeit von Putzmörteln werden beschrieben und alternative Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung vor Ort zusammengefasst.

Im nächsten Abschnitt dieser Arbeit werden die Schlagregenmessungen am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien beschrieben und ausgewertet. An einer Nord-West-Fassade wurde eine Schlagregenmessstelle zur quantitativen Erfassung des Schlagregens angebracht. Daneben befinden sich zwei Öffnungen zum Anbringen von Platten, deren Gewicht kontinuierlich gemessen werden kann. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Gewicht einer Calciumsilikatplatte und eines hydraulischen Kalkputzes ausgewertet.

Um die Messung des Schlagregens simulieren zu können, wurden die Stoffeigenschaften der Calciumsilikatplatte und des hydraulischen Kalkputzes mit Versuchen bestimmt. Diese Materialparameter wurden gemeinsam mit den Wetterdateien in das hygrothermische Simulationsprogramm HAM3D, entwickelt im

Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien, eingegeben und die Simulation mit den gemessenen Werten verglichen. Damit konnte festgestellt werden, dass es möglich ist, die Wasseraufnahme durch Schlagregen mit dem Programm HAM3D sehr genau nachzurechnen, wenn Regen- beziehungsweise Schlagregendaten mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens 10 Minuten zur Verfügung stehen.

Im letzten Abschnitt wurden verschiedene Bauteilsituationen mit unterschiedlichen Wetterszenarien simuliert. Die Baustoffkennwerte wie Wasseraufnahmekoeffizient und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wurden variiert, um feststellen zu können, bei welchen Situationen ein kritisches Innenklima beziehungsweise eine erhöhte Feuchte des Innenputzes oder der inneren Bauteilschicht auftritt. Es konnte dargestellt werden, dass Außenwände aus 25 cm oder 38 cm dickem Ziegelmauerwerk ohne Wärmedämmverbundsystem bei Schlagregenbelastung und ohne oder nur geringer Sonnenbestrahlung immer mehr Feuchtigkeit aufnehmen und nach einigen Jahren ein kritischer Feuchtezustand an der Innenoberfläche auftreten kann. Durch die fehlende Sonnenbestrahlung trocknet das Bauteil kaum nach außen aus und ein großer Anteil des aufgenommenen Wassers wird nach innen weitergeleitet.

Abstract

Influence of Wind-driven Rain on the Risk of Damage of Building Elements and Mould Growth on Interior Surfaces

The following thesis is concerned with the influence of wind-driven rain on plastered exterior walls to the entire building and the effects to the indoor climate and the mould growth on interior surfaces. Especially in buildings with exterior walls out of bricks with a thickness of 38 cm without exterior insulation, problems with mould growth or condensation can occur. This leads to the assumption that in walls with heavy impact of wind-driven rain and with no solar irradiation the water will be transported to the interior surface. The wall and especially the interior rendering will become wetter and wetter and this influences the indoor climate. In the following, mould growth can occur.

In the first chapter of this thesis the fundamentals of the measurement and calculation of wind-driven rain and the principles of mould growth and germination are summarized. Further on, the hygrothermal procedures in exterior walls will be illustrated and described. The different measurement methods to find out the water absorption coefficient, the water vapour permeability, the dry bulk density and the flexural and compressive strength and alternative methods for testing the plaster for on-site findings will be described.

In the next chapter the wind-driven rain measurements on the test site of the Research Center of Building Physics and Sound Protection of the Vienna University of Technology will be described and analysed. On a north-west facade a driving-rain-gauge for the measurement of the driving-rain was installed. Next to the gauge there are two openings to install different materials and to continuously measure the mass of the boards. In this thesis the mass of a calcium-silicate-board and hydraulic lime plaster was measured.

To simulate the measurements of the wind-driven rain the material characteristics of the two materials were determined. These parameters, together with the weather files, were the input data of the hygrothermal simulation program HAM3D, developed at the Research Center of Building Physics and Sound Protection of the Technical University of Vienna. The results of the simulation were compared with the measurements. It can be said that it is possible to calculate the water absorption from

driving-rain with the program HAM3D very exactly, if data of the rain or driving-rain in a time resolution of 10 minutes or less are available.

In the last chapter different building components with different weather scenarios were simulated. Further on, the material characteristics - absorption coefficient and water vapour permeability - were varied to find out the effects to the indoor climate. The aim was to see when a critical indoor climate can be found or the humidity of the indoor air or the interior plaster is increased. It can be said, that exterior brick walls with a thickness of 25 cm or 38 cm without exterior insulation are very critical when they are shaded and stressed by driving-rain. They absorb more and more water and after some years the humidity in the wall becomes critical. When exterior walls are shaded, the absorbed water will dry very slowly and most of the water will be transported to the room.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Grundlagen	3
2.1.	Außenputze	3
2.1.1.	Putzarten und Eigenschaften	3
2.1.2.	Anforderungen an Putze	6
2.1.3.	Prüfung von Außenputzen.....	9
2.1.3.1.	Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit.....	9
2.1.3.2.	Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	10
2.1.3.3.	Bestimmung der Trockenrohichte	11
2.1.3.4.	Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit	11
2.2.	Hygrothermische Vorgänge in Außenwänden	12
2.2.1.	Feuchtetransport.....	12
2.2.2.	Konvektion feuchter Luft in Hohlräumen.....	16
2.2.3.	Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit.....	17
2.2.4.	Feuchte- und Wärmeübergänge an Bauteilgrenzen	17
2.3.	Schlagregen.....	19
2.3.1.	Allgemeines	19
2.3.2.	Messung des Schlagregens	20
2.3.2.1.	Schlagregenmessungen an der K.U. Leuven, Belgien.....	21
2.3.2.2.	Schlagregenmessungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Deutschland	22
2.3.3.	Berechnung des Schlagregens	23
2.4.	Schimmelbildung an der inneren Wandoberfläche	27
2.4.1.	Grundlagen.....	27
2.4.2.	Gründe für Schimmelbildung in Innenräumen	29
2.4.3.	Berechnung der Wahrscheinlichkeit für Schimmelwachstum.....	31
2.4.3.1.	Ansatz von Sedlbauer	31
2.4.3.2.	Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka.....	33
3.	Langzeit-Schlagregenmessung	35
3.1.	Beschreibung der Messeinrichtungen	35
3.2.	Daten der Wetterstation	38
3.3.	Daten der Langzeit-Schlagregenmessung	44
4.	Bestimmung der relevanten Materialparameter	46
4.1.	Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit.....	46
4.2.	Bestimmung des Feuchtegehalts bei Sättigung.....	50
5.	Hygrothermische Simulation	51
5.1.	Grundlagen hygrothermische Simulation.....	51
5.2.	Nachrechnen der Messung mit HAM3D	53
5.2.1.	Eingabedaten.....	53
5.2.2.	Materialdaten	55

5.2.3.	Berechnungsergebnisse	58
5.2.3.1.	Berechnung mit umgerechneten Normalregendaten.....	58
5.2.3.2.	Berechnung mit gemessenen Schlagregendaten	61
5.2.3.3.	Einfluss der Zellengröße.....	62
5.2.3.4.	Einfluss der Ungenauigkeiten der Eingabewerte	64
5.3.	Simulation von unterschiedlichen Bauteilen und Situationen.....	66
5.3.1.	Eingabedaten.....	66
5.3.2.	Ergebnisse.....	67
5.3.2.1.	Bauteilsituation 1	67
5.3.2.2.	Bauteilsituation 1a	70
5.3.2.3.	Bauteilsituation 1b	72
5.3.2.4.	Bauteilsituation 1c	74
5.3.2.5.	Bauteilsituation 1d	81
5.3.2.6.	Bauteilsituation 2	83
5.3.2.7.	Bauteilsituation 3	87
6.	Zusammenfassung.....	90
7.	Verzeichnisse	93
7.1.	Abbildungsverzeichnis	93
7.2.	Tabellenverzeichnis	96
7.3.	Literaturverzeichnis.....	97

1. Einleitung

Die thermischen und hygrischen Zustände in einem Raum sind ein wichtiger Einflussfaktor für die Behaglichkeit und somit auch für den materiellen oder immateriellen Wert eines Gebäudes.

Tritt durch ungünstige hygrothermische Randbedingungen, durch den falschen Einsatz von Baustoffen, durch falsche Bauteilkombinationen oder durch ungünstige Bauteilgeometrien Kondensat oder gar Schimmelbildung auf inneren Bauteiloberflächen auf, so stellt dies nicht nur für die Gesundheit der Bewohner sondern auch für die Dauerhaftigkeit des Bauteils und den Wert eines Gebäudes ein Problem dar. Schimmelbildung kann dann auftreten, wenn die relative Luftfeuchte an der Oberfläche ausreichend hoch ist, die Temperaturen in einem gewissen Bereich liegen und genügend Nährstoffe für den Schimmelpilz an der Oberfläche vorhanden sind.

In den letzten Jahren treten vermehrt Kondensat- und Schimmelprobleme in Gebäuden mit 38 cm Hochlochziegelmauerwerk ohne Außendämmung, gebaut in den 80iger- und 90iger-Jahren, auf. In mehrgeschossigen Wohnbauten treten diese Probleme meist nur in den Wohnungen auf, die eine Außenfassade auf der vom Schlagregen belasteten Gebäudeseite besitzen und vollständig oder teilweise verschattet sind.

Dies lässt vermuten, dass es eine Verbindung zwischen der Wasseraufnahme von Außenputzen und der Schimmelbildung an Innenoberflächen gibt. Abuku [ABU09a] simulierte eine Außenwand aus Ziegeln in einem kalten und feuchten Klima und stellte fest, dass die Durchfeuchtung durch Schlagregen einen signifikanten Einfluss auf das Innenklima haben kann. Er verglich die Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Innenoberfläche und zeigte, dass Schlagregen Schimmelwachstum, speziell in Eckbereichen, begünstigen kann.

Die Bauordnungen in Österreich legten für die U-Werte der Außenbauteile bis zur Einführung der OIB-Richtlinie 6 für jedes Bundesland unterschiedliche Anforderungen fest. Von 1981 bis 1985 lag z.B in Oberösterreich die Anforderung an den U-Wert von Außenwänden bei $U \leq 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, von 1985 bis 1999 bei $U \leq 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ [OIB07]. In Wien war die Anforderung an den U-Wert der Außenwände von 1976 bis 1993 $U \leq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, ab 1993 $U \leq 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ [OIB07]. Dies ermöglichte teilweise bis in die 90iger-Jahre eine monolithische Ziegelbauweise aus 38 cm Hochlochziegel ohne zusätzliche Dämmmaßnahmen.

Der einzige Schutz vor Schlagregen bei diesen Gebäuden ist somit, außer einem gewissen Dachüberstand, meist nur der Außenputz, welcher aber nach 10 bis 20 Jahren durch die Bewitterung sowie Frost-Tau-Wechsel und Setzungen Schäden (Risse und Haarrisse) aufweisen kann. Durch diese Risse kann Regenwasser in die Wand eindringen und nach innen weitergeleitet werden. An der inneren Oberfläche wird ein Teil der Feuchtigkeit dann in den Raum abgegeben. In solchen Fällen reicht das mehrmalige Stoßlüften oft nicht aus, um den Feuchtehaushalt im Raum und in den innersten Bauteilschichten in einem unkritischen Bereich zu halten. Es kann zu Kondensat- und zu Schimmelbildung kommen.

Um darzustellen, welche Auswirkungen verschiedene Außenputze mit unterschiedlichen Wasseraufnahmekoeffizienten auf das Innenklima bzw. den Feuchtehaushalt im Bauteil haben, werden im Zuge dieser Arbeit dreidimensionale hygrothermische Simulationen mit dem Programm HAM3D, entwickelt im Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz des Instituts für Hochbau und Technologie der TU Wien, durchgeführt und ausgewertet. Es wird untersucht, welche Randbedingungen und Baustoffeigenschaften und -kombinationen zu einem Innenklima führen, das günstig für die Keimung und das Wachstum von Schimmelpilzen auf Bauteiloberflächen ist.

2. Grundlagen

2.1. Außenputze

2.1.1. Putzarten und Eigenschaften

Außenputze stellen die äußerste Schutzschicht der vertikalen Bauteile eines Gebäudes dar. Um die Anforderungen die an sie gestellt werden zu erfüllen, müssen sie Solarstrahlung, Hitze, Frost, Schlagregen und mechanischen Einwirkungen standhalten. Um die Dauerhaftigkeit des Putzes sicherzustellen, muss die Art des Putzes genau auf die gegebenen Umgebungsbedingungen und den Untergrund abgestimmt sein.

Putzmörtel können gemäß ÖNORM EN 998-1 [ONO10] nach folgenden Gesichtspunkten eingeteilt werden:

- Herstellungskonzept
 - Mörtel nach Eignungsprüfung
 - Mörtel nach Rezept
- Herstellungsort oder Herstellungsart
 - Werkmörtel
 - werkmäßig hergestelltem Mörtel
 - Baustellenmörtel
- Eigenschaften und/oder Verwendungszweck
 - Normalputzmörtel
 - Leichtputzmörtel
 - Edelputzmörtel
 - Einlagenputzmörtel für außen
 - Sanierputzmörtel
 - Wärmedämmputzmörtel

Die wesentlichen Eigenschaften des Putzes werden von der Art des Bindemittels bzw. dem Mischungsverhältnis bei mehreren Bindemitteln bestimmt. Werden spezielle Eigenschaften gefordert, können Zusatzmittel und Zusatzstoffe eingesetzt oder bestimmte Gesteinskörnungen verwendet werden [ONO10].

Die verschiedenen Putzarten sowie die Art des Bindemittels werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 1 – Putzarten [HE110]

Putzart	mineralische Bindemittel
Kalkputz	Luftkalk bzw. hydraulischer Kalk
Zementputz	gebrannter Portlandzementklinker und Gipsstein
Kalk-Zement-Putz	Luft- / Wasserkalk und Zement
Silikatputz	auf Wasserglasbasis
Lehmputz	Gemenge aus Sand, Schluff und Ton
Gipsputz	gebrannter und gemahlener Gips
Kalk-Gips-Putz	Gips und Kalk
	organische Bindemittel
Kunstharzputz	Polymerdispersionen oder gelöste Harze

Für spezielle Anwendungsgebiete können besondere Putze wie etwa Sanierputze oder Wärmedämmputze verwendet werden. Sanierputze weisen eine hohe Porosität und Wasserdampfdiffusion sowie eine verminderte kapillare Leitfähigkeit auf [ONO10]. Sie sind geeignet, um durchfeuchtetes Mauerwerk, das wasserlösliche Salze enthält, zu behandeln [ONO09a]. Wärmedämmputze enthalten Stoffe, welche die Wärmeleitfähigkeit des Putzes vermindern. Dadurch ist es zum Beispiel möglich, den Wärmedurchgangskoeffizienten bei monolithischen Ziegelwänden, wie sie oft im Kleinhausbau zur Anwendung kommen, zu verbessern.

Die Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserdampfdurchlässigkeit sind bei den verschiedenen Putzarten stark unterschiedlich. Otto [OTT95] und Bednar [BED00] haben für die Wasseraufnahmefähigkeit folgende Werte gemessen:

Tab. 2 – Wasseraufnahmefähigkeit w verschiedener Putzarten nach Otto [OTT95]

	w [kg/m ² h ^{1/2}]
Zementputz	1,6
Kalk-Zementputz	6,7
Gipsputz	10,1
Kalk-Gipsputz	9,5

Tab. 3 – Wasseraufnahmefähigkeit w und Wassergehalt bei freier Sättigung u_F verschiedener Putzarten nach Bednar [BED00]

	w [kg/m ² h ^{1/2}]	u_F [kg/m ³]
Gipsmörtel	18,0	260
Kalkmörtel / grober Sand	5,7	250
hydraul. Kalkmörtel / feiner Sand	5,2	210
hydraul. Kalkmörtel / grober Sand	4,0	250
Kalkzementmörtel / grober Sand	5,1	200
Kalkzementmörtel / feiner Sand	3,4	210

Für die Wasserdampfdurchlässigkeit gibt Otto [OTT95] an:

Tab. 4 – Wasserdampfdurchlässigkeit μ verschiedener Putzarten in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [OTT95]

	μ []			
	0 - 52 %	52 - 75 %	75 - 85 %	85 - 93 %
Zementputz	14,8	10,7	9,8	6,6
Kalk-Zementputz	11,5	6,6	3,7	3,2
Gipsputz	9,0	4,4	2,9	2,1
Kalk-Gipsputz	11,7	5,6	3,3	2,8

Besitzt der Außenputz eine zu große Wasseraufnahmefähigkeit, durchfeuchtet er bei Schlagregenbelastung. Ist andererseits der Putz zu dicht, kann zwar weniger Wasser aufgenommen werden, das trotzdem aufgenommene Wasser kann aber durch die große diffusionsäquivalente Luftschichtdicke nur mehr sehr langsam wieder abgegeben werden. Somit ist es nötig, beide Werte (Wasseraufnahmekoeffizient w und wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d) in einem bestimmten Bereich zu halten.

2.1.2. Anforderungen an Putze

Nach der deutschen Norm DIN 4108-3 [DIN01] werden Außenputze in drei Kriterienbereiche aufgeteilt:

- wassersaugend
 $w \geq 2,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$
- wasserhemmend
 $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2} < w < 2,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$
- wasserabweisend
 $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$
 $s_d \leq 2,0 \text{ m}$
w. $s_d \leq 0,2 \text{ kg/mh}^{1/2}$

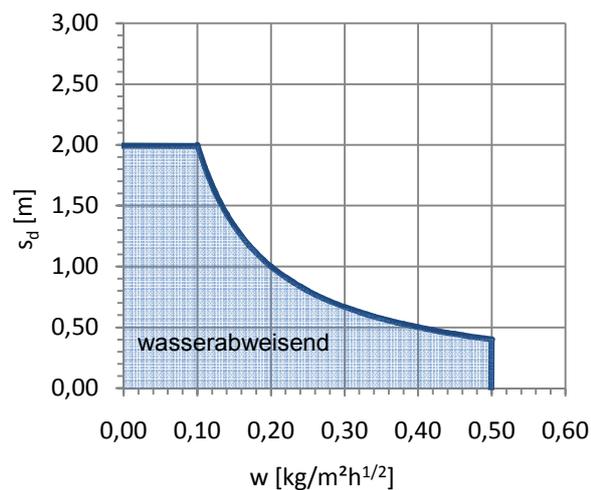


Abb. 1 – Darstellung der Anforderungen für wasserabweisende Außenputze gemäß DIN 4108-3 [DIN01]

Abhängig von der möglichen Schlagregenbeanspruchung der Fassade werden in der DIN 4108-3 [DIN01] drei Schlagregenbeanspruchungsgruppen unterschieden:

- Beanspruchungsgruppe I – geringe Schlagregenbeanspruchung für Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen unter 600 mm sowie für besonders windgeschützte Lagen auch in Gebieten mit größeren Niederschlagsmengen
- Beanspruchungsgruppe II – mittlere Schlagregenbeanspruchung für Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen von 600 mm bis 800 mm oder

für windgeschützte Lagen auch in Gebieten mit größeren Niederschlagsmengen sowie für Hochhäuser oder für Häuser in exponierter Lage in Gebieten, die aufgrund der regionalen Regen- und Windverhältnisse einer geringeren Schlagregenbeanspruchung zuzuordnen wären

- Beanspruchungsgruppe III – starke Schlagregenbeanspruchung für Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen über 800 mm oder für windreiche Gebiete auch mit geringeren Niederschlagsmengen (z.B. Küstengebiete, Mittel- und Hochgebirgslagen, Alpenvorland) sowie für Hochhäuser oder für Häuser in exponierter Lage in Gebieten, die aufgrund der regionalen Regen- und Windverhältnisse einer mittleren Schlagregenbeanspruchung zuzuordnen wären

Bei Beanspruchungsgruppe II müssen wasserhemmende Außenputze, bei Beanspruchungsgruppe III wasserabweisende Außenputze verwendet werden.

Diese Anforderungen in DIN 4108-3 [DIN01] wurden mit der Herausgabe der Norm im Jahr 1981 festgelegt. Darin waren erstmals in Deutschland Angaben über den Schlagregenschutz von Außenwänden enthalten [KÜN81]. Bereits 1976 wurden von Künzel Grenzwerte für die Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserdampfdiffusion von Außenputzen durch die Auswertung von Freilandversuchen in Holzkirchen festgelegt [KÜN76]. Er beschreibt, wie die Wasseraufnahmefähigkeit und der Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Außenputzes aufeinander abgestimmt werden müssen, denn je höher der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist, desto kleiner muss die Wasseraufnahmefähigkeit sein. Umgekehrt muss bei großer Wasseraufnahmefähigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstand sehr klein sein, damit das aufgenommene Wasser wieder nach außen abgegeben werden kann, bevor es weiter nach innen geleitet wird.

In Österreich gilt für Außenputze die ÖNORM EN 13914-1 [ONO05] mit den ergänzenden Bestimmungen der ÖNORM B 3346 [ONO06]. Hier wird festgelegt, welche Materialien zu verwenden sind (für Putzträger, Putze, Armierungen, usw.), welche Eigenschaften der Putzgrund aufweisen muss und wie mit besonderen Bedingungen umgegangen werden soll. Des Weiteren werden Planungsempfehlungen und Ausführungshinweise gegeben. In Bezug auf Schlagregen wird erwähnt, dass der Putz das Eindringen von Wasser zum Putzgrund verhindern und deshalb möglichst ohne Risse sein soll. Außerdem wird empfohlen, bei rauen Witterungsverhältnissen Putz der Klasse W2 (nach ÖNORM EN 998-1 [ONO10]) zu verwenden, bei

gemäßigtem Klima oder in vor der Witterung geschützten Bereichen kann Putz der Klasse W0 oder W1 verwendet werden.

In Bezug auf die Rissbreiten wird in der ÖNORM B 3346 [ONO06] festgelegt, dass einzelne Risse nicht breiter als 0,2 mm sein dürfen. Eine größere Anzahl oder eine Konzentration von Rissen ist zulässig, wenn die technologischen bzw. bauphysikalischen Eigenschaften des Putzes nicht beeinträchtigt werden [ONO06].

In der ÖNORM EN 998-1 [ONO10] werden Putze bzw. allgemein Mörtel nach der Druckfestigkeit, der Wasseraufnahmefähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit klassifiziert. Die höchste Klasse W2 legt eine Wasseraufnahme von $c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2\text{min}^{1/2}$ fest. Dies entspricht einem Wasseraufnahmekoeffizienten von $1,55 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$, was in die Klasse „wasserhemmend“ der deutschen Norm DIN 4108-3 [DIN01] fällt. Somit gelten für Deutschland deutlich strengere Anforderungen als die der ÖNORM EN 998-1 [ONO10].

Eigenschaften	Kategorien	Werte
Druckfestigkeit nach 28 Tagen	CS I	0,4 bis 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 bis 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 bis 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Kapillare Wasseraufnahme	W 0	Nicht festgelegt
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \times \text{min}^{0,5}$
	W 2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \times \text{min}^{0,5}$
Wärmeleitfähigkeit	T 1	≤ 0,1 W/m×K
	T 2	≤ 0,2 W/m×K

Abb. 2 – Klassifizierung von Mörtel nach der ÖNORM EN 998-1 [ONO10]

Auch in Österreich werden in der ÖNORM B 3340 [ONO99] andere Anforderungen an die Wasseraufnahme als in ÖNORM EN 998-1 [ONO10] festgelegt.

Klasse	Biegezugfestigkeit N/mm ²	Druckfestigkeitsbereich N/mm ²
PM 1	-	0,4 - 1,5
PM 2	≥ 0,4	1,5 - 3,5
PM 3	≥ 0,6	2,0 - 5,0
PM 4	≥ 1,5	≥ 5,0
	Kapillare Wasseraufnahme w_{24} kg/(m ² ·h ^{0,5})	
W 1	1,0	
W 2	2,0	
W 3	keine Anforderung	
	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m·K)	
WD 1	< 0,10	
WD 2	< 0,20	

Abb. 3 – Klassifizierung von Putzmörtel nach der ÖNORM B 3340 [ONO99]

2.1.3. Prüfung von Außenputzen

Um die Qualität von Außenputzen feststellen zu können, können messtechnische Untersuchungen durchgeführt werden. Mit unterschiedlichen Methoden können die Druck- und Biegezugfestigkeit des Putzes, die Wasseraufnahmefähigkeit, der Wasserdampfdiffusionswiderstand und die Rohdichte gemessen werden.

2.1.3.1. Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit kann einerseits vor Ort, andererseits mittels einer Putzprobe im Labor geprüft werden. Bei der Prüfung vor Ort wird ein Karstenschieses Prüfröhrchen mit einer abdichtenden Masse auf den Putz aufgesetzt und mit Wasser gefüllt. Mit einer Skala am Röhrchen und einer Stoppuhr kann das aufgenommene Wasser nach der Zeit gemessen und somit auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Putzes geschlossen werden. Diese Prüfung ist gut geeignet, um lokale Fehlstellen wie etwa Risse und Verwitterungen zu bewerten [KÜN94].

Eine rasche Abschätzung der Saugfähigkeit von Außenputzen kann durch Aufbringen einer kleinen Wassermenge mit einer Pipette getroffen werden [KÜN94]. Je nach Form der entstehenden Oberflächenbefeuchtung wird der Putz in die Kategorien „stark saugend“, „schwach saugend“ und „wasserabweisend“ eingestuft. Bei stark saugendem Putz entsteht eine fast kreisförmige bis ovale Oberflächenbefeuchtung. Bei schwach saugendem Putz stellt sich die Befeuchtung als extreme umgekehrte

Tropfenform dar. Bei wasserabweisendem Putz ist die Oberflächenbefeuchtung nur ein dünner Strich.

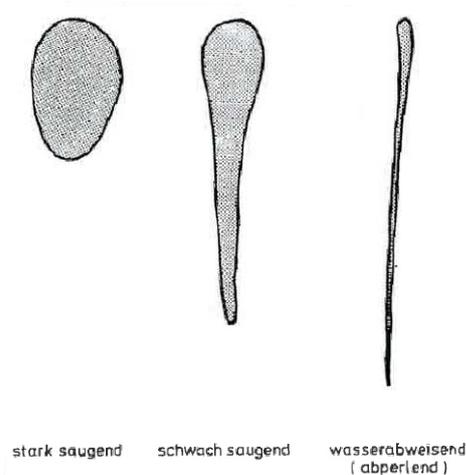


Abb. 4 – Beurteilung der Saugfähigkeit von Putzen nach der Form des aufgetragenen Tropfens [KÜN94]

Ist es möglich, einen Prüfkörper zu entnehmen, kann die Wasseraufnahmefähigkeit des Putzes im Labor durch teilweises Eintauchen in Wasser ohne Temperaturgradienten nach ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] bestimmt werden. Dazu wird der Prüfkörper an den Seiten mit wasserundurchlässiger Dichtmasse abgedichtet und mit der Ansichtsfläche $5 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ins Wasser getaucht, sodass die gesamte Ansichtsfläche von Wasser berührt wird. Nach bestimmten Zeitabständen wird der Prüfkörper aus dem Wasser genommen, das überschüssige Wasser abgetupft und der Prüfkörper gewogen. Eine genaue Beschreibung des Prüfvorgangs wurde in Kapitel 4.1. vorgenommen.

2.1.3.2. Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl kann nur durch Entnahme eines Prüfkörpers und durch Prüfung im Labor festgestellt werden.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird gemäß ÖNORM EN 1015-19 [ONO05a] bestimmt. Die runden Putzproben werden in einen runden Prüfbehälter eingesetzt und an den Rändern luftdicht verschlossen. Im Behälter unter den Putzproben wird mittels geeigneter Salzlösungen ein bestimmter Wasserdampfdruck

eingestellt. Während der Lagerung bei konstantem Klima wird die Gewichtsabnahme oder –zunahme in regelmäßigen Zeitabständen gemessen.

Bei mineralischen Außenputzen ist der Wasserdampfdiffusionswiderstand stark von der Rohdichte abhängig, wodurch dieser grob abgeschätzt werden kann [KÜN94]. Bei Kunstharzputzen ist dies nicht möglich.

2.1.3.3. Bestimmung der Trockenrohichte

Zur Bestimmung der Trockenrohichte des Putzes [ONO07a] werden Prüfkörper, meist prismatische Prüfkörper, hergestellt und im Wärmeschrank bei 100 ± 5 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Dann werden die Prüfkörper gewogen und die Masse durch das Volumen geteilt.

2.1.3.4. Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit

Gemäß ÖNORM EN 1015-11 [ONO07b] wird die Biegezugfestigkeit von Putzmörteln geprüft, indem die zuvor hergestellten und ausgehärteten Prismen durch eine Dreipunktbelastung bis zum Bruch beansprucht werden. Dazu werden sie in eine Prüfeinrichtung mit zwei Auflagerrollen unten und einer dritten mittig darüber eingespannt und der Druck gleichmäßig erhöht bis das Mörtelprisma in zwei Teile bricht.

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit werden die beiden Prismenhälften mit steigendem Druck belastet, bis der Bruch eintritt [ONO07b].

2.2. Hygrothermische Vorgänge in Außenwänden

Die hygrothermischen Vorgänge in Bauteilen setzen sich aus verschiedenen Vorgängen zusammen, die jedoch in einer komplexen Wechselwirkung zueinander stehen. Die Prozesse im Baustoff werden durch Einflüsse von der Umgebung – von Wind, Regen, Temperatur, Luftfeuchte und solarer Bestrahlung – ausgelöst. Dazu kommen noch die Feuchte- und Wärmeübergänge zwischen den Schichten. Bei der hygrothermischen Betrachtung von Bauteilen werden Feuchtetransportmechanismen sowie der Wärmetransport in Zusammenhang gestellt.

In Tab. 5 sind die laut Künzel in der Praxis vorkommenden Wärme- und Feuchtetransportmechanismen zusammengestellt [KÜN94a].

Tab. 5 – Wärme- und Feuchtetransportmechanismen [KÜN94a]

Wärmetransport	Wärmeleitung
	Wärmestrahlung
	Luftströmung
	Enthalpieströme durch Feuchtebewegung
Dampftransport	Gasdiffusion
	Molekulartransport (Effusion)
	Lösungsdiffusion
	Konvektion
Flüssigtransport	Kapillarleitung
	Oberflächendiffusion
	Sickerströmung
	hydraulische Strömung
	Elektrokinese
	Osmose

2.2.1. Feuchtetransport

Gemäß ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] werden drei Fälle von Feuchtetransport unterschieden:

- Bei sehr geringer Luftfeuchte erfolgt der Feuchtetransport nur durch Wasserdampfdiffusion.
- Bei einer relativen Luftfeuchte bis etwa 95 % liegen im Baustoff sowohl wasserdampfgefüllte als auch wassergefüllte Poren vor. Somit treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf.

- Bei einer relativen Luftfeuchte von über 95 % (abhängig vom Baustoff) erfolgt der gesamte Feuchtetransport in der Flüssigphase. Dies liegt vor, wenn der Baustoff durch Schlagregen belastet wird bzw. bei Eintauchen in Wasser wie es bei der Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] der Fall ist.

Wie von Künzel [KÜN94a] beschrieben, wird ein Stoff als trocken bezeichnet, wenn er kein oder nur chemisch gebundenes Wasser enthält. Die Trockenrohichte wird somit dadurch bestimmt, indem der Stoff bis zur Massenkonstanz getrocknet und dann gewogen wird. Das chemisch gebundene Wasser, welches in die Struktur des Stoffs eingebunden ist, kann durch starkes Erhitzen verdampft werden.

Wird ein trockener hygroskopischer Stoff einer bestimmten relativen Luftfeuchte ausgesetzt, so nimmt dieser so lange Wasser auf, bis der Ausgleichsfeuchtegehalt bei der bestimmten relativen Luftfeuchte erreicht wird.

Im Sorptionsfeuchtebereich bis 95% relativer Luftfeuchte treten sowohl Wasserdampfdiffusion als auch Flüssigtransport auf. Das Verhalten von Baustoffen in diesem Bereich kann mit Sorptionsisothermen dargestellt werden. Ein Beispiel für eine Sorptionsisotherme ist in Abb. 5 für hydraulischen Kalkputz dargestellt.

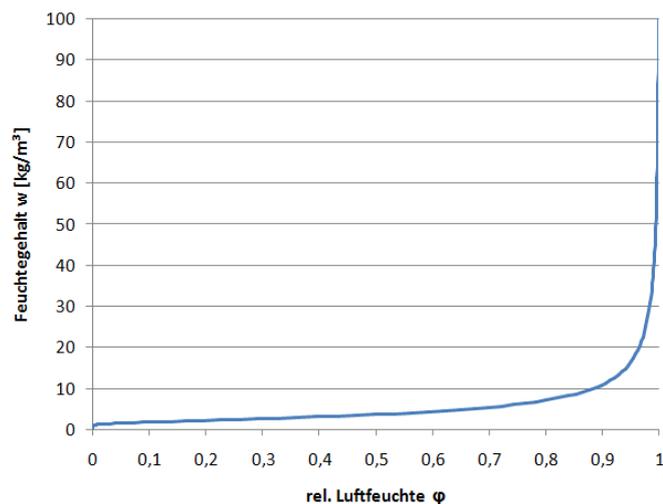


Abb. 5 – Sorptionsisotherme für hydraulischen Kalkputz

Aus den Sorptionsisothermen ist der Ausgleichsfeuchtegehalt bei den verschiedenen relativen Luftfeuchten herauszulesen. Grundsätzlich gibt es eine Sorptionsisotherme für die Desorption (Wasserabgabe an die Umgebungsluft) und für die Absorption (Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft). Gemäß Künzel [KÜN94a] ist die Hysterese zwischen diesen beiden Kurven bei Baustoffen jedoch meist so gering, dass die Kenntnis der Sorptionsisotherme für hygrothermische Bauteilsimulationen ausreichend ist.

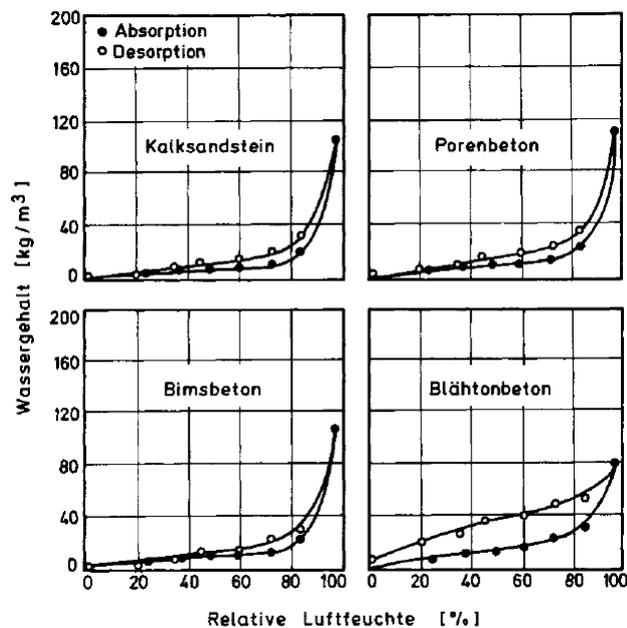


Abb. 6 – Absorptions- und Desorptionsisothermen von vier häufig verwendeten Baustoffen [KÜN82]

Für die Darstellung von Sorptionsisothermen gibt es in der Literatur unterschiedlichste Ansätze. Holm, Krus und Künzel [HOL02] haben für die Approximation von Feuchtespeicherfunktionen folgende Formel entwickelt. Hier wird die komplette Feuchtespeicherfunktion als Funktion der Saugspannung s aufgetragen.

$$w(s) = \frac{u_F}{1 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^p}$$

Die Kelvin-Formel, benannt nach Lord Kelvin,

$$\varphi = e^{-\frac{s}{\rho_{H_2O} \cdot R_{H_2O} \cdot T}}$$

lässt sich wie folgt umformen, womit die Saugspannung s aus der relativen Luftfeuchte, der spezifischen Gaskonstante von Wasserdampf und der Temperatur berechnet werden kann.

$$s = -\ln \varphi \cdot \rho_{H_2O} \cdot R_{H_2O} \cdot T$$

- $w(s)$... Feuchtegehalt [kg/m^3]
- u_F ... freie Wasseraufnahme [kg/m^3]
- s ... Saugspannung [Pa]
- s_0 ... frei wählbarer Parameter
- p ... frei wählbarer Parameter
- φ ... relative Luftfeuchte []
- ρ_{H_2O} ... Dichte von Wasser [kg/m^3]
- R_{H_2O} ... spezifische Gaskonstante für Dampf [J/kgK]
- T ... absolute Temperatur [K]

Für die Approximation der Sorptionsisotherme werden damit nur der Feuchtegehalt bei freier Sättigung und der Feuchtegehalt bei mindestens zwei relativen Luftfeuchten benötigt. Dann können die beiden frei wählbaren Parameter so variiert werden, dass die Sorptionsisotherme mit den Stützstellen übereinstimmt.

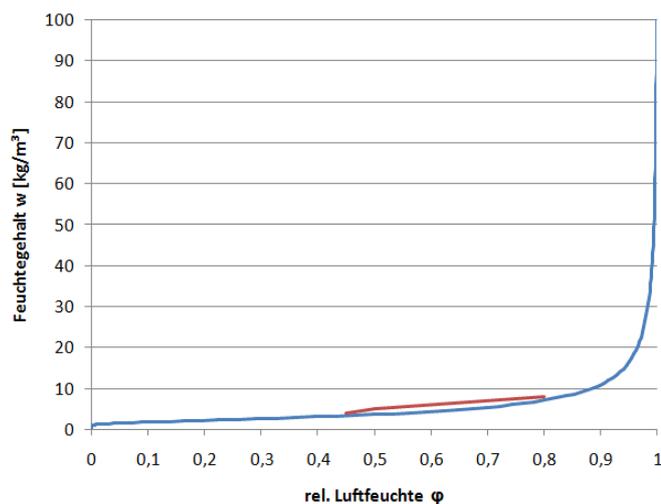


Abb. 7 – lineare Verbindung von drei Stützstellen (rot) und die daraus approximierte Sorptionsisotherme für hydraulischen Kalkputz (blau)

In Abb. 8 werden Sorptionsisothermen für verschiedene Materialien dargestellt.

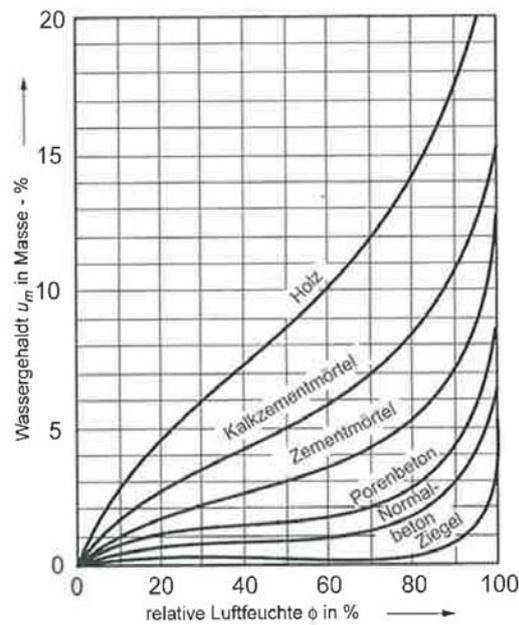


Abb. 8 – Sorptionsisothermen für unterschiedliche Baustoffe [LUT02]

Gelangt ein kapillaraktiver Baustoff in Kontakt mit Wasser, so saugt er Wasser bis zur freien Wassersättigung u_F auf [KÜN94a]. Die maximale Wassersättigung u_{max} kann nur durch Diffusion im Temperaturgefälle oder durch Saugen unter Druck erreicht werden [KÜN94a].

Der Bereich zwischen 95% relativer Luftfeuchte und der freien Wassersättigung wird als Kapillarwasserbereich bezeichnet und durch die Porenradienverteilung oder die Saugspannung beschrieben [KÜN94a].

2.2.2. Konvektion feuchter Luft in Hohlräumen

Durch Bauteile mit Hohlräumen beziehungsweise Undichtigkeiten kann infolge von Luftdruckunterschieden zwischen innen und außen feuchte Luft strömen. Dies kann durch große Poren als auch durch Leitungsschächte geschehen.

Für die Berechnungen im Zuge dieser Arbeit wird die Konvektion durch Hohlräume jedoch nicht betrachtet.

2.2.3. Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit

Der Feuchtegehalt von Baustoffen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Da Wasser eine bessere Wärmeleitfähigkeit hat als stehende Luft, wird durch einen hohen Wassergehalt im Baustoff die Wärmeleitfähigkeit erhöht.

So hat z.B. Holz mit einer Dichte von 500 kg/m^3 und einem Feuchtegehalt von 15 Gewichts-% eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda \approx 0,15 \text{ W/mK}$ und das gleiche Holz mit einem Feuchtegehalt von 30 Gewichts-% eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda \approx 0,18 \text{ W/mK}$ [LUT02].

Die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit wird nach Künzel [KÜN94a] berechnet mit folgender Beziehung:

$$\lambda(w) = \lambda_0 \left(1 + b \cdot \frac{w}{\rho_s} \right)$$

- $\lambda(w)$... Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs [W/mK]
- λ_0 ... Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffs [W/mK]
- ρ_s ... Rohdichte des trockenen Baustoffs [kg/m^3]
- b ... Wärmeleitfähigkeitszuschlag [%/M.-%]
- w ... Feuchtegehalt [kg/m^3]

Der Wärmeleitfähigkeitszuschlag b gibt somit an, um wieviel Prozent die Wärmeleitfähigkeit je Masseprozent Feuchte ansteigt [KÜN94a]. Dieser Zuschlag ist gemäß Cammerer und Achtziger [CAM85] für Holz $\approx 1,5$ und für expandiertes Polystyrol $\approx 0,05$.

2.2.4. Feuchte- und Wärmeübergänge an Bauteilgrenzen

An den Grenzen des Baustoffs können Wärme und Feuchte aus der Umgebung aufgenommen oder in die Umgebung abgegeben werden. Der Wärmeübergang wird mit Hilfe eines Wärmeübergangskoeffizienten α , der sich in einen konvektiven und einen strahlungsbedingten Anteil aufgliedert, berechnet [KÜN94a, LUT02].

$$q = \alpha(\vartheta_u - \vartheta_o)$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s$$

- q ... Wärmestromdichte [W/m²]
α ... Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]
α_k ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]
α_s ... strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]
ϑ_u ... Umgebungstemperatur [°C]
ϑ_o ... Oberflächentemperatur [°C]

Ähnlich dem Wärmeübergang wird der Feuchteübergang mit Hilfe des Feuchteübergangskoeffizienten β berechnet [KÜN94a].

$$g_v = \beta_p(p_u - p_o)$$

- g_v ... Wasserdampfstromdichte [kg/m²s]
β_p ... Wasserdampfübergangskoeffizient [kg/m²sPa]
p_o ... Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche [Pa]
p_u ... Wasserdampfpartialdruck der Umgebung [Pa]

2.3. Schlagregen

2.3.1. Allgemeines

Schlagregenbelastung von Fassaden entsteht durch Regen und gleichzeitige Windanströmung der Fassade [DIN01]. Durch die Wasseraufnahmefähigkeit des Putzes oder durch den Staudruck kann das Regenwasser in den Putz eindringen. Ein Teil des Wassers kann über die Diffusionsfähigkeit des Außenputzes wieder abtrocknen, der Rest wird im Putz gespeichert oder im Mauerwerk weiter nach innen transportiert.

Die möglichen Wege des Wassers nach Auftreffen des Schlagregens auf eine Wand sind in der folgenden Zeichnung dargestellt. Laut Künzel [KÜN94a] (nach [KÜN06]) spritzen etwa 30 % des auftreffenden Wassers sofort wieder weg. Der Rest läuft entweder ab, wird vom Putz und dem dahinterliegenden Material aufgenommen oder haftet an der Oberfläche. Von dort wird es entweder später von der Mauer aufgenommen oder es trocknet.

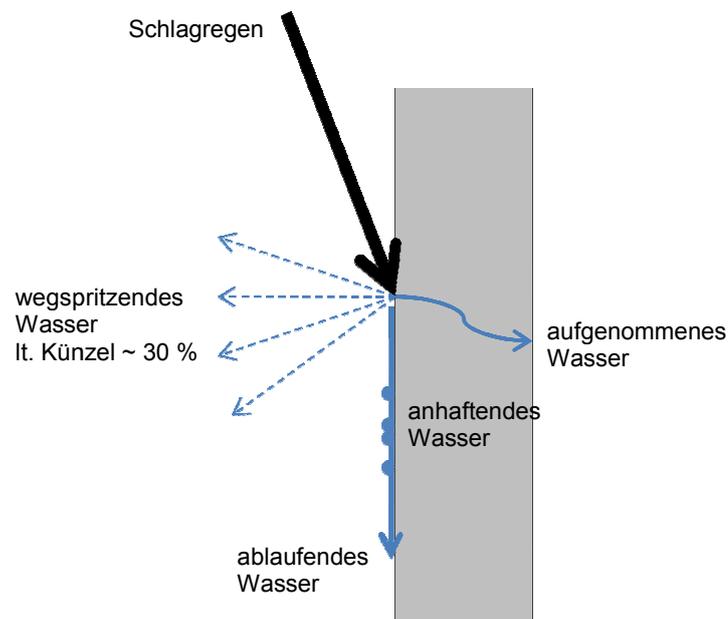


Abb. 9 – Schlagregen trifft Bauteil

2.3.2. Messung des Schlagregens

Seit etwa 200 Jahren werden verschiedenste Messeinrichtungen zur Quantifizierung des Schlagregens entwickelt. Grundsätzlich können diese wie folgt eingeteilt werden [vgl. BLO04].

- freistehende Messstellen
 - sich in Windrichtung drehende Messstellen
 - fixe Messstellen
- an Fassaden montierte Messstellen

Bei den freistehenden Messstellen, welche sich immer in die Richtung aus der der Wind kommt drehen, kann nur die Gesamtschlagregenmenge aus allen Himmelsrichtungen gemessen werden, wodurch sich nicht quantifizieren lässt, wieviel Schlagregen auf welche Fassadenseite aufgetroffen wäre. Diese Messeinrichtungen sind somit nur bedingt für bautechnische Zwecke geeignet.

Fixe, freistehende Messstellen eignen sich hier viel besser. Meist wird die Schlagregenmenge aus mehreren Richtungen gemessen, wodurch die genaue Schlagregenmenge bekannt ist, die auf eine bestimmte Fassadenebene treffen könnte. Die Schwierigkeit bei der Berechnung der Schlagregenmenge auf eine Fassade besteht nun darin, den Einfluss von Windturbulenzen durch das Gebäude selbst, von Behinderungen des Windstroms durch Bäume bzw. andere Gebäude und von (teilweisen) Überdachungen festzustellen.

Um den Einfluss von Windturbulenzen und vom Regenschutz empirisch ermitteln zu können, wurden direkt an Fassaden montierte Messstellen entwickelt. Zwei Einbauarten werden unterschieden [BLO04]:

- auf der Fassade montierte Messstellen
- in die Wand versenkte Messstellen

Bei auf der Fassade montierten Messstellen verursacht die Messstelle selbst zusätzlich Windturbulenzen, wodurch das Messergebnis verfälscht werden kann. Dies gilt jedoch laut Abuku [ABU09] nur für schräge Windanströmung. Bei einer Anströmung im ungefähren rechten Winkel zur Fassade ist dieser Fehler vernachlässigbar.

2.3.2.1. Schlagregennmessungen an der K.U. Leuven, Belgien

Die Messanlage der K.U. Leuven, Belgien besteht aus zwei Schlagregennmessstellen, vier Öffnungen zum Montieren von unterschiedlichen Baustoffen und Temperatursensoren zum Messen der Temperatur auf der Vorder- und Rückseite der Baustoffe. Das Gewicht der getesteten Baustoffe wird kontinuierlich aufgezeichnet. Um zu vermeiden, dass durch den Wind der Baustoff zu schwingen beginnt und damit die Messergebnisse verfälscht werden, befindet sich hinter der Platte eine Rolle, mit der die horizontalen Bewegungen abgefangen, die vertikalen Bewegungen jedoch nicht behindert werden [ABU09].

In Abb. 10 ist die Messanlage der K.U. Leuven schematisch dargestellt.

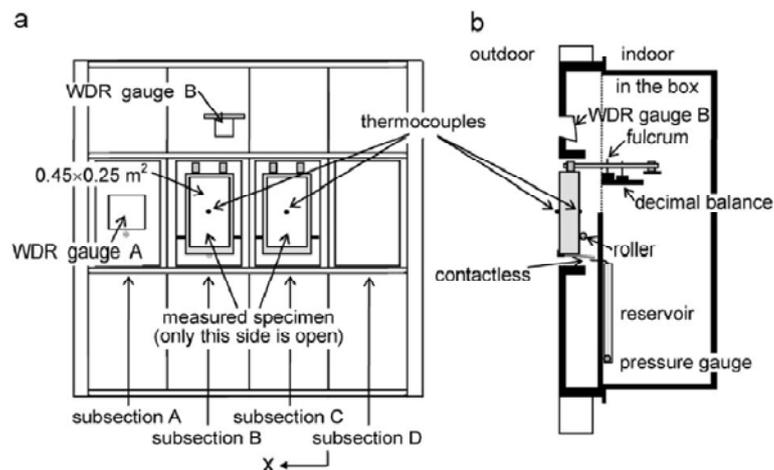


Abb. 10 – Schematische Darstellung der Messanlage der K.U. Leuven, Belgien, (a) Ansicht, (b) Schnitt [ABU09]

Am gleichen Gebäude, an der sich die Schlagregennmessstelle befindet, sind weiters noch ein 10 m hoher Mast für die Aufzeichnung von meteorologischen Daten und eine Messstelle für Normalregen montiert.

2.3.2.2. Schlagregelmessungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Deutschland

Bereits seit Anfang der 50er-Jahre werden in der Freilandversuchsstelle in Holzkirchen Wetteraufzeichnungen durchgeführt. Gemessen werden die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, der Normalregen, die solare Strahlung, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, der Luftdruck, die Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen und die Oberflächentemperatur auf schwarzen und weißen Oberflächen [FRA09].

Der Schlagregen wird mittels einer Öffnung in einer nach Westen orientierten Wand gesammelt, in einen Trichter geleitet und automatisch gemessen. Damit kann die Normalregenmenge mit der Schlagregenmenge verglichen werden.



Abb. 11 – Schlagregelmessanlage des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen

Um die Wasseraufnahme- und Trocknungsfähigkeit von Putzoberflächen messen zu können, wurden Putzproben an der gleichen Fassadenseite wie die Schlagregelmessanlage angebracht. Die Proben werden ständig gewogen, wodurch der Wassergehalt errechnet werden kann.

Aus diesen Messungen entstand in den 80er Jahren die Einteilung von Außenfassaden in die Schlagregenbeanspruchungsgruppen I bis III in der DIN 4108 Teil 3 [DIN01].



Abb. 12 – Schlagregennessanlage für Außenputze des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen

2.3.3. Berechnung des Schlagregens

Die Quantifizierung von Schlagregen kann auf drei verschiedene Arten, nämlich durch Messungen, durch semi-empirische Modelle und durch numerische Simulationen, erfolgen [BLO10]. Schlagregennessungen wurden bereits in 2.3.2. beschrieben. Mit numerischer Strömungsmechanik (CFD) ist es möglich, strömungsmechanische Probleme mit numerischen Methoden approximativ zu lösen [WIK10]. Dazu werden Modellgleichungen wie etwa Navier-Stokes-Gleichungen oder Potentialgleichungen benutzt.

Bei semi-empirischen Modellen wird die Schlagregenmenge mit theoretischen Modellen und Koeffizienten, die aus Messungen gewonnen wurden, berechnet. Diese Methode ist im Gegensatz zu Messungen und zu numerischen Simulationen weniger zeitaufwändig. Zudem ist zur Durchführung von numerischen Simulationen viel mathematisches und strömungsmechanisches Wissen nötig.

Alle zur Zeit gebräuchlichen semi-empirischen Methoden basieren auf der „WDR relationship“ und diese basiert wiederum auf der folgenden Formel [BLO10]:

$$R_{wdr} = R_h \frac{U}{V_t}$$

R_{wdr} ... Schlagregenmenge durch eine imaginäre vertikale Fläche [mm]

R_h ... Normalregenmenge [mm]

- U ... Windgeschwindigkeit [m/s]
 V_t ... Geschwindigkeit des Regentropfens im Fall [m/s]

Dabei wird jedoch angenommen, dass alle Regentropfen dieselbe Größe haben und dass die Windströmung gleichmäßig und horizontal ist. Auch die Richtung des Windes wird als lotrecht zur betrachteten Fassadenfläche angenommen. Die obige Formel kann als Formel für das „freie Feld“ verwendet werden, da etwa Windverwirbelungen und eine schräge Anströmung der betrachteten Fläche nicht berücksichtigt werden [BLO10].

Durch Weiterentwicklungen der „WDR relationship“ und Anpassungen an die wirklichen Verhältnisse an der Fassade wurden der Fassadenfaktor α und die Cosinus-Projektions-Methode eingeführt [BLO10]. Mit dem Faktor $\cos \theta$ wird die mögliche nicht lotrechte Anströmung der Fassade berücksichtigt. Es wird damit nur der lotrecht zur Fassade auftreffende Windanteil für die Berechnung verwendet.

$$R_{wdr} = \alpha \cdot U \cdot R_h \cdot \cos \theta$$

- R_{wdr} ... Schlagregenmenge [mm]
 α ... Fassadenfaktor [s/m]
 U ... Windgeschwindigkeit [m/s]
 R_h ... Normalregenmenge [mm]
 θ ... Winkel zwischen der Normalen auf die Wand und der Windrichtung []
 (bei einer Abweichung von mehr als 90° zur Normalen auf die Wand gleich Null)

Das erste Normverfahren zur Berechnung des auf eine Fassade auftreffenden Schlagregens wurde in Großbritannien entwickelt und in der Norm BS 8104 [BRI92] dargestellt. Es basiert auf der „WDR relationship“ und beruht auf Langzeitmessungen von Normalregen, Wind und Schlagregen von 20 Hauptstationen und 32 Nebenstationen.

Für alle Stationen wurden der jährliche Windfeldindex und der Periodenindex an Wänden mit unterschiedlichen Ausrichtungen (in Schritten von 30°) berechnet. Die Ergebnisse wurden auf einer Schlagregenkarte dargestellt und mithilfe von 6500 weiteren Wetterstationen zwischen den 20 Haupt- und 32 Nebenstationen interpoliert.

In der ÖNORM EN 15927-3 [ONO09] wurde ein Verfahren zur Berechnung der Schlagregenbelastung auf Fassaden aus stündlichen Normalregen- und Winddaten vorgestellt, das auf dem britischen System beruht. Es wird sowohl die Schlagregenbelastung im Jahresdurchschnitt als auch bei kurzzeitigen Regenperioden berechnet.

Ein zweites in der oben genannten Norm vorgestelltes Verfahren ermöglicht die Berechnung der Schlagregenbelastung, wenn keine Wetterdaten vorhanden sind. Aus dem aktuellen Wettercode für Regen und der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit kann die Zeit berechnet werden, in der das Mauerwerk durchfeuchtet wird und die mit 10 %iger Wahrscheinlichkeit innerhalb eines Jahres überschritten wird (mittlere Wiederkehrdauer von 10 Jahren).

Genauer wird hier jedoch nur auf das erste beschriebene Verfahren in ÖNORM EN 15927-3 [ONO09] eingegangen.

Aus stündlichen Wind- und Normalregendaten kann ein jährlicher Windfeldindex I_A errechnet werden, wenn diese Daten aus einer Zeitspanne von mindestens 10 Jahren vorliegen:

$$I_A = \frac{2}{9} \frac{\sum v \cdot r^{8/9} \cdot \cos(D - \theta)}{N}$$

Der Windfeld-Periodenindex kann wie folgt berechnet werden, wenn Daten über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren vorhanden sind:

$$I'_S = \frac{2}{9} \sum v \cdot r^{8/9} \cdot \cos(D - \theta)$$

Das Y_3 -Perzentil legt den Periodenindex I_S fest, was den Maximalwert von I'_S , der wahrscheinlich einmal in drei Jahren auftritt, darstellt.

$$Y_3 = 100 \frac{N}{3}$$

- v ... Stundenmittel der Windgeschwindigkeit [m/s]
- r ... stündliche Gesamtniederschlagsmenge [mm]
- D ... Stundenmittel der Windrichtung, Bezugsrichtung Norden [°]
- θ ... Winkel zwischen Norden und der Wandnormalen [°]
- N ... Anzahl der Jahre mit verfügbaren Daten

Die Summenbildung erfolgt über alle Stunden, in denen die Wand vom Wind belastet ist, also $\cos(D - \Theta)$ positiv ist.

Die berechneten Windfeldindizes stellen nun die maximal mögliche Schlagregenbelastung auf eine vertikale Fläche dar. Um die tatsächliche Schlagregenbelastung auf die betrachtete Fassade zu erhalten, müssen die umliegende Topographie, Hindernisse und die Form und Lage der Fassade betrachtet und die Windfeldindizes korrigiert werden.

$$I_{WA} = I_A \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W$$

$$I_{WS} = I_S \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W$$

I_{WA}	... jährlicher Wandindex [l/m^2a]
I_{WS}	... Wandperiodenindex [l/m^2]
C_R	... Geländeerhöhungsfaktor []
C_T	... Topographiefaktor []
O	... Hindernisfaktor []
W	... Wandfaktor []

Die Ergebnisse der EN 15927-3 sind gemäß Blocken und Carmeliet [BLO10] vergleichbar mit den Ergebnissen der Berechnung mit der „WDR relationship“. Mit der Europäischen Norm können somit nicht nur die durchschnittlichen Schlagregensmengen über ein ganzes Jahr und die stärksten Schlagregenereignisse in drei Jahren sondern auch die minütlichen bzw. 10-minütlichen Normalregendaten in Schlagregendaten für hygrothermische Simulationen umgerechnet werden.

2.4. Schimmelbildung an der inneren Wandoberfläche

2.4.1. Grundlagen

Schimmelpilze sind eigentlich für den Menschen und die Umwelt nützlich, da sie abgestorbene Pflanzen und biologische Abfälle zersetzen und in den Nährstoffkreislauf zurückführen.

Treten Schimmelpilze aber in Innenräumen auf, kann es zur Gesundheitsgefährdung der Gebäudenutzer durch Mykosen (Pilzwachstum am oder im Menschen), Mykotoxikosen (Vergiftung durch Pilz-Toxine) und mykogene Allergien kommen [SED01].

Schimmelpilze benötigen spezielle Umgebungsbedingungen, um wachsen und überleben zu können. Zum einen muss die Temperatur der Oberfläche in einem bestimmten (für jeden Pilz anderen) Bereich liegen und zum anderen müssen die Feuchteverhältnisse an der Oberfläche stimmen. Wenn dann des Weiteren genügend Nährstoffe für den Schimmelpilz vorhanden sind und der pH-Wert der Oberfläche in einem gewissen Bereich liegt, sind gute Bedingungen für Schimmelkeimung und -wachstum gegeben.

Gemäß ÖNORM B 8110-2 Beiblatt 4 [ONO03a] wird zwischen Schimmelpilzen in drei Gefährdungsklassen unterschieden. Mit der Einteilung in Gefährdungsklassen kann der Schimmelpilz mit seiner gesundheitsgefährdenden Wirkung eingestuft werden. Schimmelpilze der drei Gefährdungsklassen können, sofern genügend Nährstoffe vorhanden sind, unter folgenden Bedingungen wachsen [SED01]:

- Gefährdungsklasse A (erheblich gesundheitsgefährdend)
z.B. *Aspergillus penicillioides*, *Aspergillus versicolor*
 - 5 °C bis 50 °C
 - 74 % bis 96 % relative Luftfeuchtigkeit
 - pH = 2 bis 10

- Gefährdungsklasse B (bei längerer Exposition im Raum gesundheitsgefährdend)
z.B. *Aspergillus restrictus*, *Penicillium* sp.
 - 3 °C bis 50 °C
 - 70 % bis 94 % relative Luftfeuchtigkeit
 - pH = 2 bis 11

- Gefährdungsklasse C (nicht gesundheitsgefährdend)
 - 2 °C bis 33 °C
 - 70 % bis 95 % relative Luftfeuchtigkeit
 - pH = 2 bis 10

Schimmelpilzkulturen können somit bei Temperaturen zwischen etwa 0 °C und 50 °C gedeihen. Dies bedeutet, dass bei allen in normalen Innenräumen (Wohnungen, Büros, etc.) vorkommenden Temperaturen das Wachstum von Schimmel möglich ist.

Den Haupteinfluss auf das Schimmelwachstum hat die relative Feuchtigkeit der umliegenden Luft sowie des Baustoffs. Die meisten Schimmelpilzkulturen können erst ab einer bestimmten Feuchtigkeit (etwa 70 % relative Feuchtigkeit) keimen und wachsen.

Gemäß Sedlbauer [SED01] wird der Feuchtegehalt in der Luft oder an der Oberfläche eines Baustoffes häufig als „Wasseraktivwert“ a_w dargestellt. Der Wasseraktivwert eines Schimmelpilzes gibt somit an, unter welchen Feuchtebedingungen Sporenkeimung und Myzelwachstum stattfinden können.

$$a_w = \frac{\varphi}{100}$$

a_w ... Wasseraktivwert

φ ... relative Feuchte [%]

Die Temperatur und die relative Feuchte stehen jedoch in engem Zusammenhang, wenn es darum geht, ob und wie schnell Schimmel wachsen kann. Dieser Zusammenhang wird in den sogenannten „Isoplethen“ (Linien gleichen Wachstums) abgebildet. Je näher Temperatur und relative Feuchte beim Optimum liegen, desto besser kann der Schimmel wachsen.

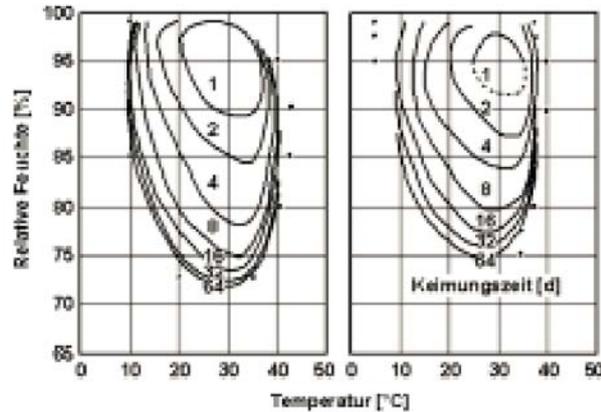


Abb. 13 – Isoplethendiagramm für Sporenauskeimung der Schimmelpilze *Aspergillus restrictus* (links) und *Aspergillus versicolor* (rechts) [SMI82]

2.4.2. Gründe für Schimmelbildung in Innenräumen

Mögliche Gründe für Schimmelwachstum in Innenräumen sind [vgl. auch SED02]:

- Wärmebrücken
- unzureichendes Dämmniveau
- unzureichende Luftzirkulation an der Bauteiloberfläche
- unzureichende Beheizung
- erhöhte Feuchteproduktion im Innenraum
- falsches Lüftungsverhalten der Nutzer
- Durchfeuchtung der Wand z.B. durch Schlagregen und aufsteigende Feuchte
- Baufeuchte

Einen großen Beitrag am Konstruktionsversagen von Bauteilen können das fehlerhafte Lüftungsverhalten und die unzureichende Belüftung der Innenoberflächen haben. Tritt Feuchte durch Schlagregen von außen in die Mauer ein, so wird diese unter anderem nach innen abgegeben. Dadurch kann sich der Feuchtegehalt der Raumluft erhöhen. Wird zudem noch falsch gelüftet und/oder geheizt oder befinden sich Möbel direkt vor der Außenwand, erhöht sich das Risiko von Kondensat- und Schimmelbildung an Innenoberflächen weiter.

Somit wird die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen hauptsächlich vom Feuchtegehalt aus zwei Quellen bestimmt [ONO03a]:

- baubedingte Feuchtigkeit
- wohnbedingte Feuchtigkeit

Diese treten oft einzeln, meist aber in Überlagerung auf.

In der ÖNORM B 8110-2 Beiblatt 4 [ONO03a] wird davon ausgegangen, dass es bei einer absoluten Luftfeuchte im Raum von größer als 8 g/m^3 zu verstärkter Geruchsbildung, zu Kondensatbildung an kalten und/oder von der Luftbewegung abgeschirmten inneren Oberflächen von Außenbauteilen und zu Schimmelbildung kommen kann.

Somit ist es nötig, dass die Raumlufffeuchte – vor allem im Winter – von den Nutzern bewusst kontrolliert wird. Dies kann mit Hilfe von Thermohygrometern sowie durch Beobachten der Kondensatbildung am Fensterglas geschehen. Da bei neueren Fenstern das Glas einen U-Wert von $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ hat, kann somit bei erhöhter Raumlufffeuchte im Glasrandverbund Kondensat auftreten. Erhöht sich die Breite des Kondensatstreifens am Glas bei kalten Außentemperaturen auf über 0,5 bis 1,0 cm (je nach Qualität der Verglasung und der Innen- und Außentemperatur) deutet dies darauf hin, dass die erhöhte Raumlufffeuchte durch Lüften abgeführt werden muss, um Kondensat und Schimmel auf Bauteiloberflächen zu verhindern.

Das Lüftungsverhalten muss somit an die Feuchteproduktion in der Wohnung (z.B. durch Kochen, Duschen, Wäsche aufhängen, Pflanzen, usw.) angepasst werden.

Des Weiteren sollte bei der Möblierung der Räume darauf geachtet werden, dass möglichst keine Möbel direkt an Außenwände – insbesondere Außenecken – gestellt werden. Dadurch könnte die Luftzirkulation hinter dem Möbel vermindert werden, wodurch die Oberflächentemperatur des Außenbauteils weiter absinkt und somit das Risiko von Kondensat- und Schimmelbildung erhöht wird.

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll nur das Schimmelwachstum in Innenräumen durch Schlagregenbeanspruchung der Fassade behandelt werden.

2.4.3. Berechnung der Wahrscheinlichkeit für Schimmelwachstum

Die Vorgangsweise bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Schimmelwachstums aus Schlagregenbelastung ist folgendermaßen:

Zuerst wird mit einem hygrothermischen Simulationsprogramm das zwei- oder dreidimensionale Modell des zu untersuchenden Bauteils erstellt und die genauen Materialparameter eingegeben. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, sind das Außenklima (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, relative Luftfeuchte, Schlagregenmenge, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, solare Bestrahlung) nach den örtlichen Gegebenheiten und das Innenklima (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Wärmeübergangskoeffizient) nach den Gewohnheiten des Nutzers anzusetzen. Ist kein bestimmter Nutzer bekannt, kann ein durchschnittliches bzw. kritisches Nutzerverhalten angenommen werden, wo Raumlufffeuchten über 55 % über eine längere Zeitdauer auftreten.

Mit der hygrothermischen Simulation werden Datenreihen für die relative Feuchte und die Temperatur an der inneren Wandoberfläche erstellt. Daraus lässt sich die Wahrscheinlichkeit der Sporenkeimung und des Myzelwachstums für alle am Bau vorkommenden Schimmelpilze errechnen und darstellen.

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Schimmelwachstums wurden unterschiedlichste Vorhersagemodelle entwickelt, z.B.

- Modell „Time of Wetness“ von Adan
- Vorhersage auf Basis der Fuzzy-Logik
- Modell von Clarke und Rowan
- Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka
- Ansatz von Sedlbauer

2.4.3.1. Ansatz von Sedlbauer

Beim Isoplethenmodell von Sedlbauer [SED01] wird der Untergrund je nach Nährstoffhaltigkeit für den Schimmelpilz in 4 Substratgruppen eingeteilt.

Tab. 6 – Substratgruppen [SED01]

Substratgruppe		typische Repräsentanten
0	optimaler Nährboden	biologische Vollmedien
I	biologisch verwertbare Substrate	Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Material für dauerelastische Fugen
II	Substrate mit porigem Gefüge	Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer, Dämmstoffe die nicht unter I fallen
III	inerte Substrate	Metalle, Folien, Gläser, Fliesen

Je nach Grad der Verschmutzung kann sich die Einteilung in die Substratgruppe verschieben.

Für jede dieser Substratgruppen gibt es ein Isoplethendiagramm, in welchem die Sporenauskeimungszeit und die Myzelwachstumsgeschwindigkeit nach relativer Luftfeuchte und Temperatur für alle am Bau vorkommenden Pilze aufgetragen sind. Die jeweils unterste Kurve stellt die LIM (Lowest Isopleth for Mould) dar. Unter dieser Kurve sind keine Sporenauskeimung und kein Myzelwachstum zu erwarten.

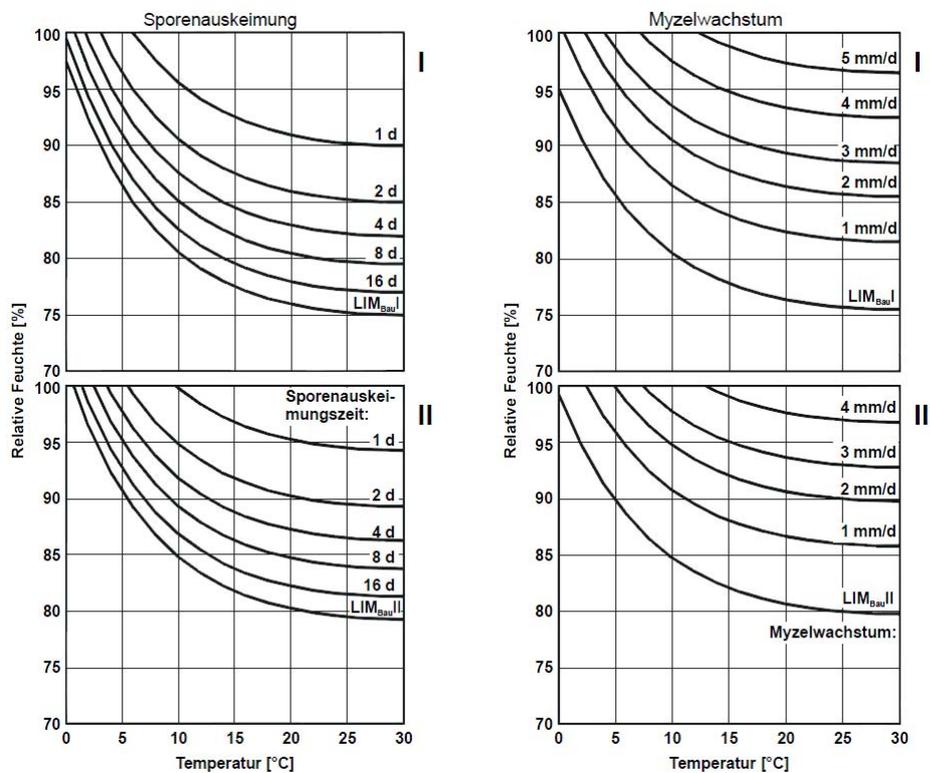


Abb. 14 – verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung und Myzelwachstum für die Substratgruppen I und II [SED01]

Die Zeitangaben in den Diagrammen für Sporenauskeimung stellen die Zeitdauer dar, nach der bei stationären hygrothermischen Bedingungen die Auskeimung (d.h. die Ausbildung eines Keimschlauchs) stattfinden kann.

In den Diagrammen ist ersichtlich, dass die LIM für Sporenauskeimung bei niedrigen Temperaturen etwas über der LIM für Myzelwachstum liegt. Die Sporen keimen natürlich erst dann, wenn ein Weiterwachsen möglich ist.

2.4.3.2. Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka

Das Modell von Viitanen, Ritschkoff und Hukka ist ein numerisches Modell und basiert auf dem Schimmelpilzwachstumsindex (Mould-Index) [VIIT10]. Es ist zur Worst-Case-Abschätzung geeignet [ONO03a].

Da viele unterschiedliche Schimmelarten existieren, die nicht alle unter den gleichen Bedingungen auskeimen und wachsen, wurde von Viitanen und Ritschkoff für den Mould-Index eine Mischung aus verschiedenen Schimmelarten bewertet.

Die Einteilung des Schimmelpilzwachstumsindex ist in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7 – Schimmelpilzwachstumsindex [VIIT10, VIIT07]

Index	Wachstumsrate	Beschreibung
0	kein Wachstum	Sporen sind nicht aktiv
1	geringes Schimmelpilzwachstum (unter dem Mikroskop sichtbar)	Anfangsphase des Wachstums
2	< 10 % der Fläche von Schimmelpilz bedeckt (unter dem Mikroskop sichtbar)	-
3	10 – 30 % der Fläche mit Schimmelpilz bedeckt (mit dem Auge sichtbar)	neue Sporen werden gebildet
4	30 – 70 % der Fläche mit Schimmelpilz bedeckt (mit dem Auge sichtbar)	moderates Schimmelwachstum
5	> 70 % der Fläche mit Schimmelpilz bedeckt (mit dem Auge sichtbar)	starkes Schimmelpilzwachstum
6	Oberfläche ca. 100 % mit Schimmelpilzen bedeckt	sehr starkes Schimmelpilzwachstum

Das Wachstum von Schimmel sowie die benötigte Zeit zum Auskeimen der Sporen sind abhängig [VIIT07]

- vom Wasseraktivwert a_w ,
- von der Temperatur,
- der Dauer der Einwirkung (der Feuchtigkeit und der Temperatur),
- der Art der Oberfläche und
- der Art des Substrats.

Von Viitanen und Ritschkoff [VIIT91] wurden umfassende Untersuchungen von Schimmelwachstum auf unterschiedlichen Holzarten durchgeführt. Auf Grundlage dessen wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das mit einigen Adaptierungen auch für Baustoffe anwendbar ist.

3. Langzeit-Schlagregenmessung

3.1. Beschreibung der Messeinrichtungen

Am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien (Punkt 1 in Abb. 15) wurden Messeinrichtungen zur Erfassung von Wetterdaten eingerichtet, wodurch folgende Messwerte mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute verfügbar sind:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Direktstrahlung
- Diffusstrahlung
- Normalregenmenge

Zusätzlich wird an der Nordwestfassade des Institutsgebäudes (Punkt 2 in Abb. 15) die Schlagregenmenge mit einer Auflösung von ebenfalls einer Minute gemessen. Direkt neben der Schlagregensmessstelle können zwei Platten mit verschiedenen Oberflächen eingespannt werden, wodurch aus einer kontinuierlichen Gewichtsmessung die aufgenommene Schlagregenmenge bestimmt werden kann.



Abb. 15 – Orthofoto des Messstandortes [WIE10 - bearbeitet]



Abb. 16 – Schlagregennesstelle an der Nordwestfassade des Laborgebäudes des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien

Die Messeinrichtung zur Langzeit-Schlagregenmessung wurde aus einem Holzrahmen mit Blechverkleidung gebaut und hat eine Ausrichtung von 300° aus der Nordrichtung. Diese Fassadenseite wurde deshalb gewählt, da der Wind am Standort auf den Aspanggründen fast ausschließlich aus der Richtung West bis Nordnordwest kommt und der Wind einen entscheidenden Einflussfaktor der Schlagregenbelastung einer Fassade darstellt.

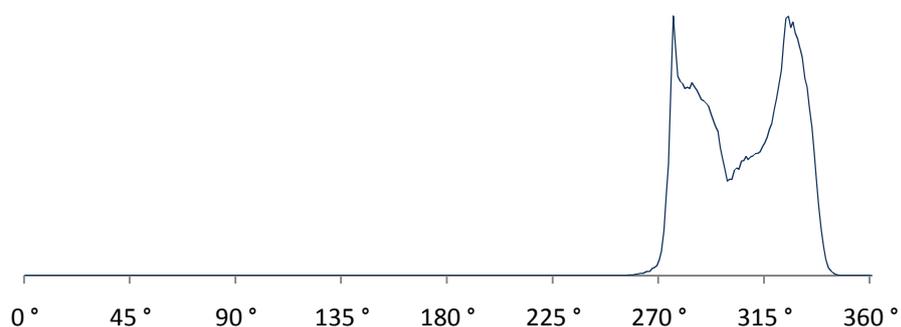


Abb. 17 – Häufigkeit der Windrichtung am Standort der Schlagregennesstelle

Hinter der mittleren Öffnung der Schlagregennesanlage mit einer Fläche von etwa $0,39 \times 0,39 \text{ m}$ ($0,152 \text{ m}^2$) befindet sich eine Auffangwanne aus verzinktem Stahlblech, mit der der Schlagregen gesammelt und gewogen wird. Die Rückwand der

Schlagregennesseinrichtung besteht ebenfalls aus verzinktem Stahlblech. Bei Überschreiten eines festgelegten Gewichts der Auffangwanne wird ein Ventil geöffnet, um das gesammelte Wasser wieder ablaufen zu lassen (Abb. 18).



Abb. 18 – Ventil für Wasserablauf aus der Auffangwanne

Die links und rechts neben der Schlagregenauffangwanne montierten Platten haben eine Fläche von ebenfalls etwa $0,39 \times 0,39 \text{ m}$ ($0,152 \text{ m}^2$). Mittels Metallplatten und Schrauben werden sie in der richtigen Position befestigt, sodass die vordere Fläche in einer Flucht mit der vorderen Metallverkleidung liegt. Die gesamte Rahmenkonstruktion, in der die Platte eingespannt ist, hängt an einer Wägezelle, die das gemessene Gewicht auf einen Computer im dahinterliegenden Raum überträgt.

Über den Öffnungen in der vorderen Metallverkleidung ist ein Tropfkantenprofil angebracht, damit das von der vorderen Metallplatte ablaufende Wasser nicht auf die Platten oder in die Auffangwanne laufen kann. Zusätzlich sind die Fugen der oberen Seite mit Silikon abgedichtet, um auch hier unerwünschten Wassereintritt zu verhindern.

Um die Proben beim Einbau nicht zu beschädigen und um eine Gesamtdicke der Prüfkörper von mindestens 10 cm zu erreichen, ist bei dünnen Platten eine XPS-Platte mit Schrauben an der Rückseite zu befestigen. Prüfkörper mit einer Dicke von unter etwa 10 cm könnten sonst nicht ordnungsgemäß montiert werden. XPS wurde deshalb gewählt, da dieses Material keine Feuchtigkeit aufnimmt und somit nur die Feuchtigkeitsaufnahme der Probe gemessen wird.



Abb. 19 – Schlagregennesstelle mit hochgeklappter Metallverblendung

3.2. Daten der Wetterstation

Die Wetterstation des Fachbereichs zeichnet bereits seit einigen Jahren die Wetterdaten am Standort der Versuchsstelle auf. Für diese Diplomarbeit wurden nur die Daten der letzten 1 ½ Jahre verwendet, da zuvor die Schlagregennesstelle noch nicht installiert war.

Im Folgenden sind für den Zeitraum 24.06.2009 bis 24.06.2010 die Lufttemperatur, die relative und die absolute Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die direkte und die diffuse Strahlung und die Normalregenmenge in Diagrammen dargestellt (Abb. 20 bis Abb. 26).

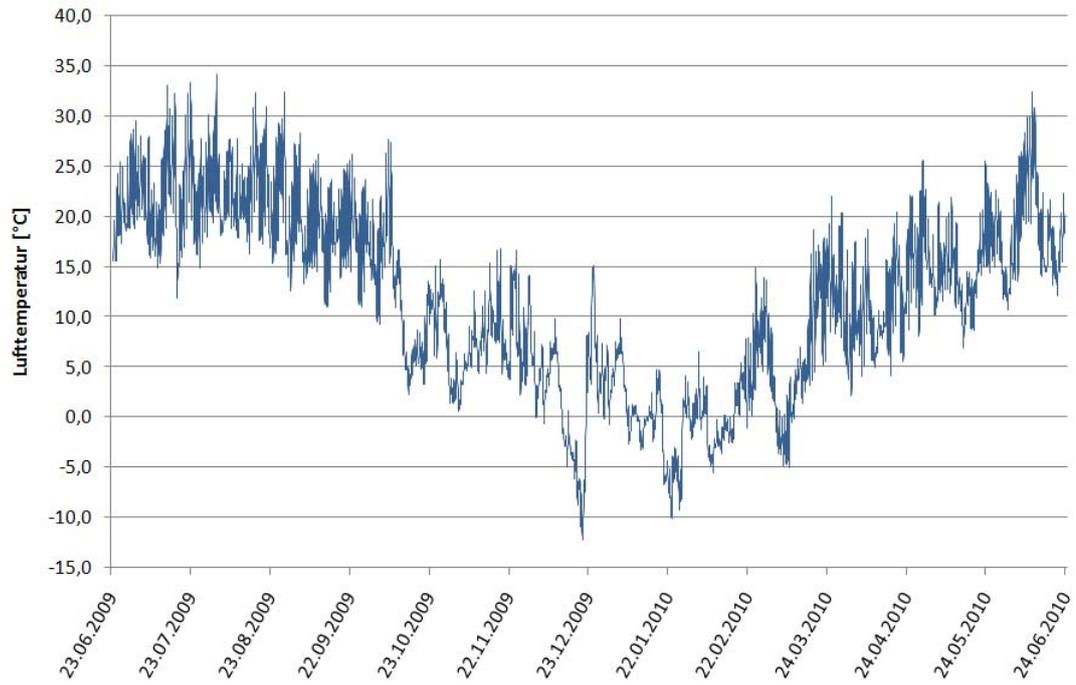


Abb. 20 – Lufttemperatur vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

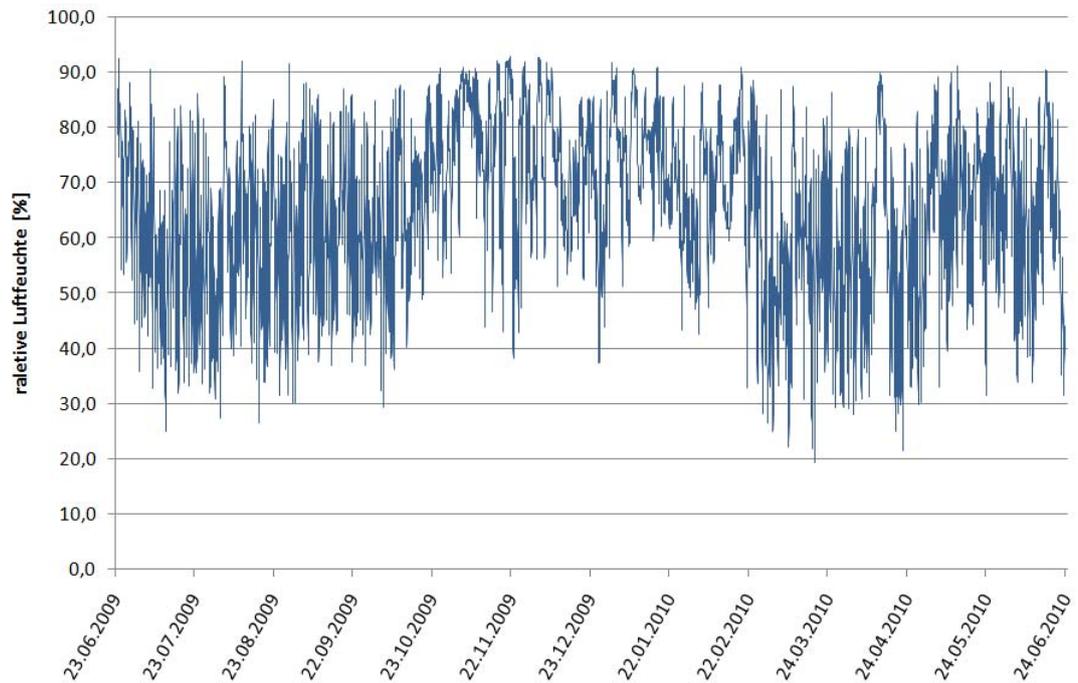


Abb. 21 – relative Luftfeuchte vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

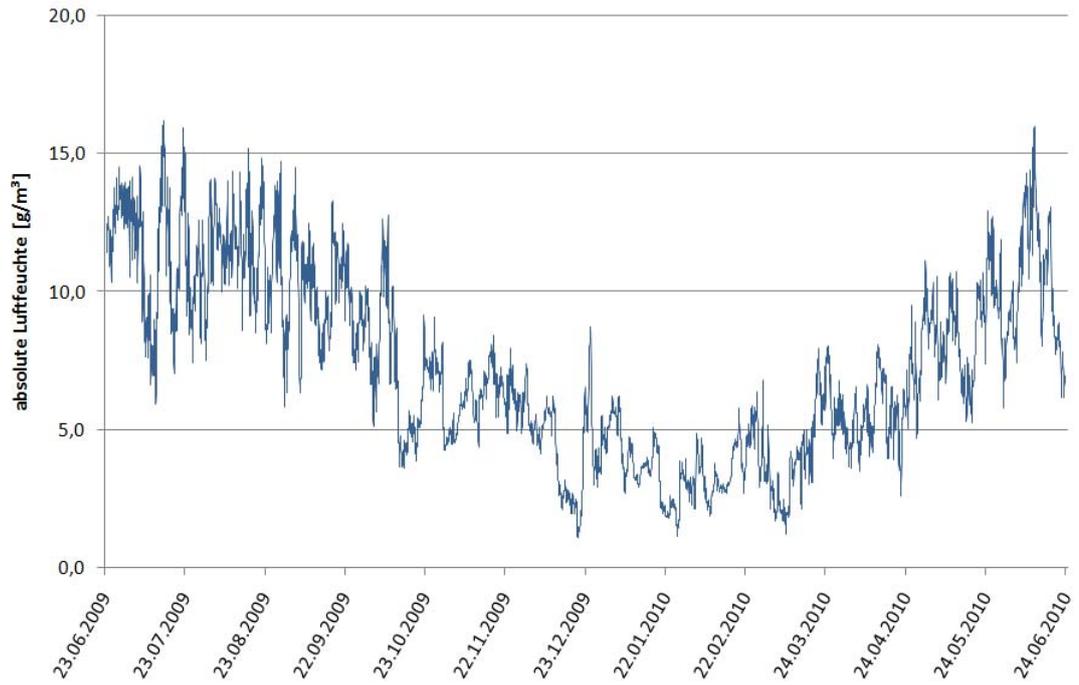


Abb. 22 – absolute Luftfeuchte vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

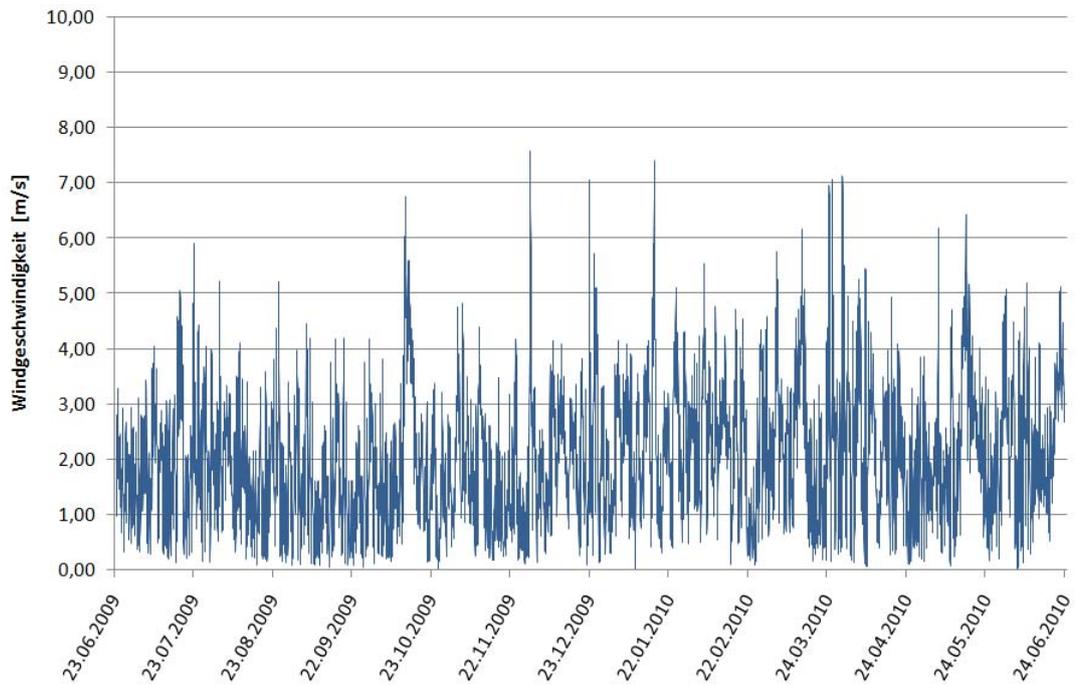


Abb. 23 – Windgeschwindigkeit vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

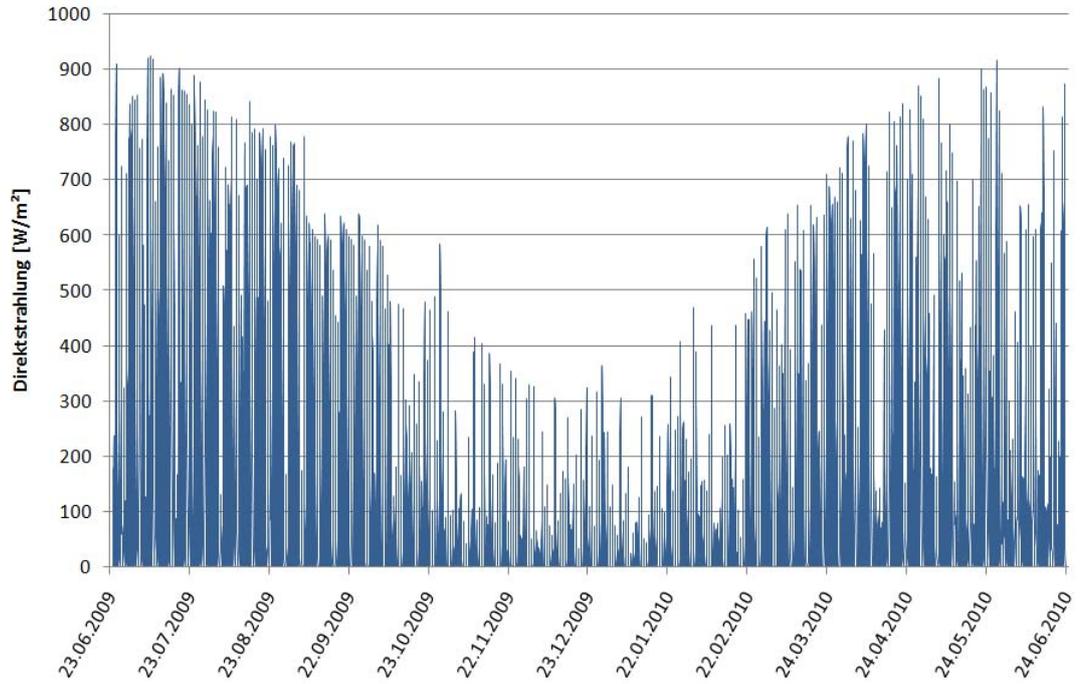


Abb. 24 – Direktstrahlung vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

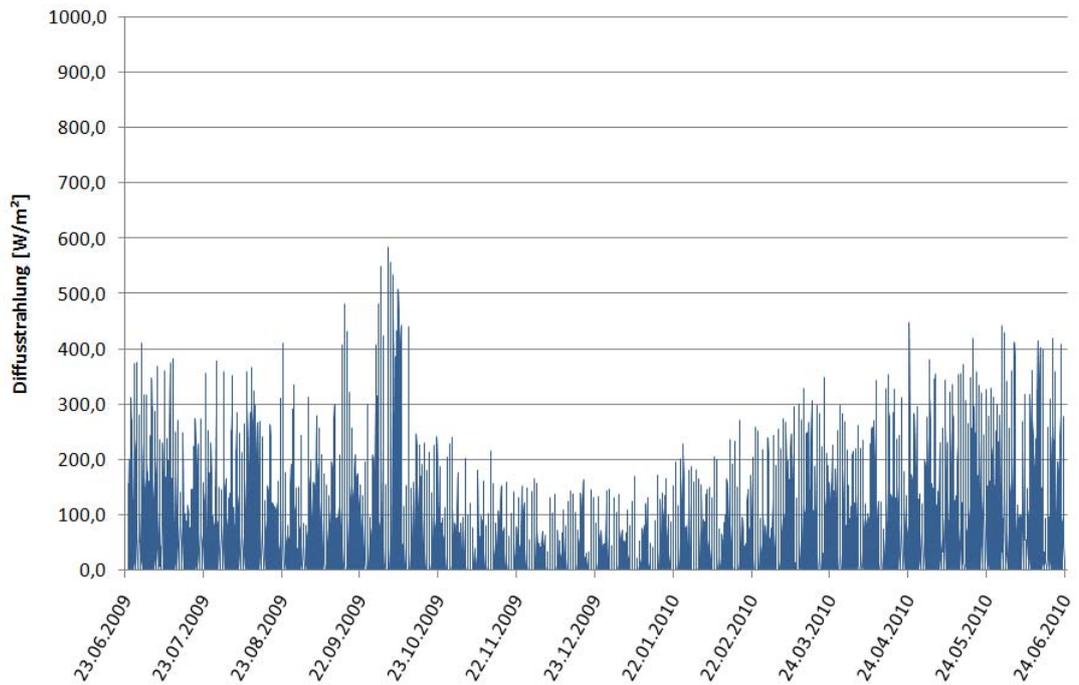


Abb. 25 – Diffusstrahlung vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

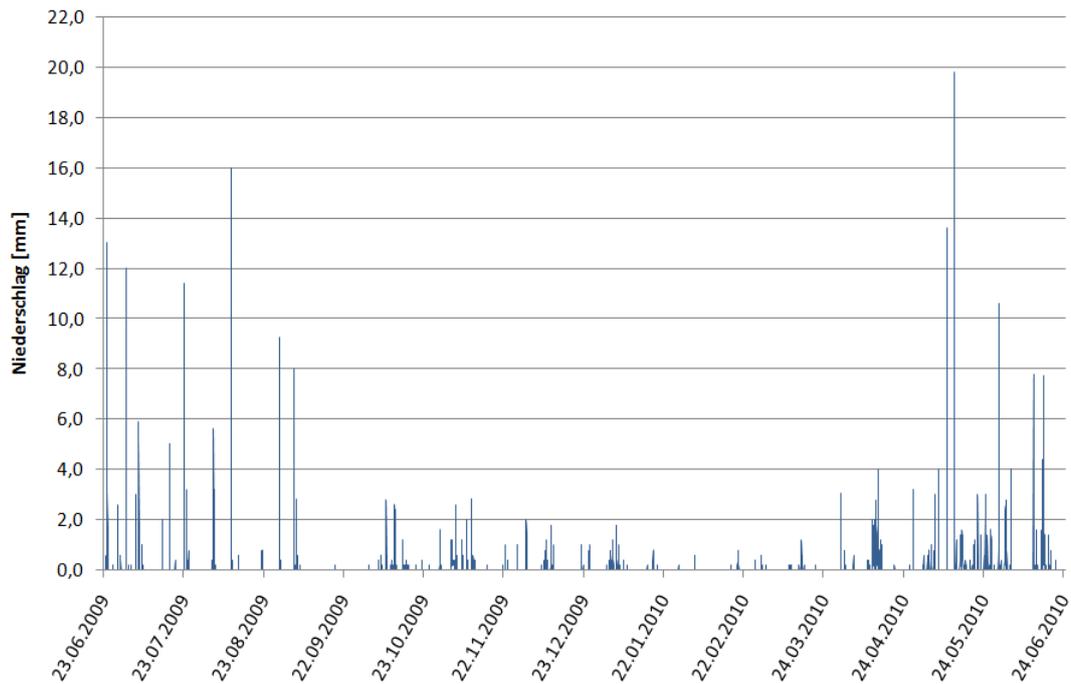


Abb. 26 – Normalregen vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

Um die Menge des Schlagregens aus dem Normalregen berechnen zu können, wurden verschiedene Berechnungsmethoden entwickelt. Folgende Formel wird wie bereits in 2.3.3. beschrieben als „WDR relationship“ bezeichnet und beinhaltet die besonderen Windverhältnisse an Fassaden [BLO04].

$$R_{wdr} = \alpha \cdot U \cdot R_h \cdot \cos\theta$$

R_{wdr} ... Schlagregenmenge [mm]

α ... Fassadenfaktor [s/m]

U ... Windgeschwindigkeit [m/s]

R_h ... Normalregenmenge [mm]

θ ... Winkel zwischen der Normalen auf die Wand und der Windrichtung [°]

(bei einer Abweichung von mehr als 90° zur Normalen auf die Wand gleich Null)

Multipliziert man nur die Windgeschwindigkeit mit dem Cosinus des Winkels zwischen der Normalen auf die Wand und der Windrichtung ergibt sich der „Windfaktor“, von dem deutlich ablesbar ist, wie stark die betreffende Fassade vom Wind belastet ist. Der Regen wird hier noch nicht beachtet. Im folgenden Diagramm ist der „Windfaktor“ für die Fassade mit einer Normalen von 300° aus der Nordrichtung dargestellt.

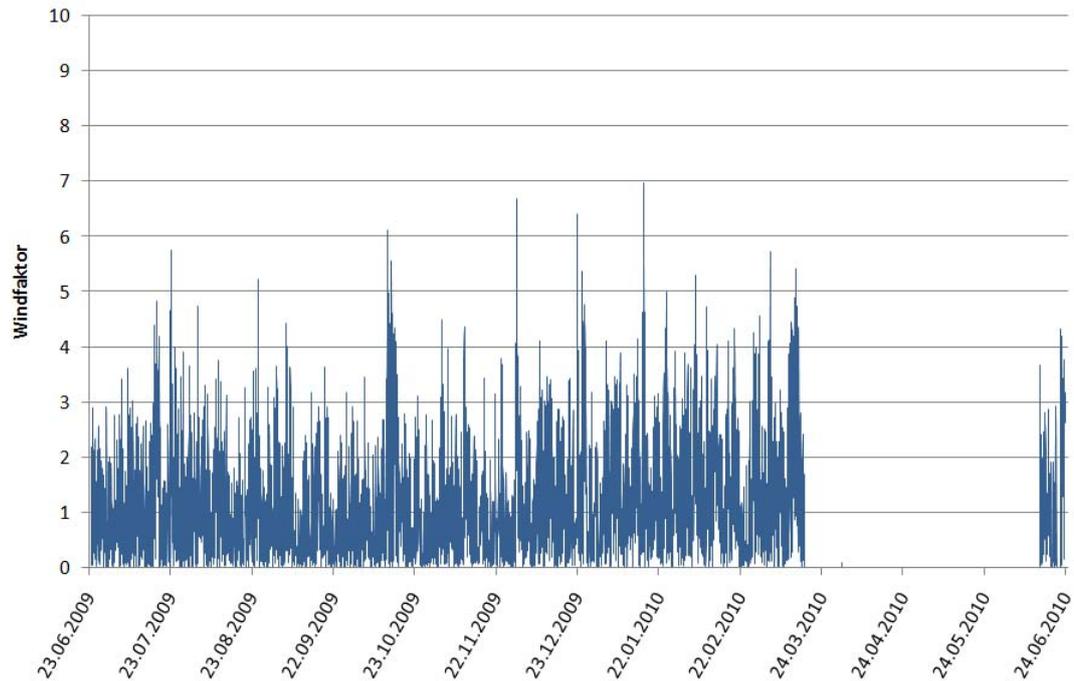


Abb. 27 – Windfaktor vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

Zwischen März und Juni 2010 ist laut den Messungen kein Wind aus der sonst üblichen Windrichtung gekommen. Dabei dürfte es sich jedoch um einen Messfehler handeln. In den Ergebnissen der Schlagregenmessung ist erkennbar, dass es sehr wohl eine Windanströmung der betrachteten Fassade gegeben hat.

Der Fassadenfaktor α beinhaltet die Beschaffenheit und Art der Fassade, die Umgebung und die Position auf der Fassade. Einen sehr großen Einfluss hat auch die Größe und Form des Gebäudes [BLO06].

Um den Fassadenfaktor der untersuchten Fassade berechnen zu können, muss die gemessene Schlagregenmenge durch die Windgeschwindigkeit, die gemessene Normalregenmenge und den Cosinus des Winkels zwischen der Normalen auf die Fassade und der Windrichtung dividiert werden.

$$\alpha = \frac{R_{wdr}}{U \cdot R_h \cdot \cos\theta}$$

Für die Schlagregensmessstelle am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz ergibt sich ein Fassadenfaktor von $\alpha = 0,172$ s/m.

3.3. Daten der Langzeit-Schlagregenmessung

Wie bereits oben erwähnt, wurden am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien Schlagregenmessungen durchgeführt. Gemessen wurden die Menge des Schlagregens, das Gewicht einer dem Schlagregen ausgesetzten Calciumsilikatplatte und das eines hydraulischen Kalkputzes. Die entsprechenden Diagramme sind im Folgenden dargestellt.

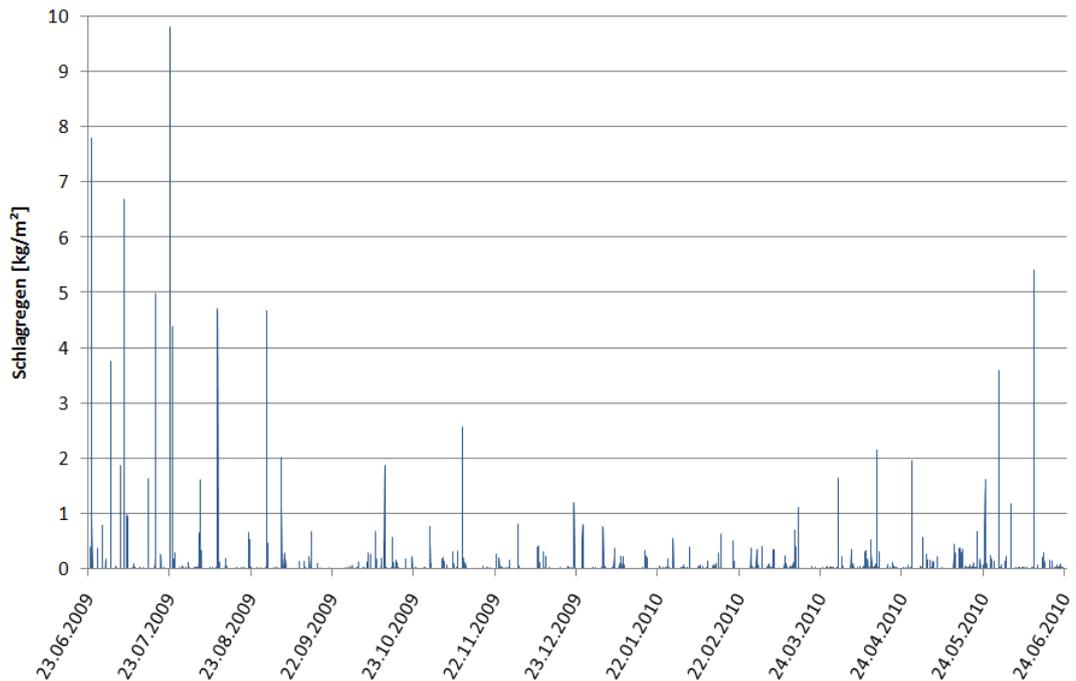


Abb. 28 – Schlagregen vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

Die Messkurve des Gewichts der Calciumsilikatplatte (Abb. 29) zeigt, dass die Platte zu Beginn der Messung sehr feucht war und erst im Laufe der Zeit austrocknete. Bei Schlagregenbelastung stieg das Gewicht steil an um nach Ende des Regengusses langsam durch Austrocknung wieder abzusinken. Im Winter wurden kaum Schwankungen des Gewichts gemessen, was sich daraus erklären lässt, dass zum einen Schnee nicht wie Wasser aufgenommen werden kann und zum anderen die niederschlagsreichsten Monate in Österreich die Sommermonate sind. Dies ist auch in Abb. 26 deutlich erkennbar.

Auch in der Messkurve des Gewichts des hydraulischen Kalkputzes (Abb. 30) ist dies sichtbar, wenn auch keine so starken Schwankungen wie beim Gewicht der Calciumsilikatplatte auftraten.

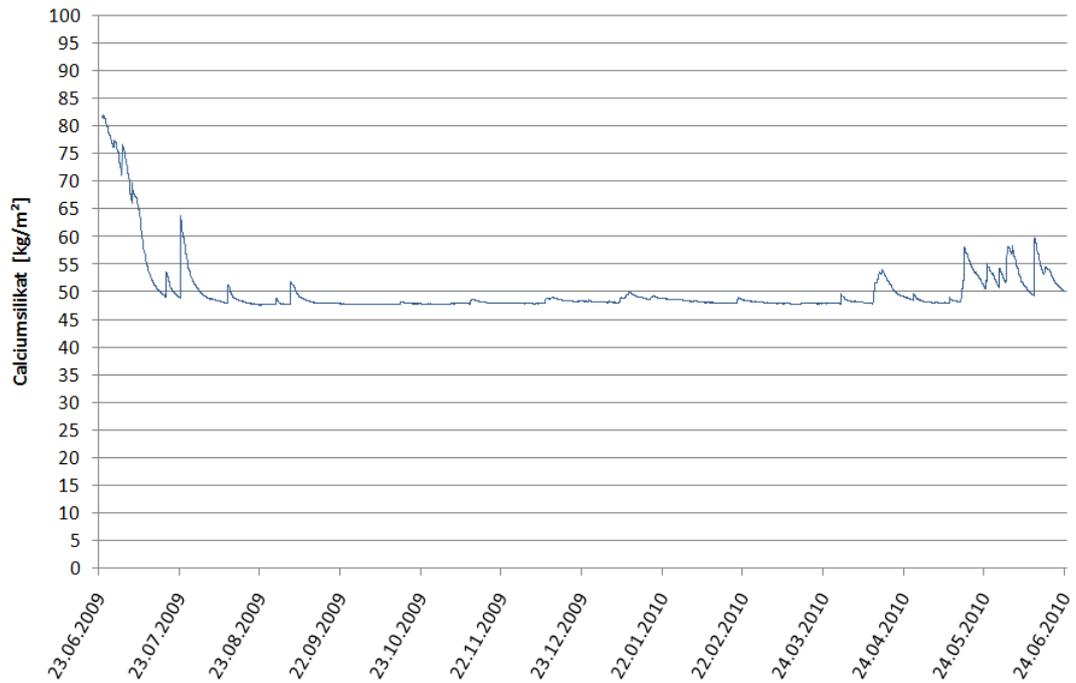


Abb. 29 – Gewicht der Calciumsilikatplatte durch Wasseraufnahme vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

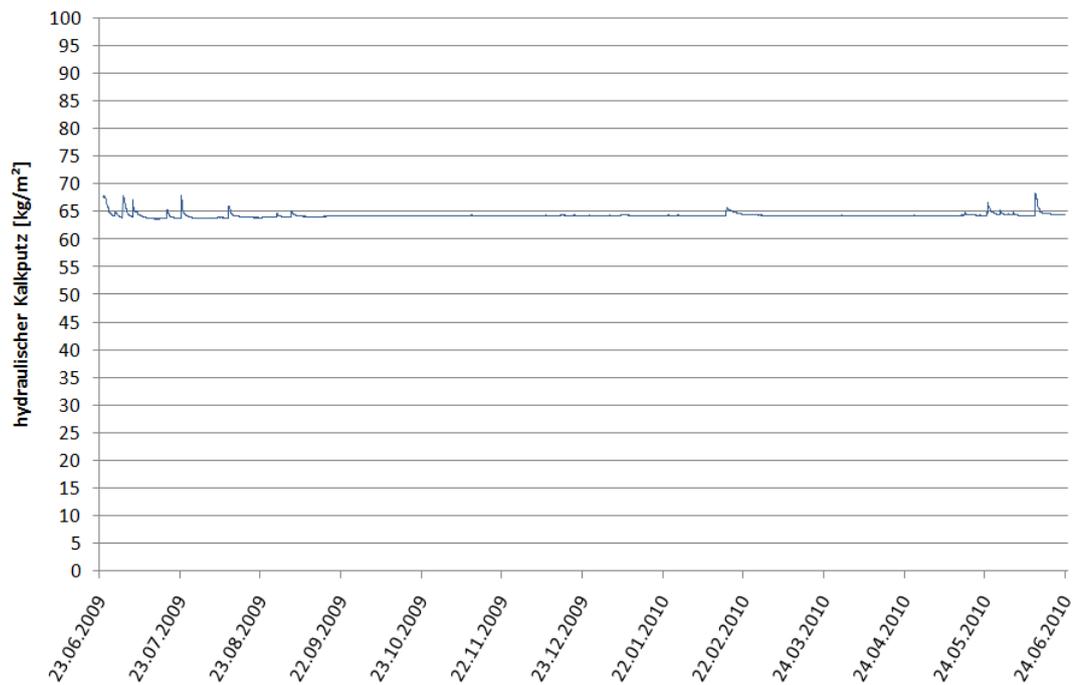


Abb. 30 – Gewicht des hydraulischen Kalkputzes durch Wasseraufnahme vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010

4. Bestimmung der relevanten Materialparameter

Zur Bestimmung der hygrischen Eigenschaften der im Langzeit-Schlagregenversuch verwendeten Materialien wurden Versuche im Labor des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien durchgeführt. Nur durch die Eingabe der exakten Baustoffeigenschaften in die Materialdatenbank, welche bei der hygrothermischen Simulation herangezogen wird, kann der Versuch durch Simulation nachgebildet werden.

Die wichtigsten Stoffparameter für die Simulation des Schlagregenversuchs, welche in den Messungen ermittelt wurden, sind die Wasseraufnahmefähigkeit und der Feuchtegehalt bei Sättigung.

Die Messungen wurden durchgeführt, nachdem die Oberflächen der Platten bereits etwas mehr als ein Jahr der Witterung ausgesetzt waren. Somit konnten Daten gewonnen werden, die nicht denen einer neuen, frisch verputzten Oberfläche sondern eines leicht gealterten Materials entsprechen, was eine bessere Vergleichbarkeit von Messung und Simulation ermöglicht. Des Weiteren stellt eine gealterte Oberfläche viel genauer die Situation am realen Bauwerk dar als eine neue Oberfläche.

4.1. Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit

Die Feuchteaufnahmefähigkeit der Calciumsilikatplatte und des hydraulischen Kalkputzes wurden durch teilweises Eintauchen in Wasser ohne Temperaturgradienten nach ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] bestimmt.

Die Prüfkörper hatten eine Fläche von etwa 0,39 x 0,39 m und eine Dicke von 5 cm bei der Calciumsilikatplatte und 2 cm beim hydraulischen Kalkputz. An der Rückseite der Calciumsilikatplatte bzw. des Kalkputzes waren Platten aus 10 cm dickem extrudiertem Polystyrol mit Schrauben befestigt. Da die XPS-Platten keinen Einfluss auf das Messergebnis haben, wurden sie für diesen Versuch aus praktischen Gründen nicht entfernt.

Um die Anfangsmasse festzustellen wurden die Prüfkörper vor der Messung mit einer Waage mit einer Genauigkeit von 0,1 g gewogen. Die Proben wurden dann mit der zu messenden Oberfläche nach unten in einen Wasserbehälter gelegt, so dass sich unter der Probe etwa 5 mm Wasser ohne Lufteinschlüsse befand und die Probe etwa 5 mm ins Wasser getaucht war. Mit Hilfe von kontinuierlich durchgeführten Messungen der Wassertiefe wurde der Wasserspiegel in dieser Höhe mit einer Genauigkeit von ± 2 mm aufrechterhalten.



Abb. 31 – Messung der Wasseraufnahme, links: Calciumsilikatplatte, rechts: hydraulischer Kalkputz

Nach zuvor festgelegten Zeitabständen wurde der Prüfkörper aus dem Wasser genommen, mit einem Schwamm das überschüssige Wasser von der Oberfläche entfernt und der Prüfkörper gewogen. Nach Auftragen der Wurzel aus der Zeit t (in $s^{1/2}$) auf der Abszissenachse und der flächenbezogenen Massenzunahme nach der Zeit t (in kg/m^2) auf der Ordinatenachse eines Diagramms konnte der Wasseraufnahmekoeffizient nach dem Verfahren in ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] errechnet werden.

Tab. 8 – gemessene Wasseraufnahmekoeffizienten

	W_w
Calciumsilikatplatte	$32,8 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$
hydraulischer Kalkputz	$13,6 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$

In der Literatur sind unterschiedlichste Werte für den Wasseraufnahmekoeffizienten von Calciumsilikatplatten zu finden. Vogt und Kriegel [VOG05] geben einen Wert von $W_w = 42,4 (\pm 1,2) \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ an. Der Unterschied zu den Messergebnissen der im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Messung lässt sich möglicherweise einerseits durch die Verwendung eines anderen Produkts und andererseits durch die Alterung der Calciumsilikatplatte erklären. Die Probe war bei der Messung bereits etwa ein Jahr der Witterung ausgesetzt.

Um die Wasseraufnahmefähigkeit des hydraulischen Kalkputzes messen zu können, mussten sehr kleine Zeitabstände gewählt werden, da bereits nach etwa 10 Minuten die Sättigung erreicht war. Ein Zeitabstand von unter einer Minute ist aus

praktischen Gründen nicht möglich, da der Wiegevorgang bereits etwa 15 bis 30 Sekunden dauert und somit bei kürzeren Zeitabständen als einer Minute das Ergebnis verfälscht werden würde. Bei der ersten Messung wurde der erste Zeitabstand zu lange gewählt, wodurch es nicht möglich war, die Wasseraufnahmefähigkeit zu berechnen (Abb. 34). Aus den zwei Ergebnissen im linearen Bereich des Diagramms der zweiten Messung konnte der Wasseraufnahmekoeffizient jedoch mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden (Abb. 35).

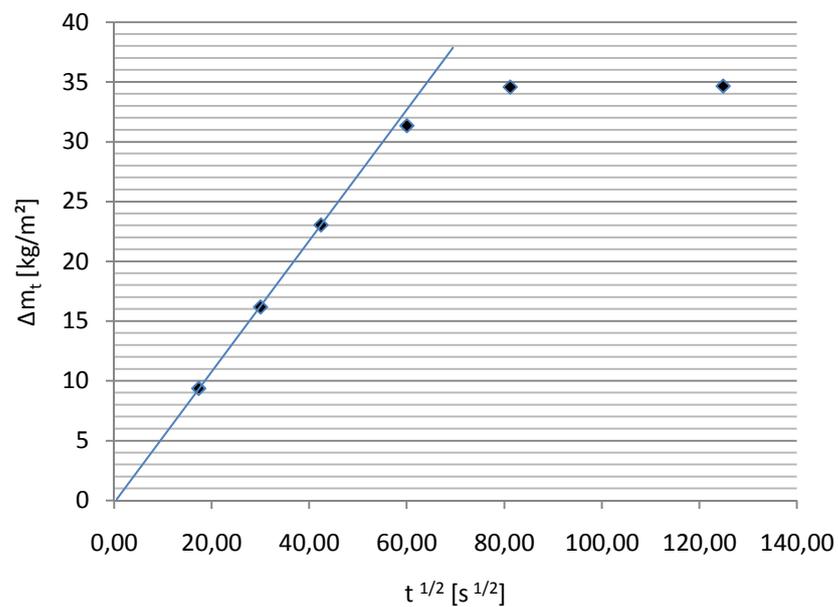


Abb. 32 – Kurve der Wasseraufnahme der Calciumsilikatplatte (aus Messung 1)

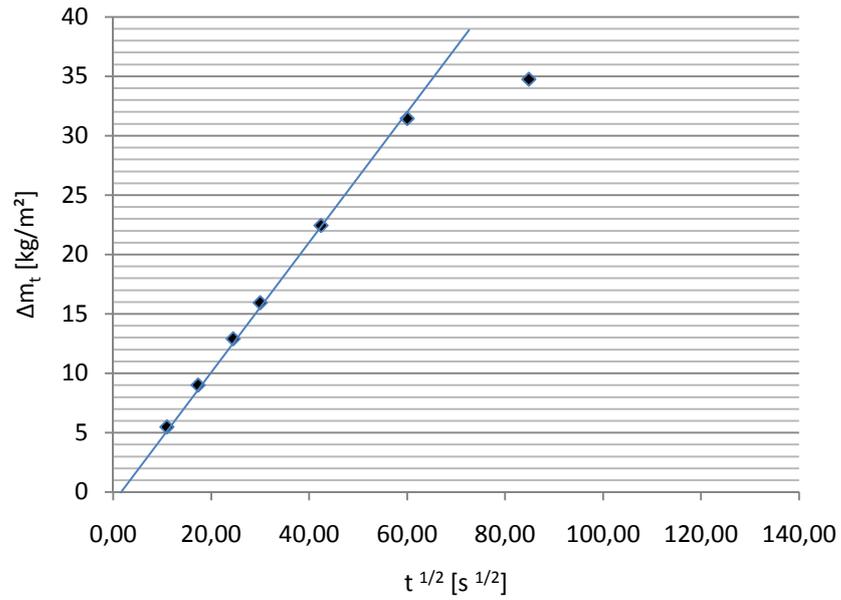


Abb. 33 – Kurve der Wasseraufnahme der Calciumsilikatplatte (aus Messung 2)

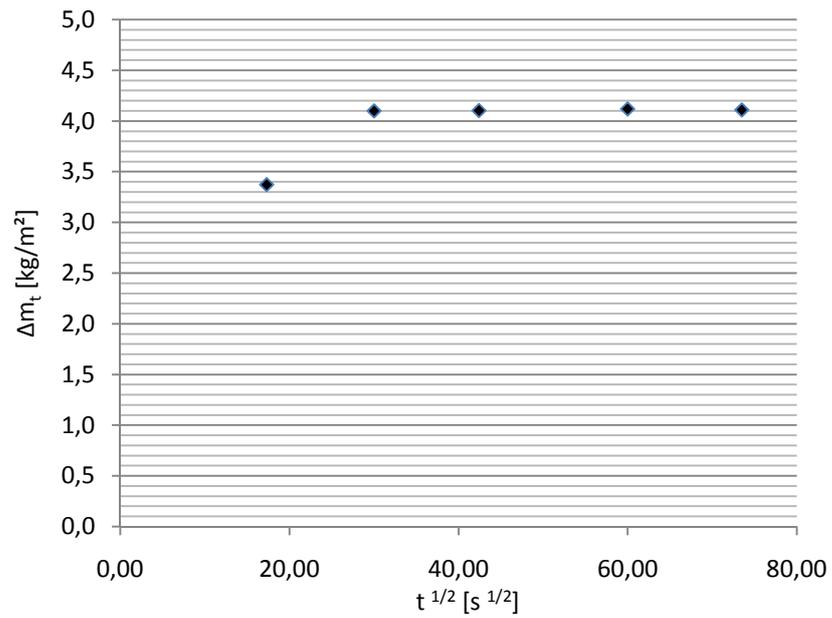


Abb. 34 – Kurve der Wasseraufnahme des hydraulischen Kalkputzes (aus Messung 1)

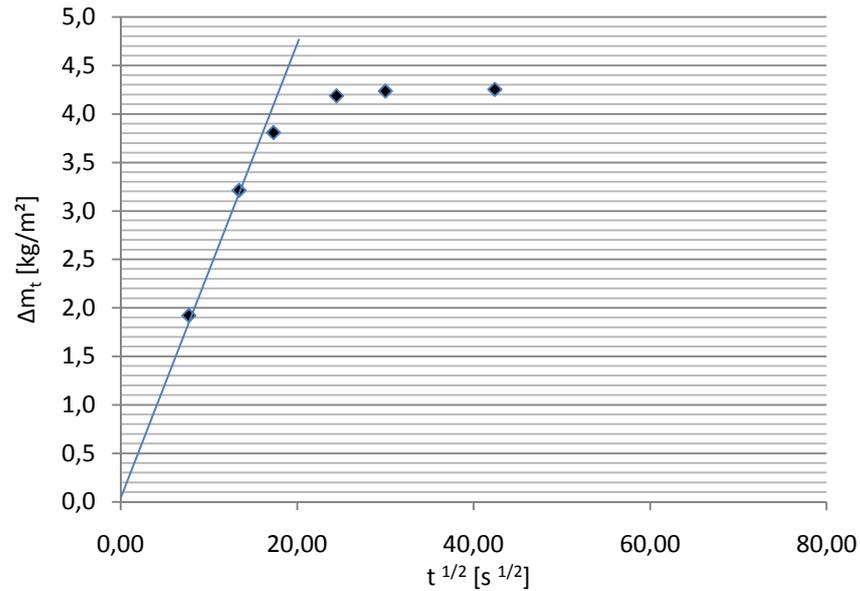


Abb. 35 – Kurve der Wasseraufnahme des hydraulischen Kalkputzes (aus Messung 2)

4.2. Bestimmung des Feuchtegehalts bei Sättigung

Zur Berechnung der volumenbezogenen Masse des Feuchtegehalts (in kg/m^3) bei freier Sättigung u_F wurde die Masse der Prüfkörper abzüglich der XPS-Platte und der Schrauben direkt nach einer etwa 14-tägigen Trocknung bei $70^\circ C$ im Trockenschrank und nach dem Wasseraufsaugversuch ermittelt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 9 – gemessene volumenbezogene Masse des Feuchtegehalts bei freier Sättigung

	u_F
Calciumsilikatplatte	$703,89 \text{ kg/m}^3$
hydraulischer Kalkputz	$235,26 \text{ kg/m}^3$

5. Hygrothermische Simulation

5.1. Grundlagen hygrothermische Simulation

Hygrothermische Simulationsprogramme wurden als Werkzeug für die instationäre Berechnung der Vorgänge in Bauteilen entwickelt. Mittels Randbedingungen (Wetterdateien) werden die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte, Solarstrahlung, Wärme- und Feuchteübergang, Regen und Luftdruck festgelegt. Die daraus resultierenden Wärme- und Feuchtströme können abgebildet und daraufhin untersucht werden, welche Auswirkungen sie auf die Dauerhaftigkeit des Bauteils oder auf das Innenraumklima haben.

HM-Simulationen (Heat-Moisture-Simulationen) bilden die instationären Wärme- und Feuchtströme in Bauteilen ab. Bei HAM-Simulationen (Heat-Air-Moisture-Simulationen) werden zudem noch Luftströmungen abgebildet.

Grundsätzlich läuft die HAM-Simulation von Bauteilen wie folgt ab [KÜN94a]:

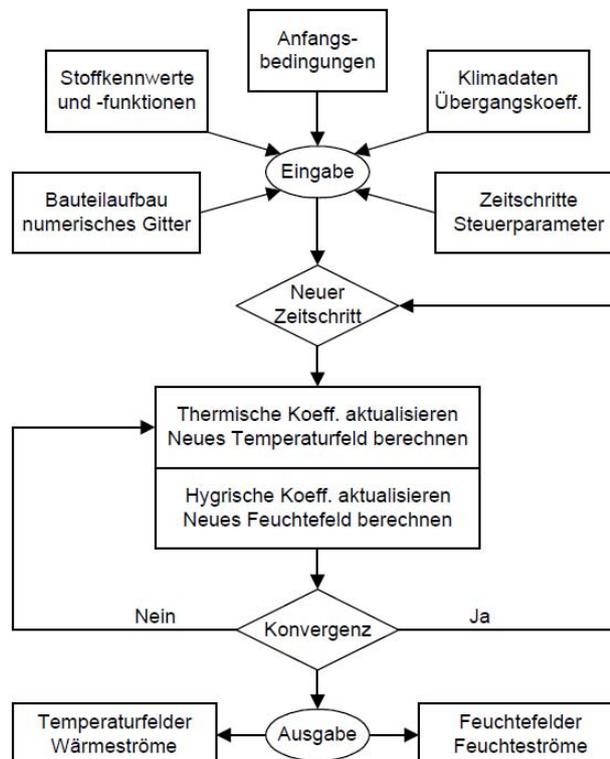


Abb. 36 – Ablauf der hygrothermischen Simulation am Beispiel WUFI [KÜN94a]

Um hygrothermische Simulationen durchführen zu können, sind gewisse Annahmen und Vereinfachungen vorzunehmen. Diese reduzieren die Komplexität und den Aufwand zur Bestimmung der Kenngrößen, schränken aber auch die Allgemeingültigkeit der Modelle ein [HOL01].

Die hygrothermischen dreidimensionalen Bauteilsimulationen im Zuge dieser Diplomarbeit wurden mit dem Programm HAM3D durchgeführt, welches im Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz des Instituts für Hochbau und Technologie der TU Wien entwickelt wurde. Damit wird der gekoppelte Wärme-, Feuchte- und Lufttransport in porösen Baustoffen sowie das Schimmelpilzpotential und eine mögliche Verrottung von organischem Material berechnet [WEG10].

5.2. Nachrechnen der Messung mit HAM3D

Um zu überprüfen, inwieweit die Simulation einer durch Schlagregen belasteten Wand mit HAM3D mit der Schlagregenschlagmessung übereinstimmt, wurde die Messung mit der hygrothermischen Simulation nachgerechnet.

5.2.1. Eingabedaten

Dazu wurde ein Simulationsmodell der Prüfkörper erstellt, wobei die genauen Abmessungen der Prüfkörper inklusive der XPS-Trägerplatte in der Eingabedatei von HAM3D, wie in Abb. 37 dargestellt, festgelegt wurden.

```

2      Anz_Teilungen_x_richtung
0.05  0.10  Länge
1.0    1.0  Dehnung
20     5    Zellen

1      Anz_Teilungen_y_richtung
0.39  Länge
1.0    Dehnung
1      Zellen

1      Anz_Teilungen_z_richtung
0.39  Länge
1.0    Dehnung
1      Zellen

2      AnzBlöcke
0      0      0      1      1      1      Calciumsilikat
1      0      0      2      1      1      XPS
                                20.    L    0.8    x
                                20.    L    0.8    x

```

Abb. 37 – Eingabedaten für die Calciumsilikatplatte

Die Anzahl der Zellen der Platten für die Berechnung wurde später variiert, um die Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse untersuchen zu können.

Die Randbedingungen für die Simulation wurden in zwei Wetterdateien – eine für die vordere Seite und eine für die hintere Seite – festgelegt. Diese Wetterdateien enthalten Werte für

- die Zeit [h] (Ende der Periode),
- die Lufttemperatur [°C],
- den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten [W/m²K],
- die Strahlungstemperatur [°C],
- den effektiven Emissionsgrad [],
- die solare Einstrahlung [W/m²],
- den Absorptionsgrad [],
- die relative Luftfeuchte [],
- den Feuchteübergangskoeffizienten [kg/m²sPa],

- die Saugspannung [Pa] und
- die Wassermenge in der abgelaufenen Zeit [kg/m²]
- Druck [Pa]

In Abb. 38 und Abb. 39 sind Auszüge dieser beiden Wetterdateien dargestellt.

```
zeit(PeriodenEnde)_temp_alphaC_temps_eps_rad_absG_phi_betaV_suc_qL_druck
```

0	Referenzhöhe										
0.166666667	15.7	11.9	10.7	0.9	0.0	0.2	0.85	8.32E-08	0	0.000	0
0.333333333	15.5	11.6	10.5	0.9	0.0	0.2	0.85	8.09E-08	0	0.000	0
0.5	15.5	11.4	10.5	0.9	0.0	0.2	0.86	7.95E-08	0	0.000	0
0.666666667	15.6	12.1	10.6	0.9	0.0	0.2	0.86	8.46E-08	0	0.064	0
0.833333333	15.6	10.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.86	7.03E-08	0	0.000	0
1	15.7	8.9	10.7	0.9	0.0	0.2	0.86	6.22E-08	0	0.074	0
1.166666667	15.8	10.8	10.8	0.9	0.1	0.2	0.87	7.53E-08	0	0.051	0
1.333333333	15.8	8.4	10.8	0.9	0.1	0.2	0.87	5.88E-08	0	0.000	0
1.5	15.7	8.3	10.7	0.9	0.1	0.2	0.87	5.80E-08	0	0.000	0
1.666666667	15.7	6.7	10.7	0.9	0.1	0.2	0.87	4.70E-08	0	0.000	0
1.833333333	15.6	7.6	10.6	0.9	0.1	0.2	0.87	5.32E-08	0	0.000	0
2	15.6	6.0	10.6	0.9	0.1	0.2	0.87	4.20E-08	0	0.000	0
2.166666667	15.6	6.6	10.6	0.9	0.3	0.2	0.88	4.62E-08	0	0.000	0
2.333333333	15.9	7.9	10.9	0.9	0.3	0.2	0.88	5.54E-08	0	0.000	0
2.5	16.2	8.8	11.2	0.9	0.3	0.2	0.87	6.16E-08	0	0.000	0
2.666666667	16.4	9.9	11.4	0.9	0.3	0.2	0.87	6.92E-08	0	0.000	0
2.833333333	16.6	8.7	11.6	0.9	0.3	0.2	0.86	6.10E-08	0	0.000	0
3	16.7	9.2	11.7	0.9	0.3	0.2	0.86	6.41E-08	0	0.000	0
3.166666667	17.0	13.0	12.0	0.9	0.2	0.2	0.86	9.13E-08	0	0.000	0
3.333333333	17.2	11.8	12.2	0.9	0.2	0.2	0.85	8.23E-08	0	0.000	0
3.5	17.3	11.3	12.3	0.9	0.2	0.2	0.85	7.92E-08	0	0.000	0
3.666666667	17.2	10.6	12.2	0.9	0.2	0.2	0.85	7.42E-08	0	0.000	0
3.833333333	17.2	10.8	12.2	0.9	0.2	0.2	0.85	7.53E-08	0	0.000	0
4	17.2	12.8	12.2	0.9	0.2	0.2	0.85	8.96E-08	0	0.000	0
4.166666667	17.2	10.8	12.2	0.9	5.4	0.2	0.85	7.53E-08	0	0.000	0
4.333333333	17.2	12.4	12.2	0.9	5.4	0.2	0.85	8.71E-08	0	0.000	0
4.5	17.2	10.6	12.2	0.9	5.4	0.2	0.85	7.45E-08	0	0.000	0

Abb. 38 – Auszug aus der Wetterdatei für die vordere Seite

```
zeit(PeriodenEnde)_temp_alphaC_temps_eps_rad_absG_phi_betaV_suc_qL_druck
```

0	Referenzhöhe										
0.166666667	15.7	4.0	10.7	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
0.333333333	15.5	4.0	10.5	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
0.5	15.5	4.0	10.5	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
0.666666667	15.6	4.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
0.833333333	15.6	4.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
1	15.7	4.0	10.7	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
1.166666667	15.8	4.0	10.8	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
1.333333333	15.8	4.0	10.8	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
1.5	15.7	4.0	10.7	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
1.666666667	15.7	4.0	10.7	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
1.833333333	15.6	4.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
2	15.6	4.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
2.166666667	15.6	4.0	10.6	0.9	0.0	0.2	0.88	2.80E-08	0	0	0
2.333333333	15.9	4.0	10.9	0.9	0.0	0.2	0.88	2.80E-08	0	0	0
2.5	16.2	4.0	11.2	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
2.666666667	16.4	4.0	11.4	0.9	0.0	0.2	0.87	2.80E-08	0	0	0
2.833333333	16.6	4.0	11.6	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
3	16.7	4.0	11.7	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
3.166666667	17.0	4.0	12.0	0.9	0.0	0.2	0.86	2.80E-08	0	0	0
3.333333333	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
3.5	17.3	4.0	12.3	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
3.666666667	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
3.833333333	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
4	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
4.166666667	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
4.333333333	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0
4.5	17.2	4.0	12.2	0.9	0.0	0.2	0.85	2.80E-08	0	0	0

Abb. 39 – Auszug aus der Wetterdatei für die hintere Seite

Die beiden Wetterdateien gleichen sich bis auf die Spalten für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, die solare Strahlung, den Feuchteübergangs-

koeffizienten und die Wassermenge. Da die hintere Oberfläche weder berechnet noch von der Sonne bestrahlt wird, sind die solare Strahlung und die Wassermenge Null.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wurde mit der Formel in ÖNORM EN 15026 [ONO07] berechnet:

$$\alpha_k = 4 + 4v$$

α_k ... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

v ... Windgeschwindigkeit [m/s]

Da für die hintere Seite die Windgeschwindigkeit wegen der Einhausung mit Blech Null ist, ergibt sich hier ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von 4,0 W/m²K. Für die vordere Seite wurde der konvektive Wärmeübergangskoeffizient aus der gemessenen Windgeschwindigkeit berechnet.

Der Feuchteübergangskoeffizient an den äußeren Grenzflächen wurde mit der Formel von Künzel [KÜN94a] berechnet. Aufgrund der Analogiebeziehung von Feuchteübergang und Wärmeübergang kann der Feuchteübergangskoeffizient direkt aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten berechnet werden.

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_k$$

β_p ... Feuchteübergangskoeffizient [kg/m²s]

Die anderen Daten in der Wetterdatei ergeben sich direkt aus den gemessenen Wetterdaten am Versuchsgelände. Bei der solaren Strahlung gab es Messwerte für die direkte und die diffuse Strahlung. Diese wurden mit der Formel von Perez [PER90] umgerechnet in die direkte und diffuse Strahlung auf die Fassade mit einer Ausrichtung von 300° aus der Nordrichtung. Die Summe aus diesen beiden Strahlungsanteilen wurde dann in die Wetterdatei eingesetzt.

5.2.2. Materialdaten

Sowohl für die Calciumsilikatplatte als auch den hydraulischen Kalkputz wurden die freie Wasseraufnahme als auch der Wassergehalt bei Sättigung gemessen. Der Wassergehalt bei Sättigung ist ein Parameter, mit der die Sorptionsisotherme approximiert wird. Die weiteren Parameter wurden ermittelt, indem drei Stützstellen der Wasseraufnahme bei bestimmten relativen Luftfeuchten der MASEA-Material-

datenbank [MAS11] entnommen wurden und versucht wurde, die Sorptionsisotherme diesen Punkten anzupassen.

Dies ergibt für die Approximationsformel für die Sorptionsisotherme die folgenden Werte.

$$w(s) = \frac{u_F}{1 + \left(\frac{s}{s_0}\right)^p}$$

Tab. 10 – Eingabeparameter für die Feuchtespeicherfunktion

	u_F [kg/m ³]	s_0	p
Calciumsilikatplatte	704	4,0 E ⁺³	0,38
hydraulischer Kalkputz	235	7,0 E ⁺⁵	0,8

Tab. 11 – sonstige Eingabeparameter

	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	μ []
Calciumsilikatplatte	310	0,07 – 1,0 (je nach Feuchtegehalt)	3,8
hydraulischer Kalkputz	1590	0,85	10,0

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wurde nicht veränderlich für unterschiedliche Feuchtegehalte angesetzt. Laut Künzel [KÜN94a] ist es angemessen, beim Konzept des feuchteunabhängigen Dampfdiffusionswiderstands zu bleiben, obwohl im Kapillarwasserbereich – im Gegensatz zum Sorptionsfeuchtebereich – der Feuchtegehalt sehr wohl Auswirkungen auf den Diffusionswiderstand hat. Diese Prozesse sind jedoch gemäß Künzel von den Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Baustoff abhängig, wodurch es für hygrothermische Simulationen reicht, einen unveränderlichen Wasserdampfdiffusionswiderstand zu verwenden.

Mit diesen Werten wurde ein Aufsaugversuch simuliert und danach mit den Ergebnissen der realen Aufsaugversuche verglichen. So konnte überprüft werden, inwieweit die approximierte Sorptionsisotherme für die Simulation mit den realen Materialeigenschaften übereinstimmt.

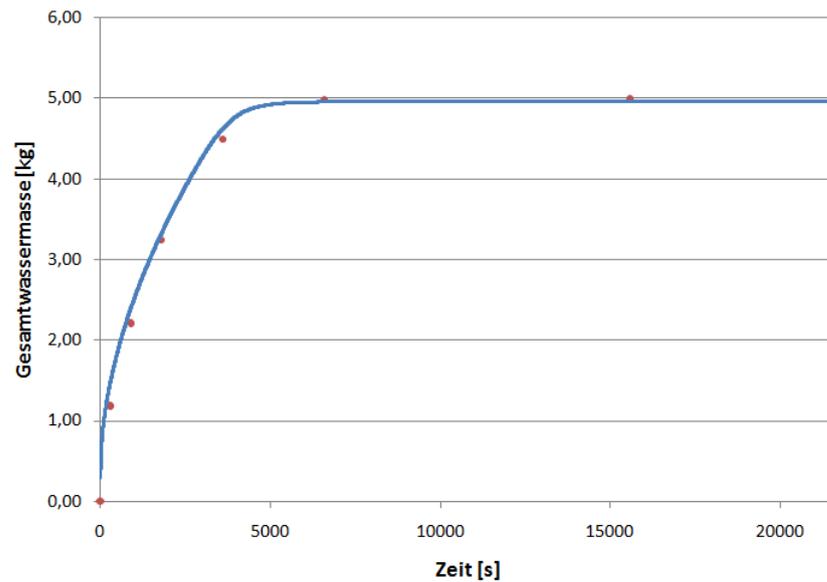


Abb. 40 – Gesamtwassergehalt [kg] der Calciumsilikatplatte beim realen Aufsaugversuch (rot) und bei der Simulation (blau)

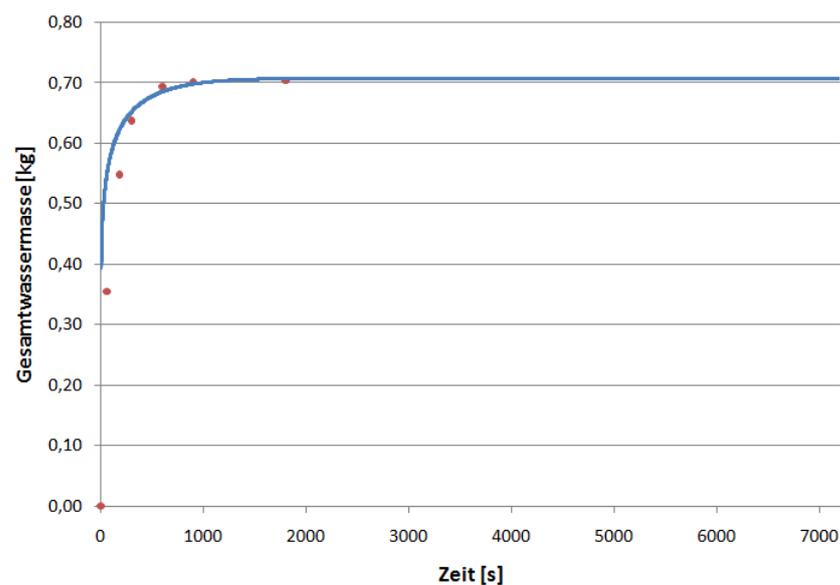


Abb. 41 – Gesamtwassergehalt [kg] des hydraulischen Kalkputzes beim realen Aufsaugversuch (rot) und bei der Simulation (blau)

In Abb. 40 und Abb. 41 ist die gute Übereinstimmung zwischen realem Aufsaugversuch und simuliertem Aufsaugversuch erkennbar.

Das Ergebnis der Simulation ist jedoch stark von der Größe der Zellen abhängig. Bei größeren Zellen geschieht die Wasseraufnahme viel schneller. Dies hängt damit zusammen, dass bei sehr kleinen Zellen die erste Zelle sehr schnell gesättigt ist und

erst wieder Wasser aufgenommen werden kann, wenn die Feuchte von der ersten Zelle an die zweite Zelle weitergegeben wurde. Für die Simulation des Aufsaugversuchs wurde für die Calciumsilikatplatte eine Zellenbreite von 2,5 mm und für den hydraulischen Kalkputz, da er eine geringere volumenbezogene Masse des Feuchtegehalts bei freier Sättigung hat, eine Zellenbreite von 10 mm gewählt. Diese Zellenbreite wurde dann auch beim Nachrechnen der Schlagregennmessung gewählt.

5.2.3. Berechnungsergebnisse

Auf dem Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien wurden sowohl die Menge des Schlagregens auf die NW-Fassade als auch die Menge des Normalregens aufgezeichnet. Um vergleichen zu können, welche dieser beiden Messungen das tatsächliche Verhalten der Calciumsilikatplatte sowie des Putzes abbilden, wurden beide in die Wetterdatei eingesetzt.

Die zeitliche Auflösung der Eingabedaten betrug 10 Minuten. Der Berechnungszeitraum wurde mit einem Jahr (8760 Stunden) festgelegt.

5.2.3.1. Berechnung mit umgerechneten Normalregendaten

Calciumsilikatplatte – Durchlauf A

Beim ersten Durchlauf wurden die Normalregendaten mit der Formel von Blocken [BLO04] in Schlagregendaten für die betrachtete Fassadenseite umgerechnet.

$$R_{wdr} = \alpha \cdot U \cdot R_h \cdot \cos\theta$$

Der Fassadenfaktor α wurde für die erste Berechnung noch mit 1,0 angesetzt um den Einfluss dieses Faktors darstellen zu können.

Aus dem Berechnungsergebnis für den Gesamtwassergehalt der Calciumsilikatplatte wird deutlich, dass die Sättigung der Platte bei Regen sehr rasch erreicht wird. Dies entspricht jedoch keinesfalls den tatsächlichen Gegebenheiten.

Calciumsilikatplatte – Durchlauf B

Beim nächsten Durchlauf wurde der Fassadenfaktor α auf den berechneten Wert von 0,172 gesetzt.

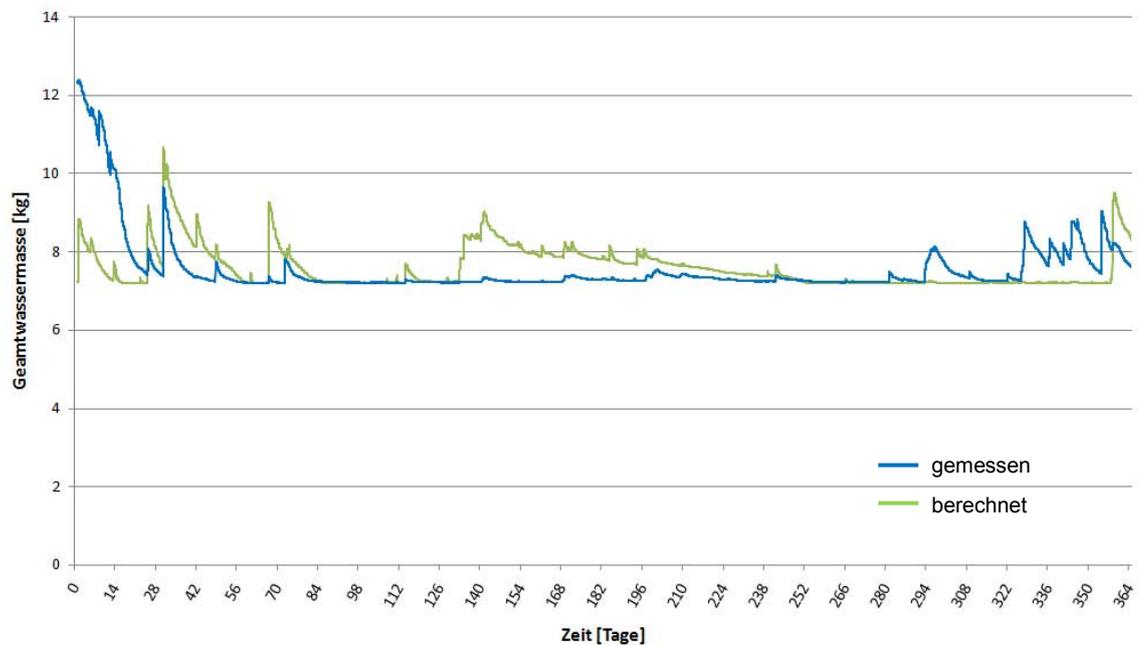


Abb. 42 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf B

Nun stimmt die Kurve der Berechnungsergebnisse schon sehr gut mit der Kurve der Messergebnisse überein. Teilweise sind die Berechnungsergebnisse etwas zu hoch – vor allem bei starken Regengüssen und im Winter.

Der Grund dafür, dass die Berechnung im Winter höhere Ergebnisse liefert, ist, dass bei der Normalregennmessung auch der Schnee mitgerechnet wird. Schnee kann aber von der Calciumsilikatplatte sowie dem Putz nicht aufgenommen werden.

Calciumsilikatplatte – Durchlauf C

Um die berechneten Wassermengen noch weiter an die Ergebnisse der Messung anzupassen, muss der Faktor von Künzel mitgerechnet werden. Dieser wird auf 0,7 gesetzt, da gemäß [KÜN94a] (nach [KÜN06]) etwa 30 % des auf die Fassade auftreffenden Wassers gleich wieder wegspritzt.

Vergleicht man jetzt die Messung mit der Berechnung [Abb. 43] kann man – betrachtet man nur die ersten zehn Monate – eine gute Übereinstimmung feststellen.

Der viel höhere Wassergehalt zu Beginn der Messung lässt sich darauf zurückführen, dass die Calciumsilikatplatte beim Einbau etwas feucht war und diese Feuchtigkeit erst im Laufe der Zeit trocknete.

Die letzten beiden Monate stimmen kaum überein. Die Messung zeigte starke Schwankungen des Gesamtwassergehalts der Calciumsilikatplatte, wogegen die Berechnungsergebnisse dies fast gar nicht darstellen. Der Grund dafür könnte sein, dass die Normalregenmessung in dieser Zeit teilweise keine korrekten Werte (bzw. keine Werte – Messwert „0“) lieferte.

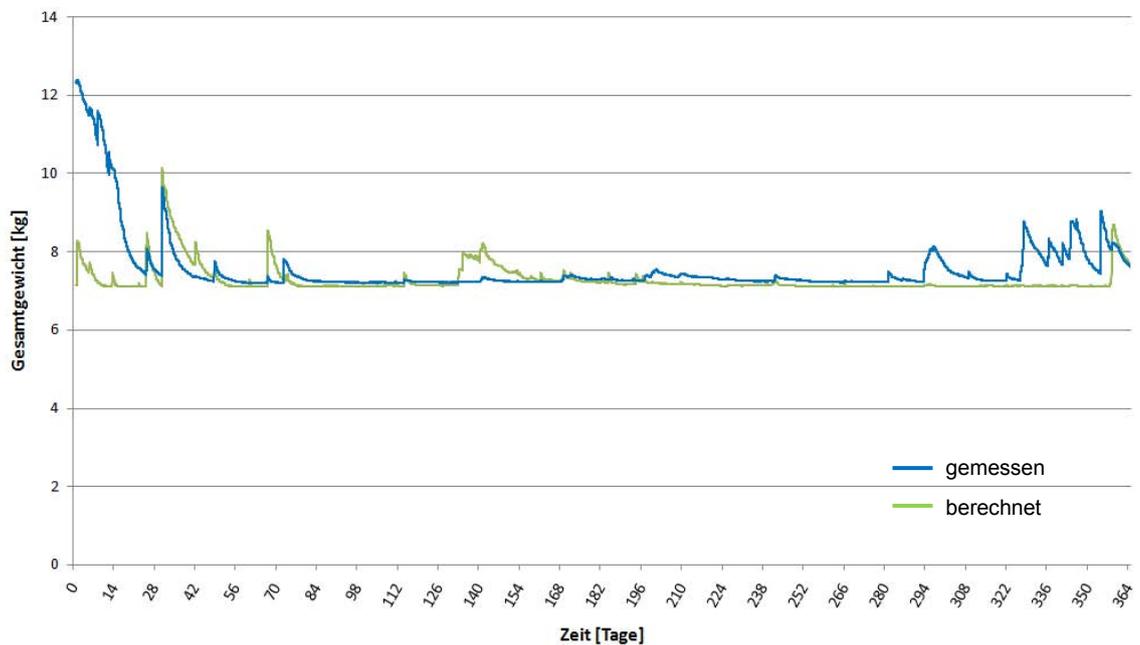


Abb. 43 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf C

Festzuhalten ist, dass unter Berücksichtigung des Fassadenfaktors α sowie des Künzel-Faktors die Wasseraufnahme von Fassaden sehr gut mit Normalregendaten sowie den Daten für die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung berechnet werden kann.

Voraussetzung dafür ist jedoch eine hohe Auflösung der Zeiteinheit. Gemäß Künzel [KÜN94b, KÜN94c] sind bei der Berechnung der Schlagregendaten mindestens Stundenwerte erforderlich, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten.

Blocken [BLO07] legte die erforderliche Zeiteinheit für Eingabedaten in HAM-Simulationen mit 1 bis 10 Minuten fest. Bei Verwendung von Stundenwerten, welche arithmetisch aus minütlich oder 10-minütlich gemessenen Werten gemittelt wurden,

könnte es zu einer Unterschätzung der Schlagregenmenge kommen. Blocken [BLO07a] zeigt, dass bei Verwendung von Stundenwerten wichtige Informationen über die Gleichzeitigkeit von Regen und Wind verloren gehen können. Werden trotzdem Stundenwerte für hygrothermische Simulationen verwendet, sollten diese mit einer Gewichtung, die die Gleichzeitigkeit von Regen und Wind berücksichtigt, gemittelt werden.

5.2.3.2. Berechnung mit gemessenen Schlagregendaten

Calciumsilikatplatte – Durchlauf D

Nach der Berechnung mit den aus dem Normalregen berechneten Schlagregendaten wurden auch die gemessenen Schlagregendaten der Schlagregennesstelle direkt in die Wetterdatei der Simulation eingesetzt. Der Künzel-Faktor wurde wieder mit 0,7 angenommen.

Die Auswertung der Ergebnisse (Abb. 44) zeigt deutlich die sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung.

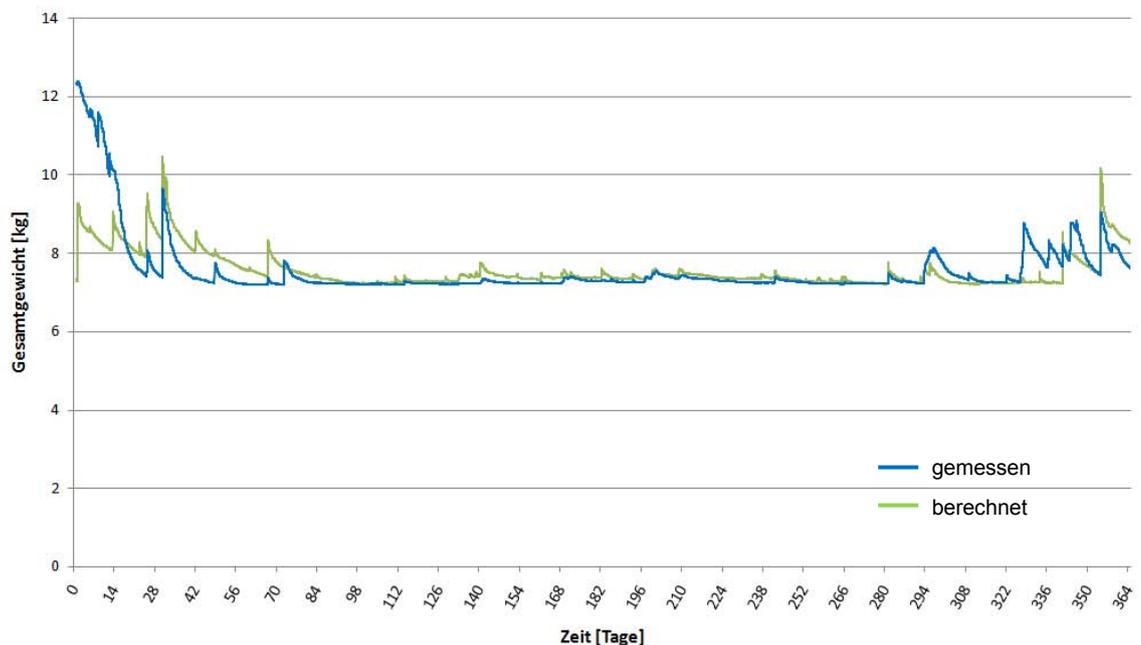


Abb. 44 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf D

Hydraulischer Kalkputz – Durchlauf A

Auch das Gesamtgewicht des hydraulischen Kalkputzes wurde über einen Zeitraum von einem Jahr mit den gemessenen Wetterdaten vor Ort simuliert. Die berechneten Spitzen stimmen sehr gut mit der Messung überein. Das maximal aufgenommene Wasser von rund $4,2 \text{ kg/m}^2$ bzw. 210 kg/m^3 entspricht annähernd dem Wassergehalt bei Sättigung. Mehr könnte der hydraulische Kalkputz ohne erhöhten Druck nicht aufnehmen. Das aufgenommene Wasser trocknet dann auch sehr schnell wieder ab.

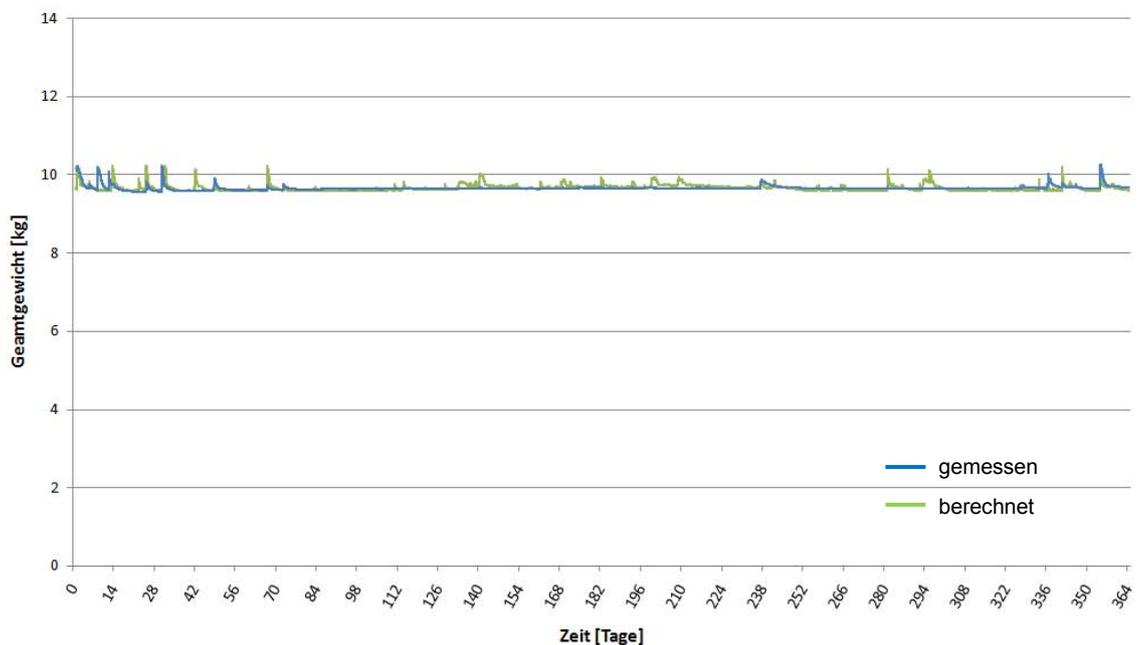


Abb. 45 – Verlauf des Gesamtgewichts des hydraulischen Kalkputzes

5.2.3.3. Einfluss der Zellengröße

Bei den bisherigen Berechnungen der Wasseraufnahme wurde das Modell der Calciumsilikatplatte immer in 20 Schichten unterteilt.

Bei vorangehenden Berechnungen war erkennbar, dass die Größe der Schichten starken Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Die Austrocknung nach einer Durchfeuchtung war deutlich schneller, wenn die Schichten in der Simulation schmal waren. Auch die Durchfeuchtung bei Schlagregenbelastung war bei sehr schmalen Schichten kleiner.

Eine Begrenzung der Zellenanzahl nach oben ist durch die Dauer des Berechnungsvorgangs gegeben. Daraus ergab sich die für die Berechnungen

verwendete Anzahl von 20 Schichten für die Calciumpulverplatte und den hydraulischen Kalkputz.

Der Grund dafür, dass bei einer großen Anzahl von Schichten die Austrocknung bei der Simulation deutlich schneller war, ist, dass bei sehr breiten Schichten die Feuchtigkeit vor dem Austrocknen erst von der Mitte der Schicht bis zum Rand gelangen muss bis sie an die Umgebungsluft abgegeben werden kann. Somit gibt es einen Widerstand vom Rechenpunkt der Schicht (der in der Mitte der Schicht sitzt) bis zum Rand der Schicht (Abb. 46).

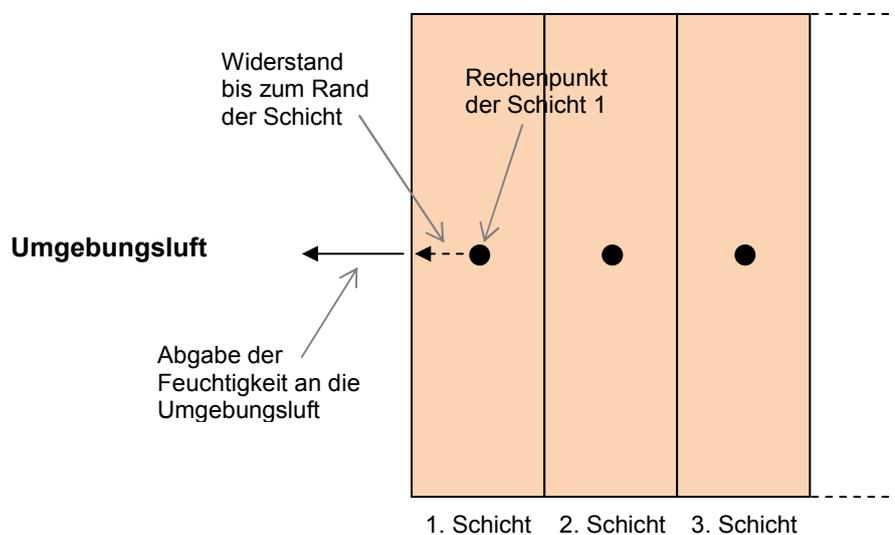


Abb. 46 – Weg der Feuchtigkeit beim Austrocknen des Baustoffs (Rechenpunkte in der Mitte der Schicht)

Um diese Rechenungenauigkeit auszuräumen, wurde für das Simulationsprogramm HAM3D festgelegt, dass der Rechenpunkt der äußersten Schicht am äußeren Rand der Schicht positioniert werden soll.

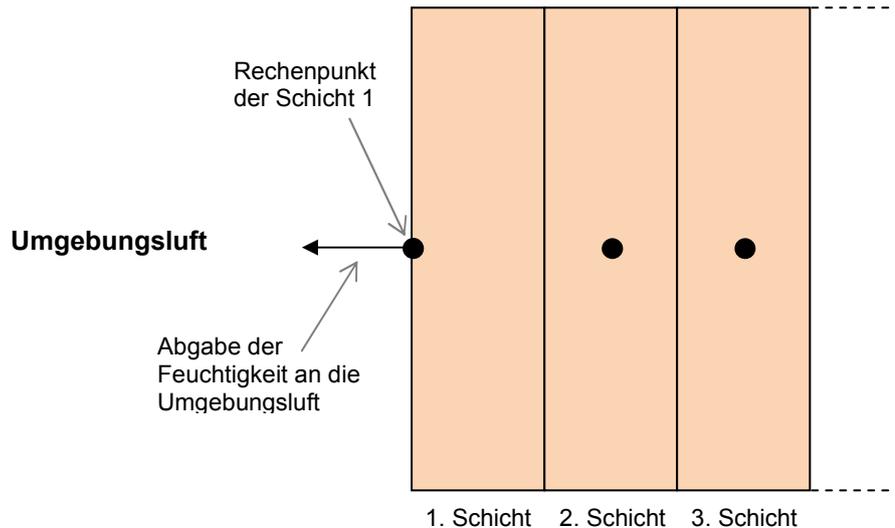


Abb. 47 – Weg der Feuchtigkeit beim Austrocknen des Baustoffs (Rechenpunkt der ersten Schicht am Rand)

Eine weitere Auswirkung, die die Zellenanzahl auf die Berechnungsergebnisse hat, betrifft die maximale Wasseraufnahme der Zellen. Wird der betreffende Baustoff in sehr kleine Schichten unterteilt, wird die Sättigung der äußeren Schicht bei Schlagregenbelastung rasch erreicht. Diese Schicht kann somit erst wieder Wasser aufnehmen, wenn bereits aufgenommenes Wasser nach innen weitergeleitet wurde. Dies entspricht auch den tatsächlichen Gegebenheiten am Bauwerk. Bei sehr schmalen Bauteilschichten in der Simulation kann es somit zu einer Unterschätzung der Wasseraufnahme kommen.

5.2.3.4. Einfluss der Ungenauigkeiten der Eingabewerte

Um den Einfluss der Ungenauigkeiten der Eingabewerte überprüfen zu können, wurde von Bednar [BED00] eine differentielle Sensitivitätsanalyse durchgeführt. In Abb. 48 ist der Einfluss auf den Gesamtfeuchtegehalt und auf den Gesamtwärmeverlust dargestellt. Deutlich wird, dass eine Ungenauigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten, des Ausgleichsfeuchtegehalts bei 80% relativer Luftfeuchte und der Außenluftfeuchte den stärksten Einfluss auf den Gesamtfeuchtegehalt haben.

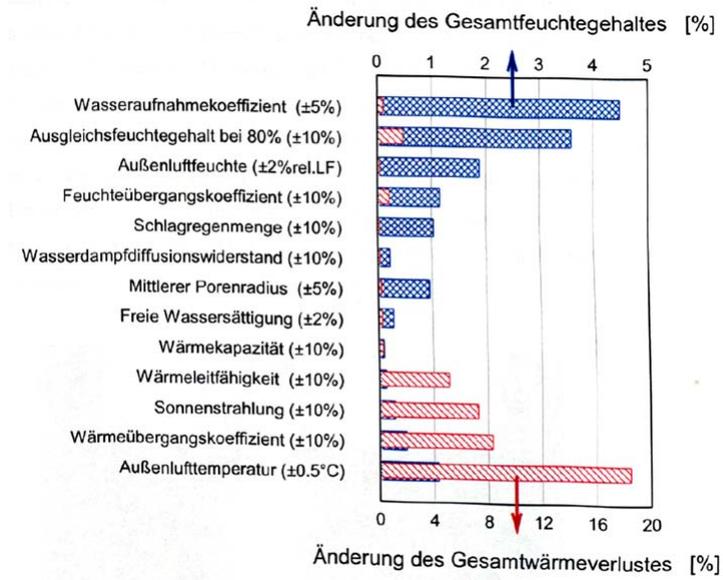


Abb. 48 – Auswirkung der einzelnen Eingabeparameter auf das Ergebnis einer 80-tägigen Bewitterung von Sander Sandstein [BED00]

5.3. Simulation von unterschiedlichen Bauteilen und Situationen

Um die Auswirkungen von Schlagregen auf unterschiedliche Bauteile und Bauteilsituationen untersuchen zu können, wurden einige typische Situationen für die Simulation ausgewählt.

- Bauteilsituation 1
Innenputz
38 cm Hochlochziegel
Außenputz
- Bauteilsituation 2
Innenputz
25 cm Hochlochziegel
10 cm Mineralwolle
12 cm Normalformatziegel
Außenputz
- Bauteilsituation 3
Gipskartonplatte
5 cm Mineralwolle
38 cm Hochlochziegel
Außenputz

5.3.1. Eingabedaten

Für die Simulation von unterschiedlichen Bauteilen und Situationen wurde als Randbedingung für außen die der Simulation der Schlagregenschlagmessung am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien übernommen.

Um die Tages- und Jahresschwankung der relativen Luftfeuchten für das Innenklima abbilden zu können, wurden zwei Sinuskurven überlagert.

Für die Innentemperatur wurde ebenfalls mit Hilfe einer Sinuskurve ein Temperaturverlauf zwischen 20 °C im Winter und 22 °C im Sommer berechnet.

In Abb. 49 ist die Wetterdatei für den Raum dargestellt.

zeit(PeriodenEnde)_temp_alphaC_temps_eps_rad_absG_phi_betaV_suc_qL_druck												
0	Referenzhöhe											
0.166666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	45.22	1.75E-08	0	0	0	0
0.333333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	45.43	1.75E-08	0	0	0	0
0.5	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	45.65	1.75E-08	0	0	0	0
0.666666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	45.87	1.75E-08	0	0	0	0
0.833333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	46.08	1.75E-08	0	0	0	0
1	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	46.29	1.75E-08	0	0	0	0
1.166666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	46.50	1.75E-08	0	0	0	0
1.333333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	46.71	1.75E-08	0	0	0	0
1.5	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	46.91	1.75E-08	0	0	0	0
1.666666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	47.11	1.75E-08	0	0	0	0
1.833333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	47.31	1.75E-08	0	0	0	0
2	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	47.50	1.75E-08	0	0	0	0
2.166666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	47.69	1.75E-08	0	0	0	0
2.333333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	47.87	1.75E-08	0	0	0	0
2.5	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.04	1.75E-08	0	0	0	0
2.666666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.21	1.75E-08	0	0	0	0
2.833333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.38	1.75E-08	0	0	0	0
3	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.53	1.75E-08	0	0	0	0
3.166666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.69	1.75E-08	0	0	0	0
3.333333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.83	1.75E-08	0	0	0	0
3.5	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	48.97	1.75E-08	0	0	0	0
3.666666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.09	1.75E-08	0	0	0	0
3.833333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.22	1.75E-08	0	0	0	0
4	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.33	1.75E-08	0	0	0	0
4.166666667	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.43	1.75E-08	0	0	0	0
4.333333333	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.53	1.75E-08	0	0	0	0
4.5	22.0	2.5	22.0	0.9	0.0	0.2	49.62	1.75E-08	0	0	0	0

Abb. 49 – Auszug aus der Wetterdatei für innen

Für die Materialdaten der Baustoffe wurden die bereits voreingestellten Materialparameter in HAM3D übernommen und später variiert.

5.3.2. Ergebnisse

5.3.2.1. Bauteilsituation 1

Die erste untersuchte Bauteilsituation ist eine verputzte 38 cm Hochlochziegelwand, wie sie vor allem in den 80iger-Jahren häufig ausgeführt wurde. In letzter Zeit traten erhöhte Raumlufffeuchten in der kalten Jahreszeit vor allem in Wohnungen mit diesem Außenwandsystem auf. Teilweise waren bereits Risse und Abplatzungen im Außenputz erkennbar. Die Simulation betrachtet das ungestörte System, das heißt den homogenen Außenputz ohne Risse oder Abplatzungen. Treten hier bereits erhöhte Feuchteabgaben in die Raumluff auf, so kann für die reale Situation mit bewitterten Außenputzen davon ausgegangen werden, dass die Wasseraufnahme des Außenputzes und somit auch die Feuchteabgabe an die Raumluff noch höher ist.

In Abb. 50 ist der Wandaufbau der Bauteilsituation 1 dargestellt.

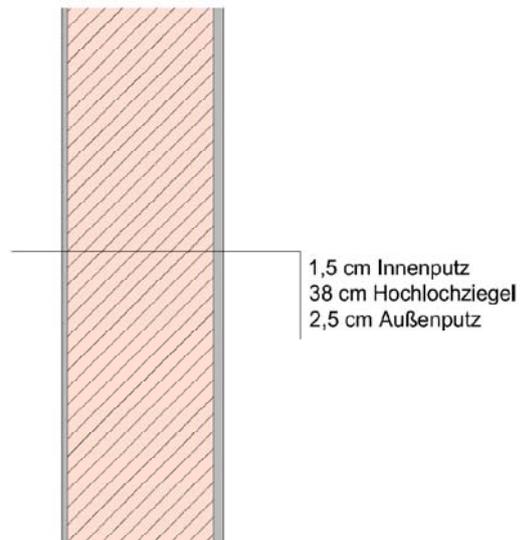


Abb. 50 – Bauteilsituation 1

Der innere Feuchteübergangskoeffizient wurde auf 0 gesetzt, um die Menge an Wasser auswerten zu können, die von außen zum Innenputz transportiert wird. Es findet somit kein Feuchteaustausch mit der Innenluft statt.

Die Materialeingabedaten wurden übernommen von den gemessenen Kennwerten unterschiedlicher Mörtel von Bednar [BED00] und wie folgt festgelegt.

Tab. 12 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 1

	ρ [kg/m ³]	u_F [kg/m ³]	s_0	p	λ [W/mK]	μ []
Innenputz	1720	260	$8,0 E^{+4}$	0,85	0,7	8
Hochlochziegel	1000	150	$5,0 E^{+6}$	1,00	0,5	30
Außenputz	1880	210	$9,0 E^{+5}$	0,54	0,8	10

Der Außenputz ist ein üblicher Kalkzementputz und weist einen Wasseraufnahmekoeffizienten von $3,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ und eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 10 auf. Dies entspricht der Klassifizierung „Außenputz ohne besondere Anforderungen an den Schlagregenschutz nach DIN 18550-1“ in der DIN 4108-3 [DIN01] und ist geeignet für die Beanspruchungsgruppe I (geringe Schlagregenbeanspruchung).

Die Ergebnisse der Simulation sind für den Außenputz und den Innenputz im Folgenden (Abb. 51 und Abb. 52) dargestellt.

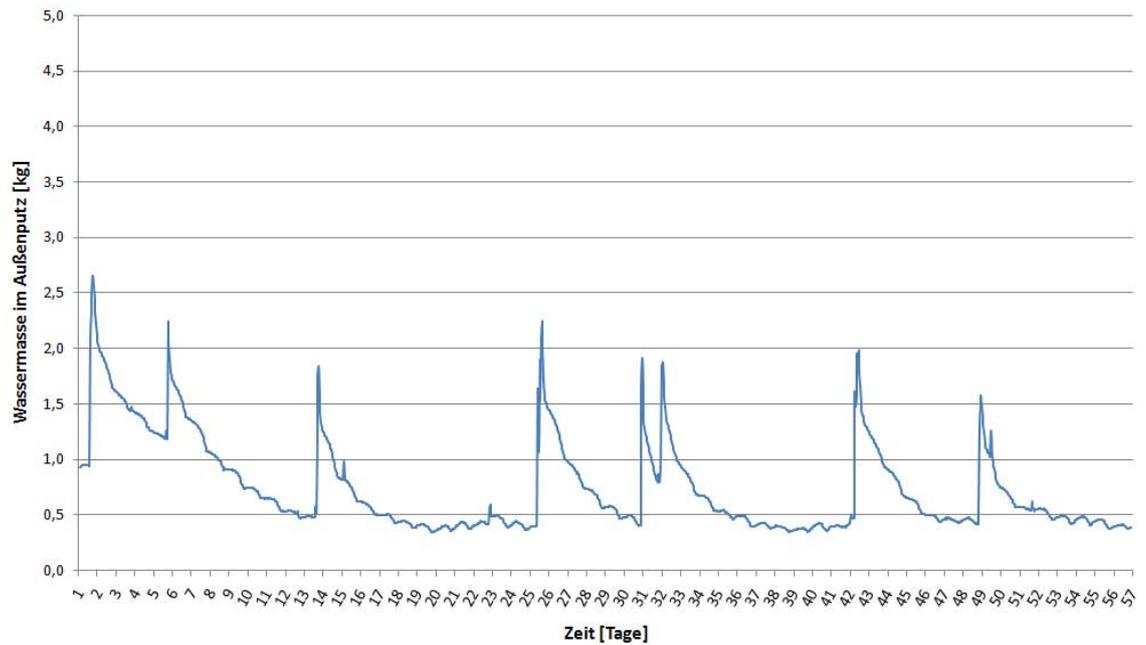


Abb. 51 – Bauteilsituation 1 – Verlauf der Wassermasse im Außenputz

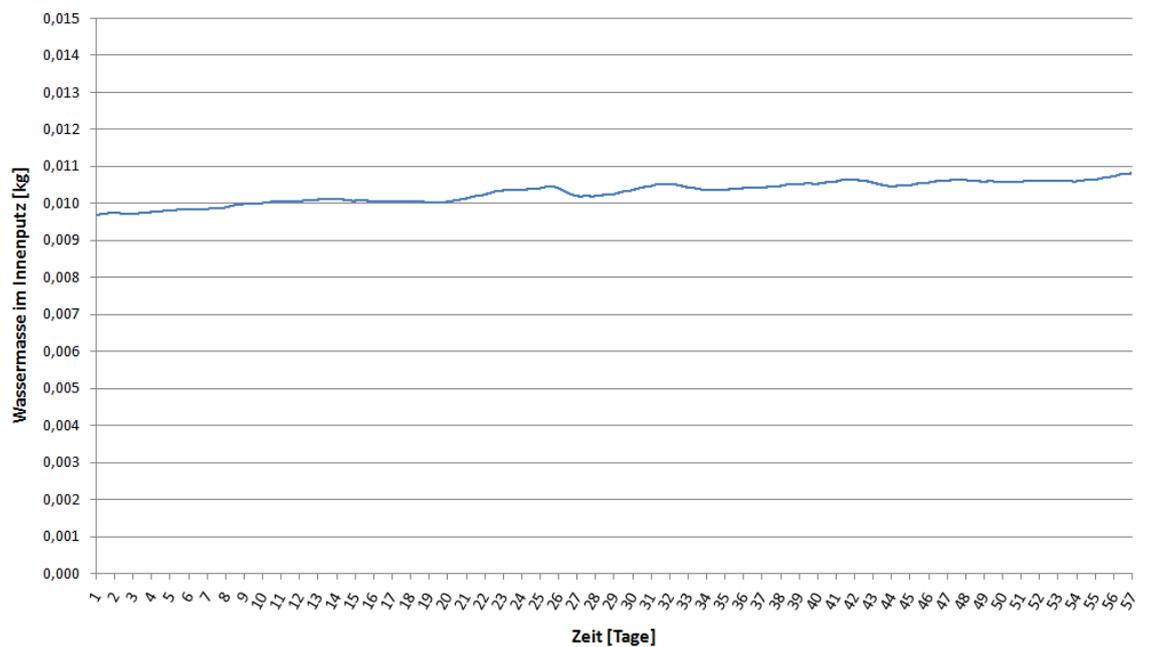


Abb. 52 – Bauteilsituation 1 – Verlauf der Wassermasse im Innenputz

Bei diesem Außenputz, der einen Wasseraufnahmekoeffizienten von $3,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ aufweist, ist die bis zum Innenputz transportierte Wassermenge so gering, dass eine relevante Erhöhung der Raumluftfeuchte unter normalen Bedingungen ausgeschlossen werden kann.

In einem Zeitraum von zwei Monaten erhöht sich der Feuchtegehalt des Innenputzes um $0,5 \text{ g/m}^2$. Beispielhaft kann somit für einen Raum mit einer Grundfläche von $4,0 \times 3,0 \text{ m}$ und einer Raumhöhe von $2,6 \text{ m}$ ausgesagt werden, dass sich die absolute Luftfeuchte im Raum um $0,17 \text{ g/m}^3$ Luft erhöht, wenn die erhöhte Feuchte im Innenputz an die Innenluft austrocknet. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass es keinen Luftaustausch mit anderen Räumen oder der Außenluft gibt.

5.3.2.2. Bauteilsituation 1a

Hier wird die Bauteilsituation dahingehend geändert, dass der Außenputz kein Kalk-Zement-Putz ist, sondern ein älterer Außenputz mit den Eigenschaften wie hydraulischer Kalkputz. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist somit $13,6 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 10. Eine weitere Berechnung wurde mit einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 20 durchgeführt. Dabei würde es sich um einen Außenputz handeln, der sehr dicht ist, jedoch durch Risse sehr viel Wasser aufnehmen kann. Das Wasser kann nur sehr langsam wieder an die Außenluft abgegeben werden und wird eher nach innen transportiert, als bei Putzen, bei denen die Feuchtigkeit schnell wieder nach außen abtrocknen kann.

Nachstehend sind die Materialeingabeparameter aufgelistet.

Tab. 13 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 1a

	ρ [kg/m ³]	u_F [kg/m ³]	s_0	p	λ [W/mK]	μ []
Innenputz	1720	260	$8,0 \text{ E}^{-4}$	0,85	0,7	8
Hochlochziegel	1000	150	$5,0 \text{ E}^{-6}$	1,00	0,5	30
Außenputz	1590	235	$7,0 \text{ E}^{-5}$	0,8	0,85	10 bzw. 20

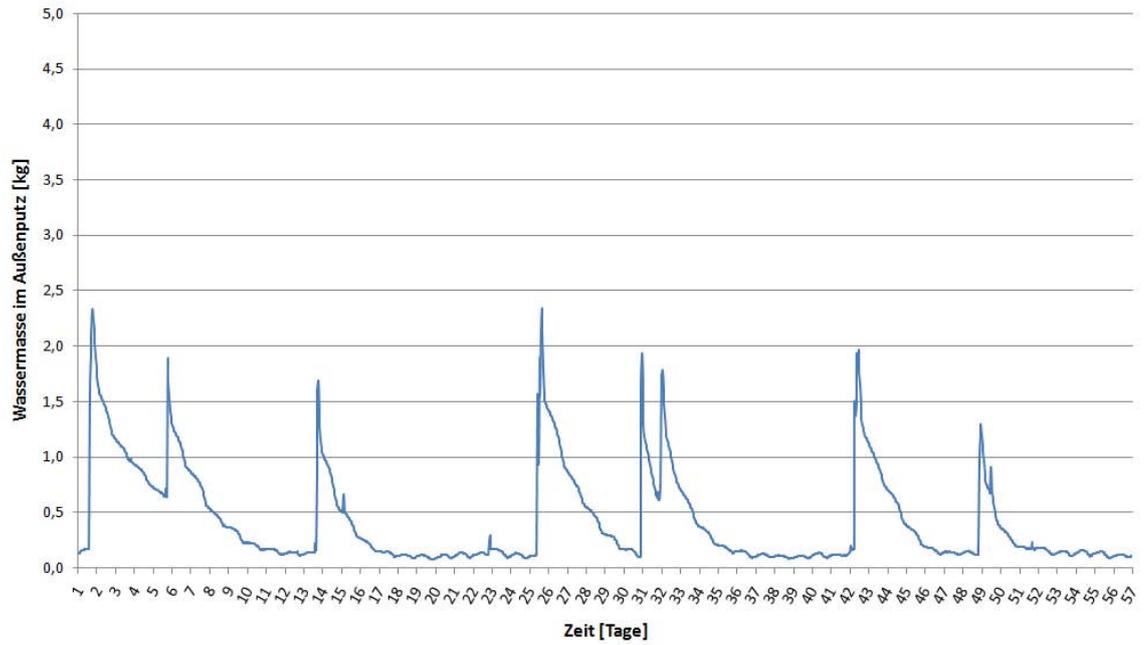


Abb. 53 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Außenputz (mit $\mu = 10$)

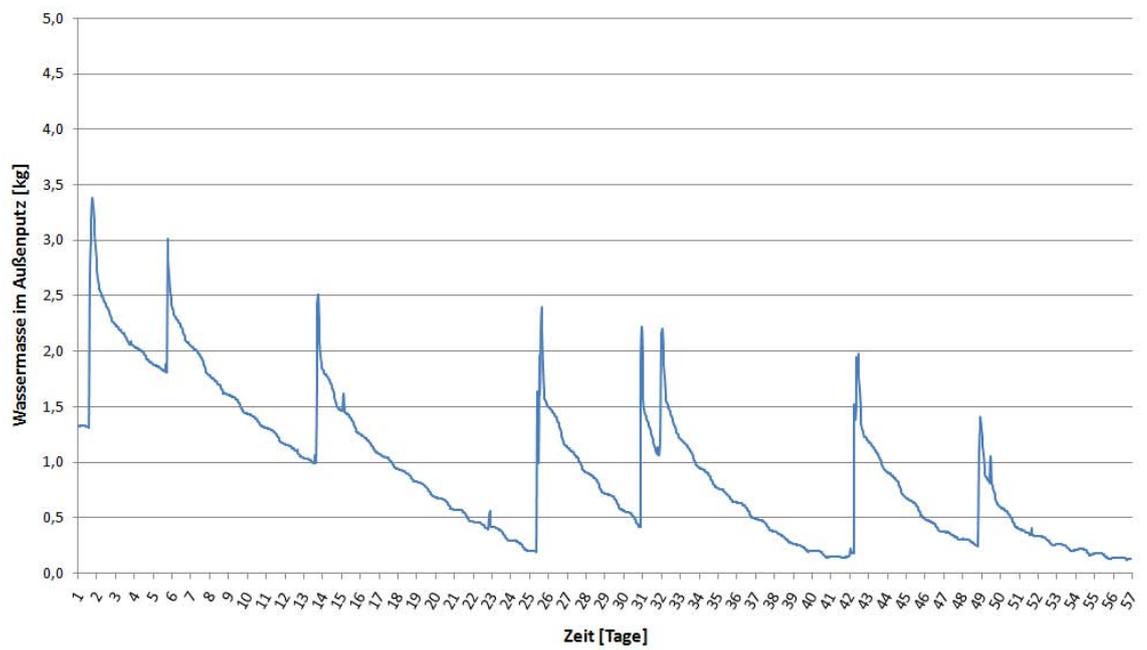


Abb. 54 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Außenputz (mit $\mu = 20$)

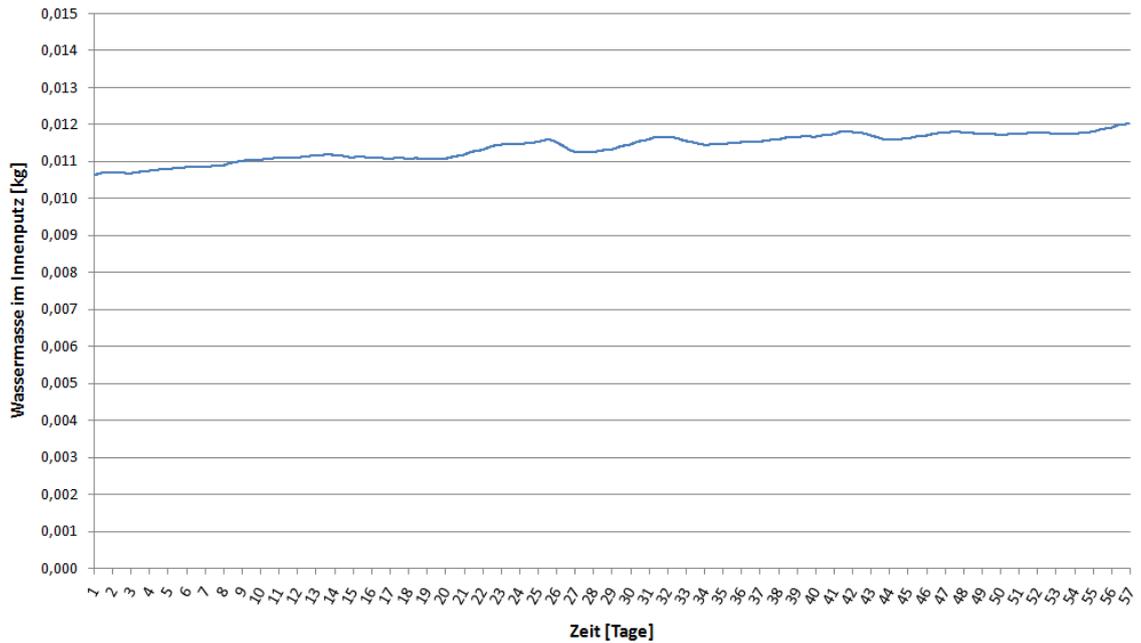


Abb. 55 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Innenputz (mit $\mu = 20$)

Generell ist die Wassermasse im Innenputz um rund 0,1 g höher als bei der Variante mit dem Kalk-Zement-Außenputz. Dies lässt nur darauf zurückzuführen, dass der Außenputz mehr Wasser aufnehmen kann und somit auch mehr Wasser bis zum Innenputz weitertransportiert wird. Es stellt sich generell ein höherer Feuchtegehalt als bei Bauteilsituation 1 ein.

Ein sehr deutlicher Unterschied ist beim Wassergehalt des Außenputzes mit einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 10 und von 20 erkennbar (Abb. 53 und Abb. 54). Bei einem μ von 10 trocknet der Außenputz nach einem Regenguss sehr schnell. Dagegen dauert es bei einem μ von 20 beinahe zwei Wochen, bis der Feuchtegehalt des Außenputzes sich dem Ausgleichsfeuchtegehalt wieder nähert.

5.3.2.3. Bauteilsituation 1b

Bei Bauteilsituation 1b wurden alle Eingabeparameter von Bauteilsituation 1a übernommen. Der einzige Unterschied ist, dass das Hochlochziegelmauerwerk durch einen etwas besser Feuchte leitenden massiveren Ziegel ersetzt wurde. Damit erreicht mehr Feuchtigkeit den Innenputz als mit den nur schwach Feuchte leitenden Hochlochziegeln.

In mehrgeschossigen Wohnbau werden für Außenwände meist schwerere Ziegel als für tragende Innenwände verwendet, da aufgrund der Anforderungen an den Schallschutz zwischen nebeneinander und übereinander liegenden Wohnungen die Schalllängsleitung mit schweren Ziegeln verringert werden muss. Gemäß ÖNORM B 8115-2 [ONO06a] muss zwischen Aufenthaltsräumen angrenzender Wohneinheiten eine Standard-Schallpegeldifferenz von $D_{nT,w} \geq 55$ dB eingehalten werden. Dies ist meist nur mit einem Außenwandziegel möglich, der eine flächenbezogene Masse von $m' \geq 250$ kg/m² aufweist.

Somit entspricht die Berechnung mit schwereren und stärker feuchteleitenden Ziegeln eher der Realität als die Berechnung mit leichten hochgebrannten Hochlochziegeln.

In den folgenden Abbildungen ist die Wassermasse im Außenputz und im Innenputz dargestellt.

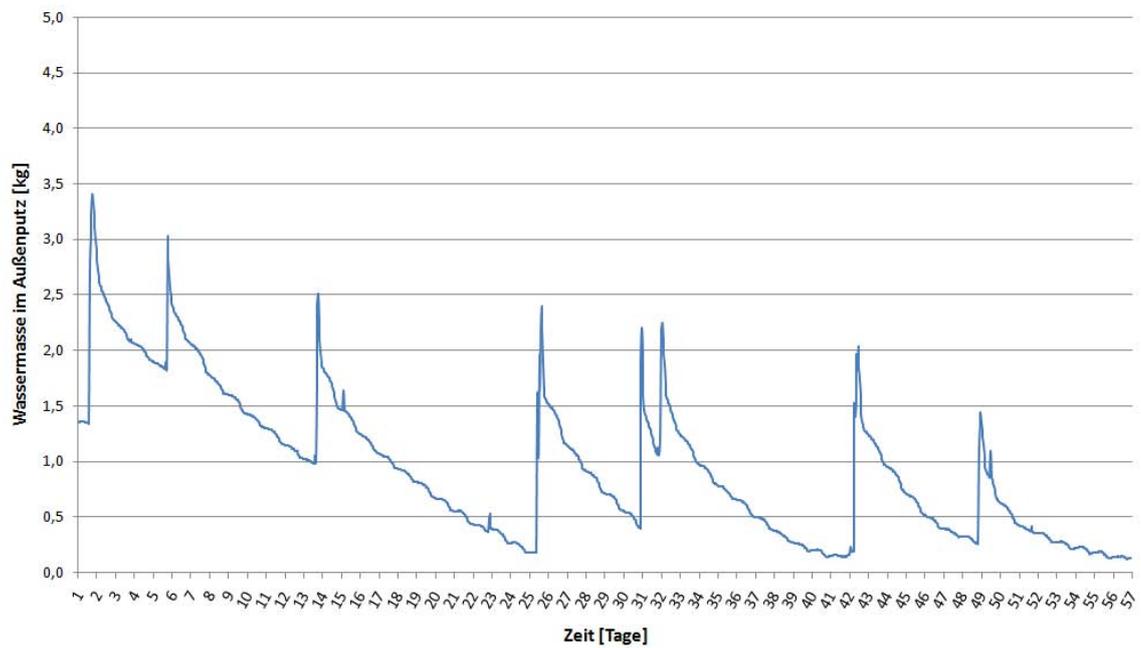


Abb. 56 – Bauteilsituation 1b – Verlauf der Wassermasse im Außenputz

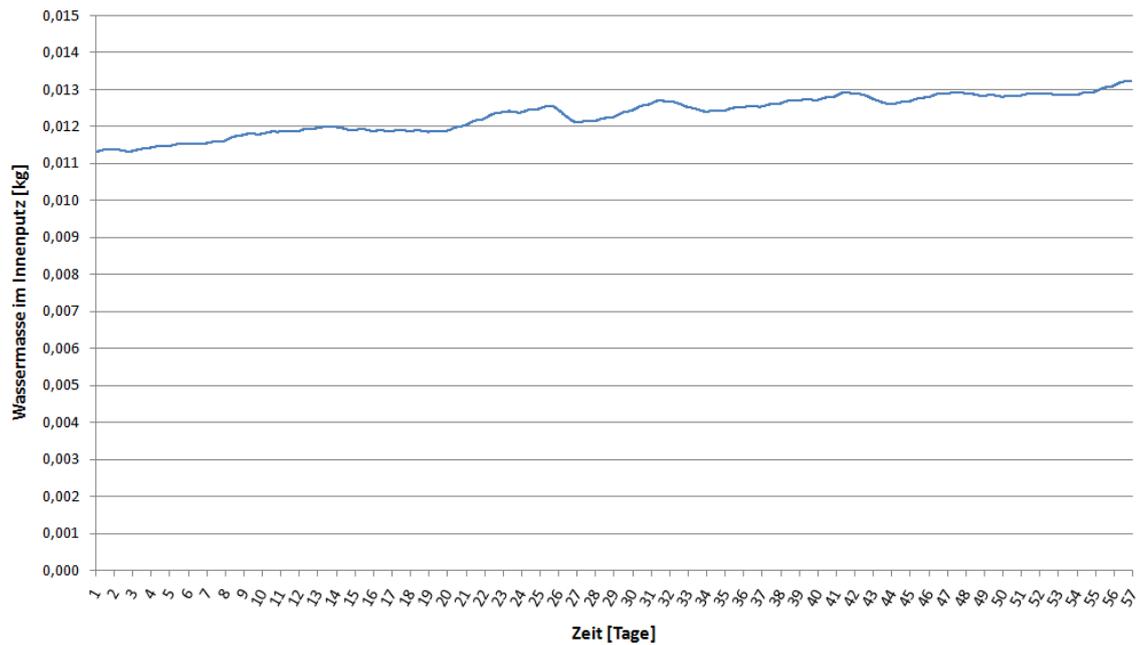


Abb. 57 – Bauteilsituation 1b – Verlauf der Wassermasse im Innenputz

In Abb. 57 ist zu erkennen, dass die Wassermasse im Innenputz innerhalb eines Monats um $1,5 \text{ g/m}^2$ ansteigt. Wird wieder das Beispiel mit einem Raum mit einer Grundfläche von $4,0 \times 3,0 \text{ m}$ und einer Raumhöhe von $2,6 \text{ m}$ herangezogen, bedeutet dies eine Erhöhung der absoluten Luftfeuchte im Raum um $0,5 \text{ g/m}^3$ Luft.

Hat etwa vorher die Raumluft eine relative Luftfeuchte von 45% bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, so erhöht sich durch den Feuchteeintrag von der Außenwand die relative Luftfeuchte auf 48% . Dies bedeutet, dass bei einer inneren Oberflächentemperatur von $\leq 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$, wie sie etwa in Außenecken oder hinter Möbeln vorkommen kann, eine relative Luftfeuchte an der Oberfläche von $\geq 80 \%$ herrscht.

5.3.2.4. Bauteilsituation 1c

Verschattet man nun die Außenwand durch Bäume oder ein anderes Gebäude, so ergeben sich folgende Feuchtegehalte des Innen- und Außenputzes:

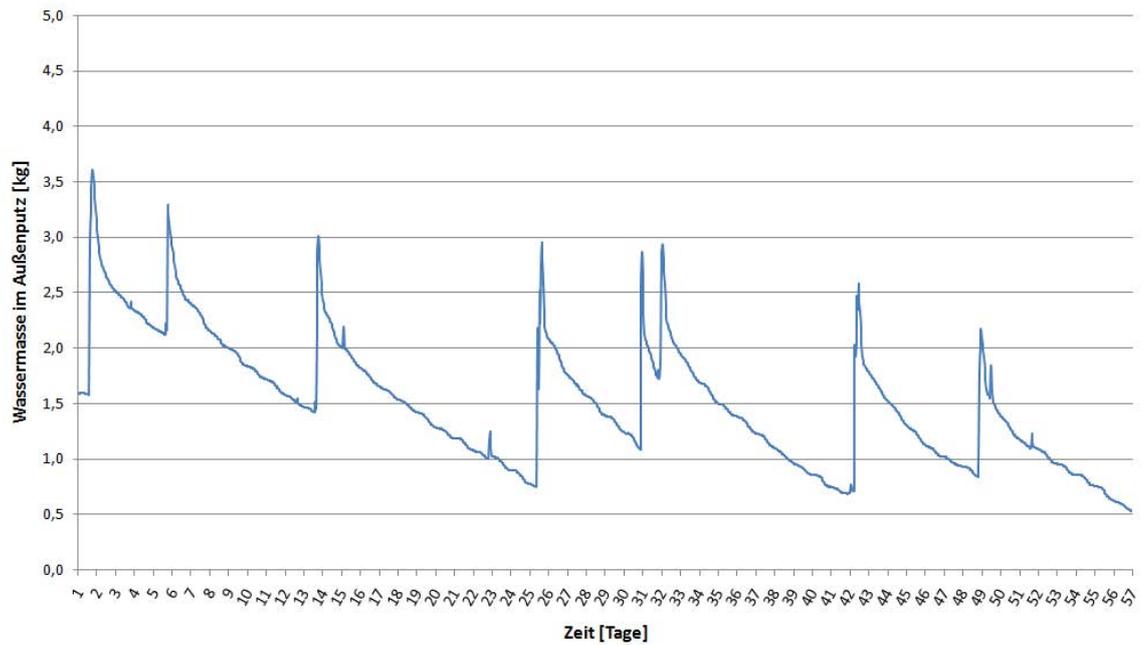


Abb. 58 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Außenputz

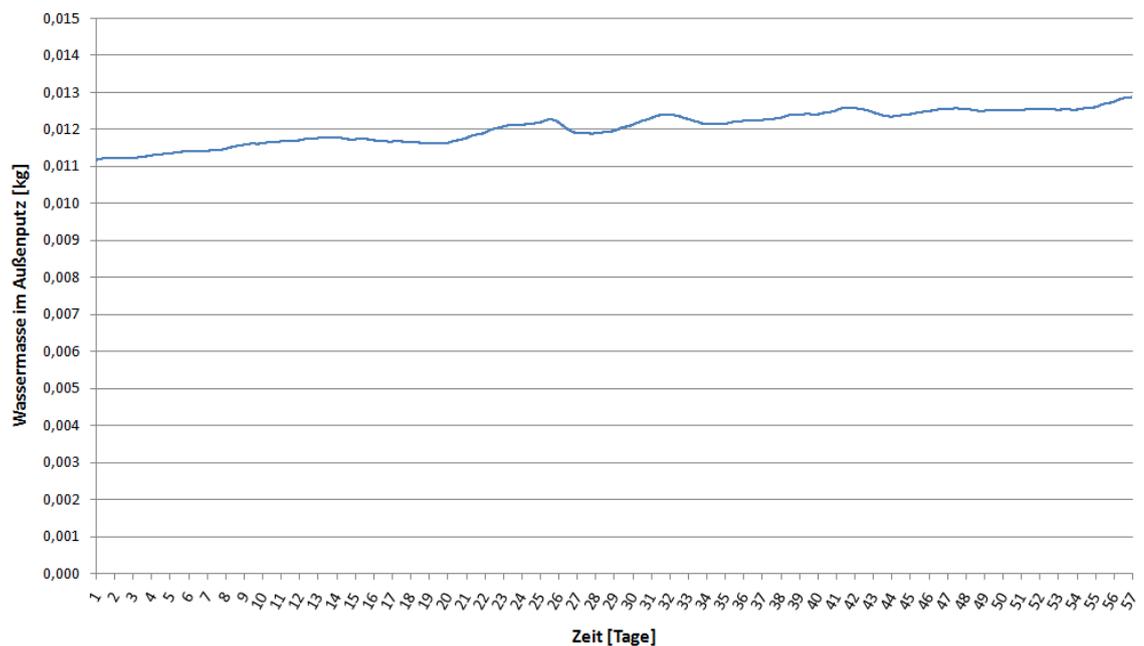


Abb. 59 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Innenputz

Im Vergleich zu Bauteilsituation 1 ergeben sich hier im Innenputz um $\approx 2,5 \text{ g/m}^2$ höhere Feuchtgehalte des Innenputzes. Würde diese erhöhte Feuchte in die Raumluft abtrocknen, würde dies bei einem Raum wie bereits oben beschrieben ($4,0 \times 3,0 \times 2,6 \text{ m}$) eine Erhöhung der absoluten Raumluftfeuchte von $\approx 0,85 \text{ g/m}^3$ Luft ergeben. Läge vorher die relative Luftfeuchte 45% bei einer Raumtemperatur von

20 °C, so würde sich diese auf 50 % erhöhen. Das heißt, dass bereits bei Oberflächentemperaturen von $\approx 12,5$ °C eine relative Luftfeuchte von 80 % herrscht. Bei einer relativen Luftfeuchte von 45 % wäre dies erst bei einer Oberflächentemperatur von $\approx 11,0$ °C der Fall.

Gemäß ÖNORM EN ISO 13788 [ONO02] besteht das Risiko des Schimmelbefalls bei einer relativen Feuchtigkeit von 80% über mehrere Tage.

In Abb. 60 ist die Sorptionsisotherme des Innenputzes dargestellt. Bei 45 % relativer Luftfeuchte liegt der Ausgleichsfeuchtegehalt bei $\approx 0,6$ kg/m³. Der berechnete Feuchtegehalt des Innenputzes liegt bei dieser Variante bei 0,87 kg/m³. Dieser Feuchtegehalt wäre der Ausgleichsfeuchtegehalt bei einer relativen Luftfeuchte von 60 %. So lange also der Wasserdampfpartialdruck in der Raumluft unter dem Wasserdampfpartialdruck im Innenputz liegt, trocknet der Innenputz nach innen ab.

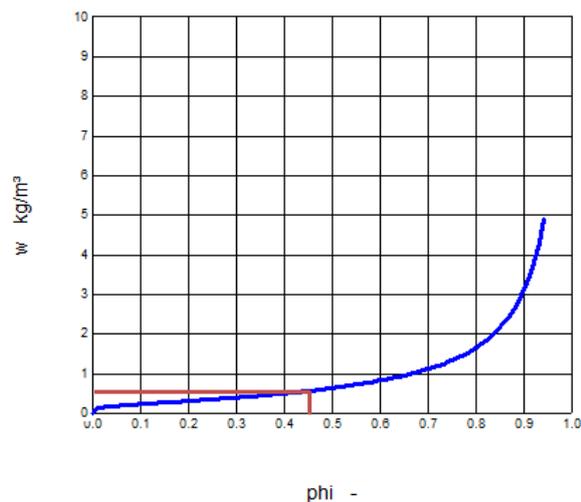


Abb. 60 – Sorptionsisotherme des Innenputzes

In Abb. 61 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenoberfläche innerhalb eines Jahres dargestellt. Die maximal auftretende relative Luftfeuchte beträgt ≈ 62 %.

Die Simulation wurde für die Mitte der Wand durchgeführt. Im Eckbereich des Gebäudes treten zusätzlich geometrische Wärmebrücken auf. Durch die Temperaturverminderung in diesen Bereichen erhöht sich die relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche weiter, wodurch Temperatur- und Feuchteverhältnisse vorhanden

sein können, die die Keimung und das Wachstum von Schimmel zulassen beziehungsweise fördern.

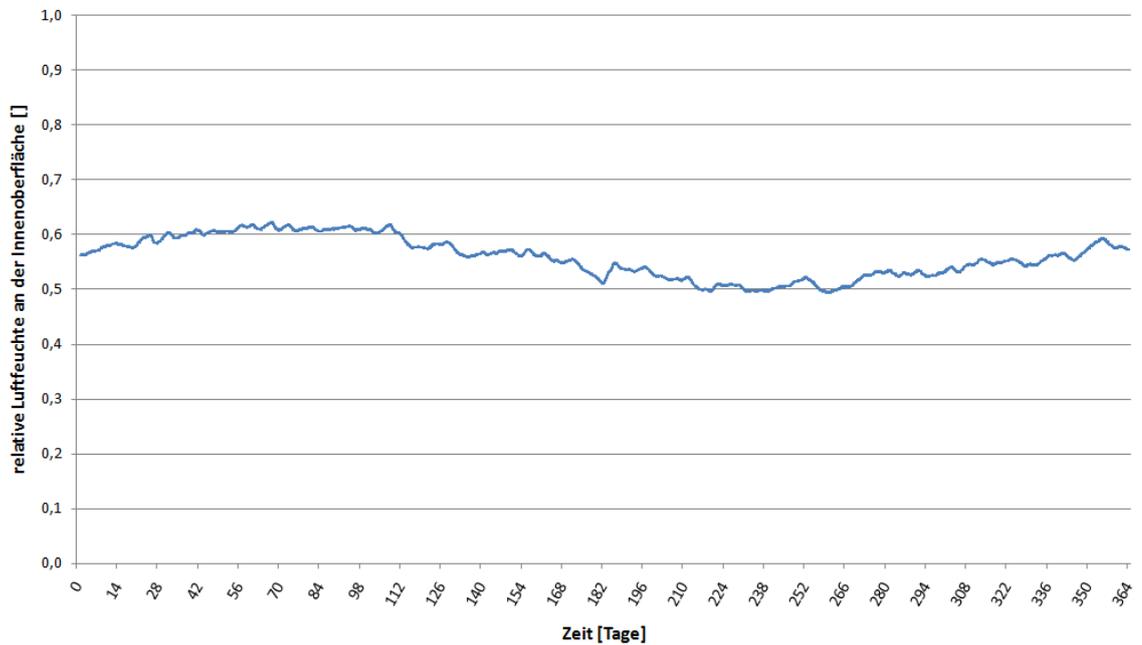


Abb. 61 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenoberfläche

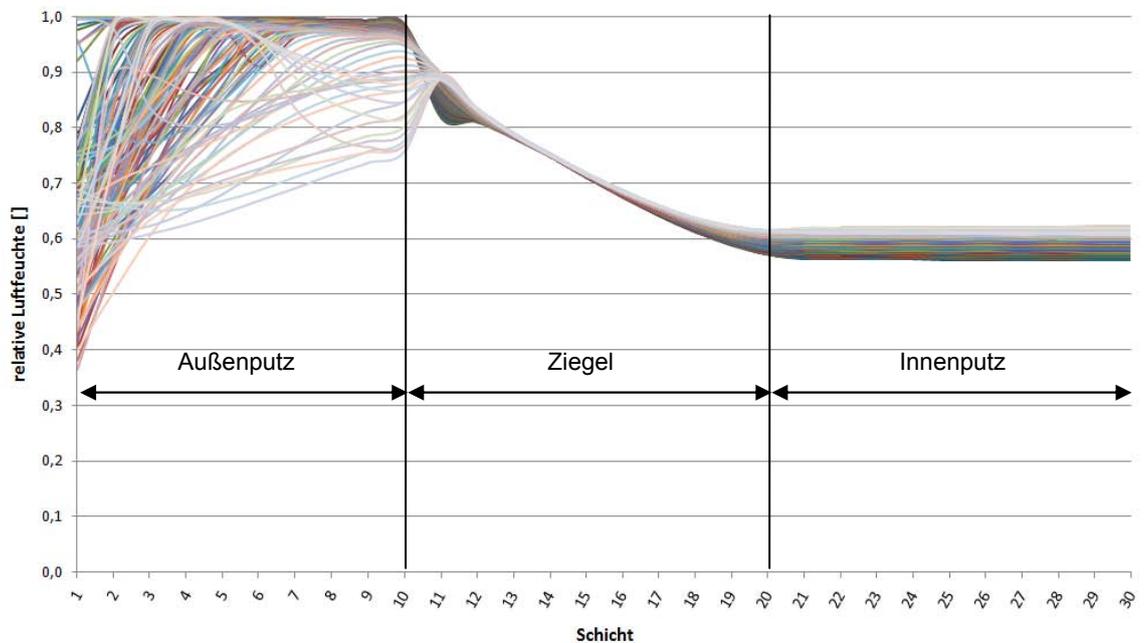


Abb. 62 – Bauteilsituation 1c – Wasserfalldiagramm für die relative Luftfeuchte (ohne Feuchteübergang innen)

Wird der Feuchteübergang an der Innenseite des Bauteils nicht auf Null gesetzt, hat auch die relative Luftfeuchte im Raum Einfluss auf den Feuchtegehalt des Innenputzes und somit auch auf den Feuchtegehalt des Ziegelmauerwerks. Im folgenden Diagramm ist das Wasserfalldiagramm für die relative Luftfeuchte über die Bauteilschichten mit Feuchteübergang an der Innenseite dargestellt.

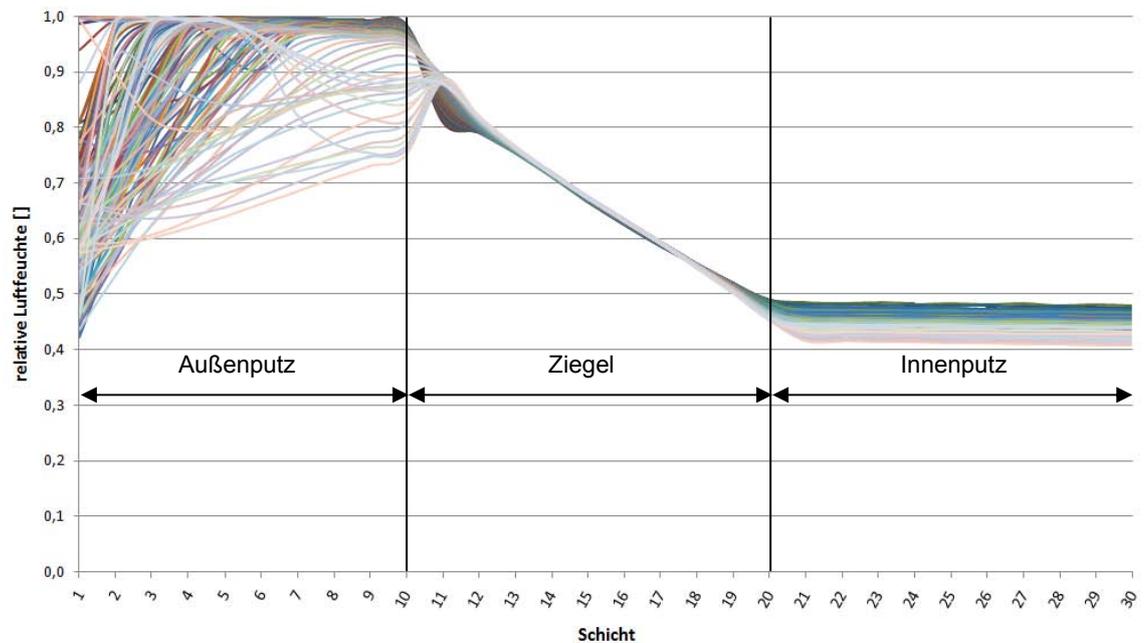


Abb. 63 – Bauteilsituation 1c – Wasserfalldiagramm für die relative Luftfeuchte (mit Feuchteübergang innen)

Sieht man sich den Verlauf der Gesamtwassermasse über 5 Jahre an, so erkennt man, dass der Feuchtegehalt kontinuierlich ansteigt. Die Wand kann durch die fehlende solare Strahlung nicht mehr ausreichend austrocknen.

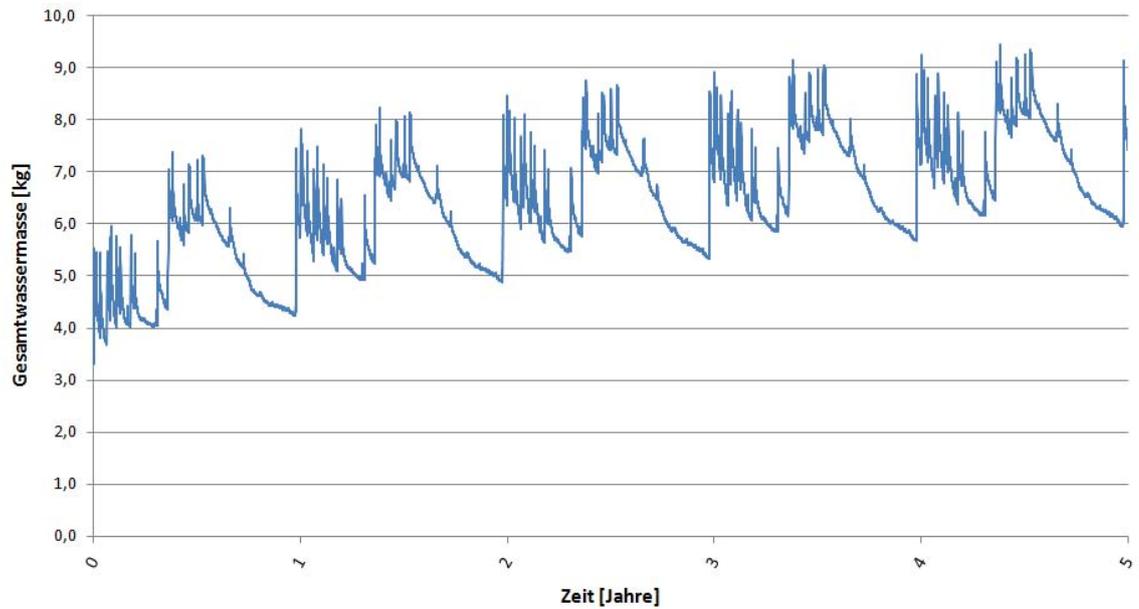


Abb. 64 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Gesamtwassermasse über fünf Jahre

Die Gesamtwassermasse der Außenwand steigt pro Quadratmeter auf über 8 kg. Diese Anreicherung von Feuchtigkeit in der Außenwand hat eine vermehrte Austrocknung an die Raumluft zur Folge. „Normales“ Lüftungsverhalten kann unter Umständen nicht mehr ausreichen, um die relative Luftfeuchte im Raum im Grenzbereich zu halten, der in der ÖNORM B 8110-2 Beiblatt 4 [ONO03a] festgelegt wurde, um physiologische oder bauphysikalische Nachteile zu vermeiden.

Betrachtet man im Vergleich dazu eine gleiche Außenwand, die nicht durch Schlagregen belastet aber verschattet ist, so stellt sich die Wassermasse im Außenputz und im Innenputz wie folgt dar.

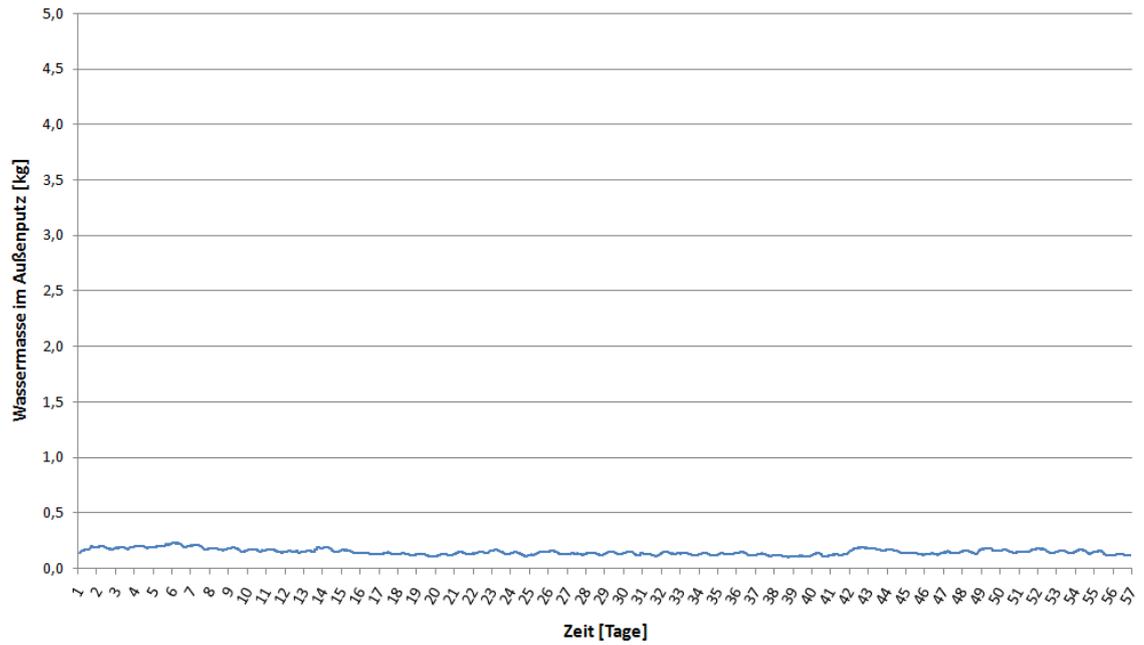


Abb. 65 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Außenputz ohne Schlagregen

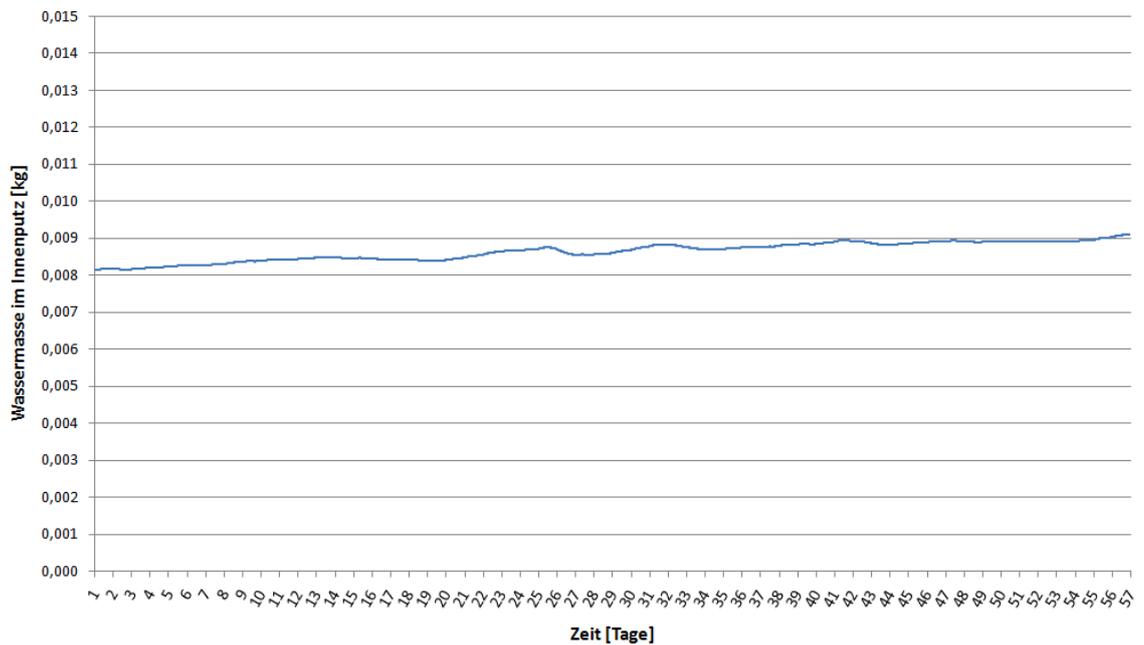


Abb. 66 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Innenputz ohne Schlagregen

Die Wassermasse im Innenputz liegt hier im Maximum bei rund $0,009 \text{ kg/m}^2$. Mit Schlagregen liegt das Maximum bei rund $0,012 \text{ kg/m}^2$, also rund 3 g/m^2 mehr als ohne Schlagregen.

5.3.2.5. Bauteilsituation 1d

In Bauteilsituation 1d wird der Innenputz durch eine Calciumsilikatplatte getauscht. Alle anderen Baustoffdaten wurden aus Bauteilsituation 1 übernommen. Der Außenputz ist somit ein Kalkzementputz mit einer Wasseraufnahmefähigkeit von $3,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ und das Mauerwerk aus einem modernen Hochlochziegel. Die solare Bestrahlung wurde jedoch wie in Bauteilsituation 1c auf Null gesetzt.

In Abb. 67 ist der Verlauf des Wassergehalts der Calciumsilikatplatte dargestellt.

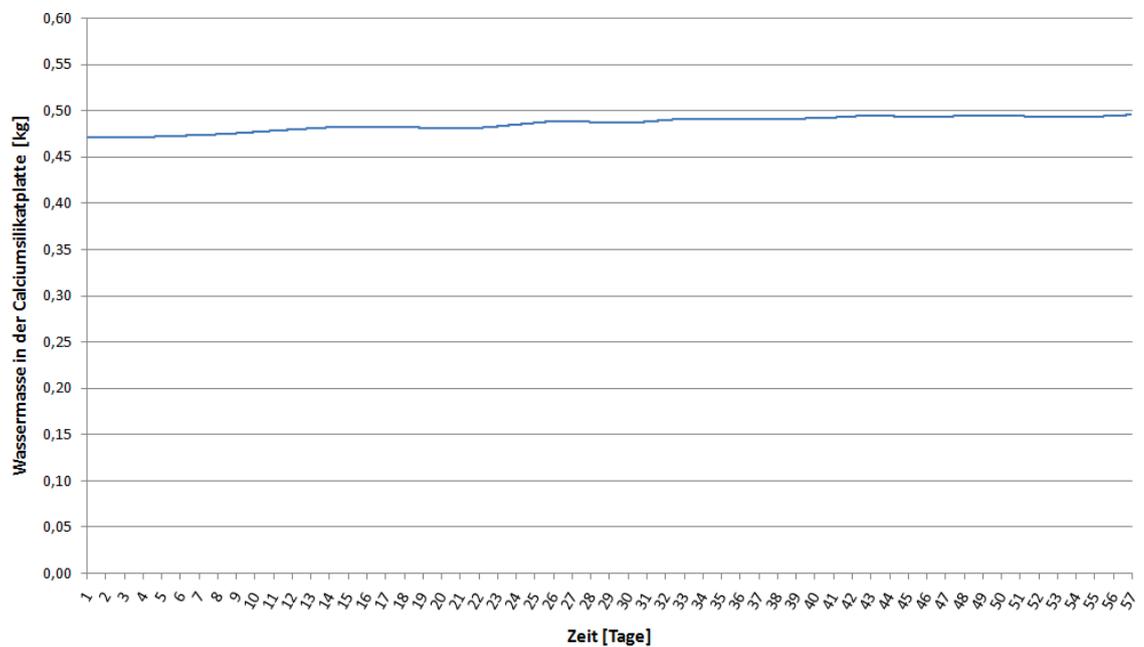


Abb. 67 – Bauteilsituation 1d – Verlauf der Wassermasse in der Calciumsilikatplatte

Aus der Sorptionsisotherme der verwendeten Calciumsilikatplatte ist ein Feuchtegehalt von $\approx 15 \text{ kg/m}^3$ bei 45 % relativer Luftfeuchte herauszulesen.

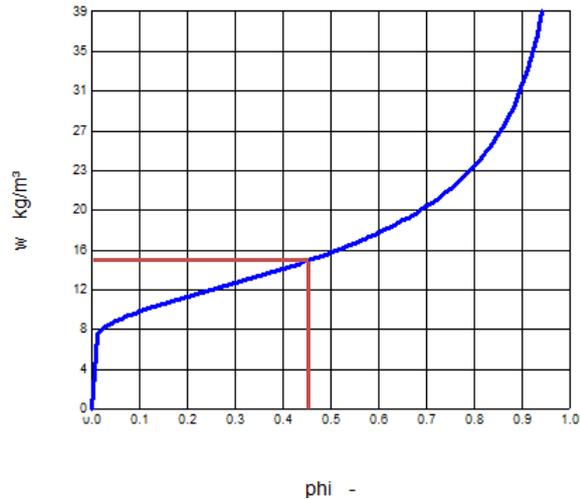


Abb. 68 – Sorptionsisotherme der verwendeten Calciumsilikatplatte

Die obige Berechnung ergibt für die Calciumsilikatplatte nach fünf Jahren einen maximalen Feuchtegehalt von $16,7 \text{ kg/m}^3$. Umgerechnet auf die 3 cm dicke Calciumsilikatplatte bedeutet dies einen um $0,05 \text{ kg/m}^2$ bzw. 50 g/m^2 über den Ausgleichsfeuchtegehalt bei 45% relativer Luftfeuchte erhöhten Feuchtegehalt. Ein Teil der Feuchte in der Calciumsilikatplatte trocknet somit in die Raumluft aus. So lange, bis der Wasserdampfpartialdruck in der Raumluft dem Wasserdampfpartialdruck in der Calciumsilikatplatte entspricht.

5.3.2.6. Bauteilsituation 2

Bauteilsituation 2 ist eine zweischalige Außenwand mit einem Kalk-Zement-Putz auf der äußeren Schale. Die äußere Ziegelschale besteht aus einem gut Feuchte leitenden Normalformatziegel. Zwischen den beiden Schalen befindet sich eine Dämmung aus Mineralwolle.

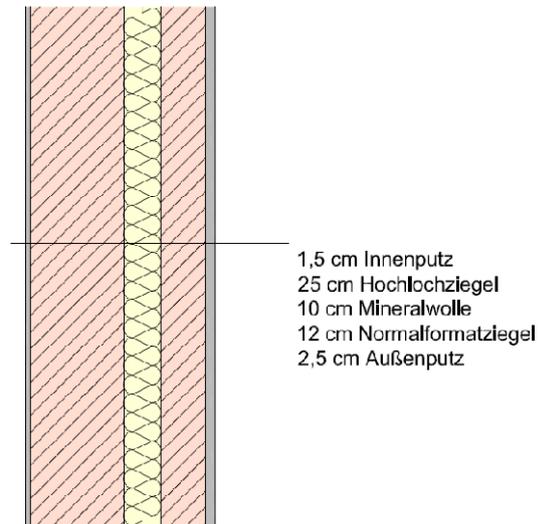


Abb. 69 – Bauteilsituation 2

Tab. 14 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 2

	ρ [kg/m ³]	u_F [kg/m ³]	s_0	p	λ [W/mK]	μ []
Innenputz	1720	260	$8,0 \text{ E}^{+4}$	0,85	0,7	8
Ziegel (äußere Schale)	1800	320	$1,0 \text{ E}^{+6}$	0,80	1,0	19
Mineralwolle	14,5	950	$1,0 \text{ E}^{+3}$	0,90	0,038 (bis 2,75 bei höheren Feuchtegehalten)	1
Außenputz	1880	210	$9,0 \text{ E}^{+5}$	0,54	0,8	10

Der Außenputz ist wie in Bauteilsituation 1 ein üblicher Kalkzementputz und weist einen Wasseraufnahmekoeffizienten von $3,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ und eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 10 auf.

Im Folgenden wird der Verlauf der Wassermasse im Außenputz und in der äußeren Ziegelschale dargestellt.

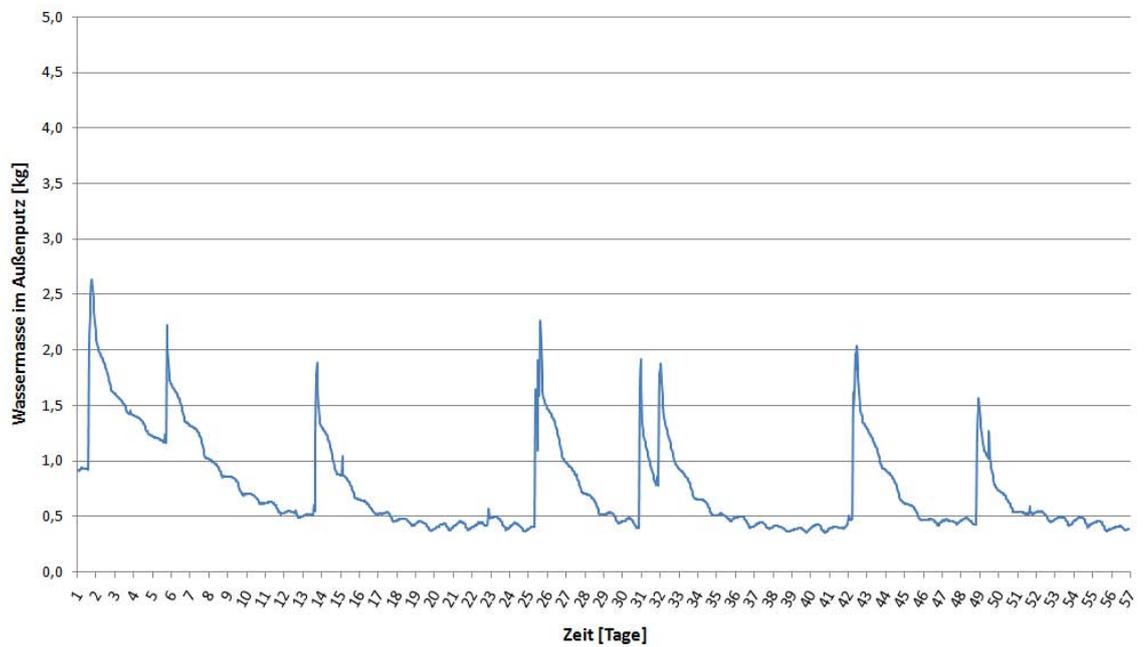


Abb. 70 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der Wassermasse im Außenputz

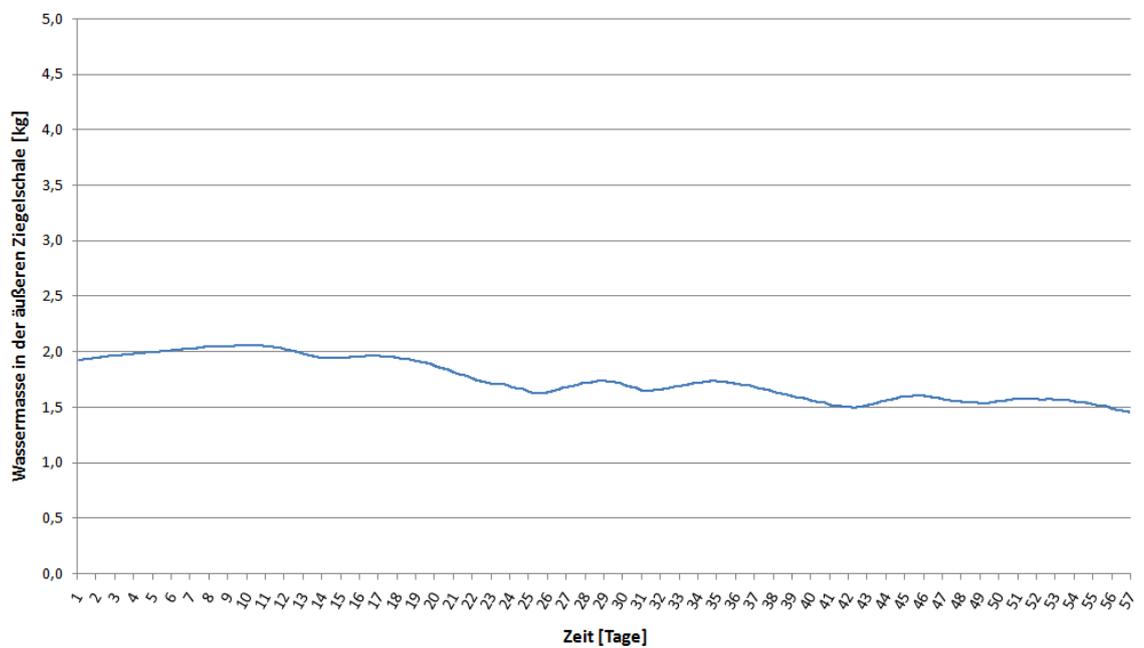


Abb. 71 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der Wassermasse in der äußeren Ziegelschale

Die äußere Ziegelschale ist stark durchfeuchtet. In Abb. 72 ist die Sorptionsisotherme der äußeren Ziegelschale dargestellt. Bei einer relativen Luftfeuchte von 45 % liegt der Ausgleichsfeuchtegehalt bei $\approx 7,5 \text{ kg/m}^3$.

In der äußeren Ziegelschale kann laut der hygrothermischen Simulation eine Wassermasse von bis zu 25 kg/m^3 auftreten.

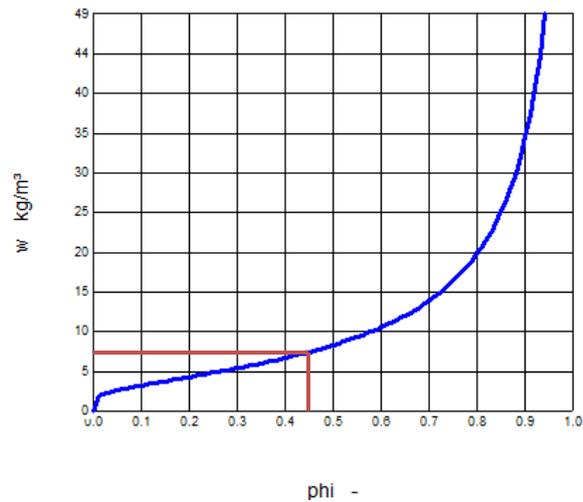


Abb. 72 – Sorptionsisotherme der äußeren Ziegelschale

Damit herrscht im Bereich der Dämmung zwischen den beiden Ziegelschalen ständig eine relative Luftfeuchte von 60 bis knapp 90 %. Durch Konvektion durch Hohlräume oder durch Diffusion kann somit Feuchtigkeit in den Raum gelangen.

In Abb. 73 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenseite der äußeren Ziegelschale über ein Jahr dargestellt.

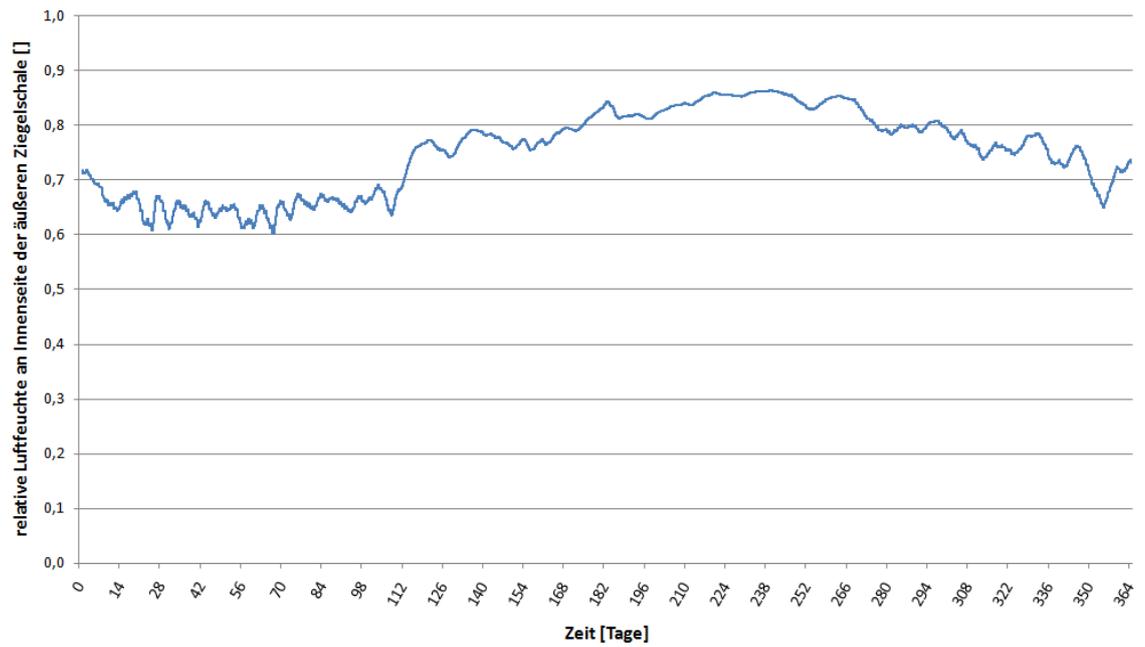


Abb. 73 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenseite der äußeren Ziegelschale

5.3.2.7. Bauteilsituation 3

Für die dritte Bauteilsituation werden alle Daten aus Bauteilsituation 1 übernommen. Raumseitig ist die Wand jedoch nicht verputzt, sondern mit einer Gipskartonvorsatzschale mit 5 cm Mineralwolle verkleidet.

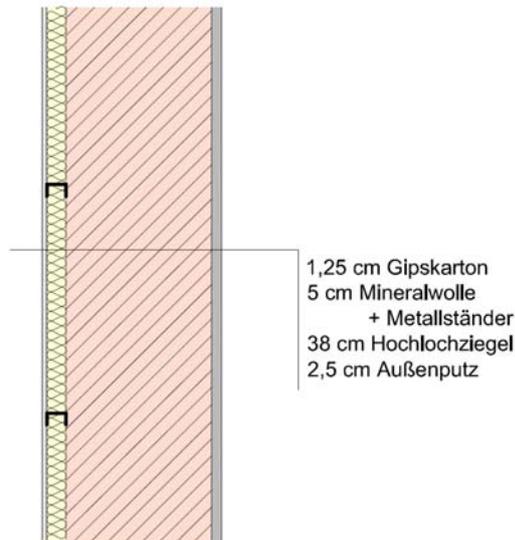


Abb. 74 – Bauteilsituation 3

Die Materialdaten für die Gipskartonplatte wurden der MASEA-Materialdatenbank [MAS11] entnommen. Der Außenputz ist der gleiche Kalkzementputz wie in Bauteilsituation 1 und hat eine Wasseraufnahmefähigkeit von $3,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$.

Tab. 15 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 3

	ρ [kg/m ³]	u_F [kg/m ³]	s_0	p	λ [W/mK]	μ []
Gipskarton	732	353	$1,8 \text{ E}^{+5}$	0,73	0,21	6.8
Mineralwolle	14,5	950	$1,0 \text{ E}^{+3}$	0,90	0,038 (bis 2,75 bei höheren Feuchtegehalten)	1
Ziegel	1800	320	$1,0 \text{ E}^{+6}$	0,80	1,0	19
Außenputz	1880	210	$9,0 \text{ E}^{+5}$	0,54	0,8	10

In Abb. 75 ist die Wassermasse im Hochlochziegel dargestellt.

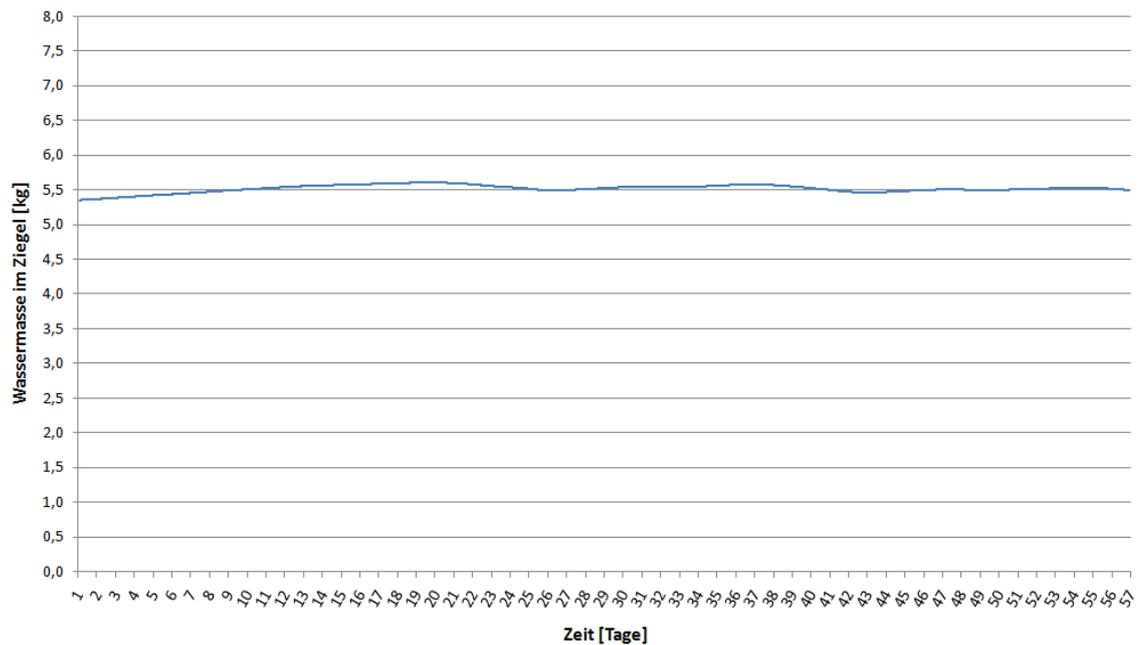


Abb. 75 – Bauteilsituation 3 – Verlauf der Wassermasse im Ziegel

Wie bereits oben beschrieben, liegt der Ausgleichsfeuchtegehalt des Mauerwerks bei einer relativen Luftfeuchte von 45 % bei $\approx 7,5 \text{ kg/m}^3$. In Abb. 75 ist erkennbar, dass die Wassermasse im Mauerwerk nach fünf Jahren bei rund $5,5 \text{ kg/m}^2$ liegt. Umgerechnet auf m^3 hat das Ziegelmauerwerk somit einen Feuchtegehalt von $\approx 14,5 \text{ kg/m}^3$, also den doppelten Wert als der Ausgleichsfeuchtegehalt bei 45 % relativer Luftfeuchte. Im Verlauf über fünf Jahre wird zudem deutlich, dass der Feuchtegehalt nach und nach ansteigt und bei $14,5 \text{ kg/m}^3$ noch lange nicht das Maximum des Feuchtegehalts erreicht war.

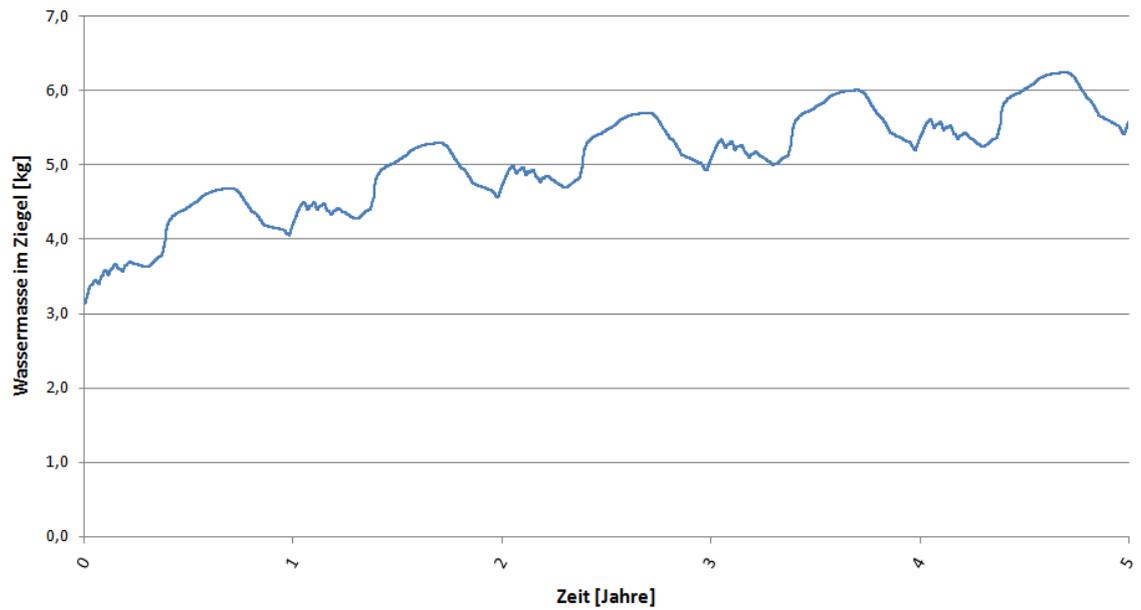


Abb. 76 – Bauteilsituation 3 – Verlauf der Wassermasse im Ziegel über fünf Jahre

Bei diesem Wandaufbau besteht zudem das Problem, dass durch die Mineralwolle und die Gipskartonplatte die Feuchte im Mauerwerk nur sehr schwer in den Raum austrocknen kann, der Feuchtegehalt im Mauerwerk also noch schneller ansteigt als bei der Variante mit Innenputz. Hinter der Gipskartonplatte wird sich somit nach einiger Zeit Schimmel bilden.

6. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Möglichkeit der Simulation von hygrothermischen Vorgängen in Außenwänden, welche mit Schlagregen belastet sind, dargestellt. Die am Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien durchgeführten Schlagregelmessungen wurden ausgewertet und mit den Berechnungen verglichen. Voraussetzung für die Berechnungen ist, dass die Wetterdaten zumindest mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten vorhanden sind. Es zeigte sich, dass man sowohl mit auf Schlagregen umgerechneten Normalregendaten als auch mit gemessenen Schlagregendaten auf Ergebnisse kommt, welche in einigen Bereichen sehr gut, in einigen Bereichen jedoch kaum mit den Messergebnissen übereinstimmen. Es sind somit weitere Untersuchungen nötig, um die Wasseraufnahme bei Schlagregen und die darauffolgende Trocknung mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm HAM3D korrekt darstellen zu können.

Bei der Umrechnung von Normalregendaten auf Schlagregendaten ist es wichtig, dass der Fassadenfaktor ausreichend exakt bestimmt werden kann. Dies kann entweder durch umfangreiche CFD-Simulationen oder durch Vergleiche mit ähnlichen Situationen aus der vorhandenen Literatur geschehen. Des Weiteren sollten die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens 10 Minuten vorhanden sein.

Für die Simulation von Bauteilsituationen ist es besonders wichtig, die Eigenschaften der verwendeten Materialien – besonders den Wasseraufnahmekoeffizienten, den Wassergehalt bei freier Sättigung sowie die Wasserdampfdiffusion – sehr genau zu kennen. Ist es nicht möglich, diese Werte durch Tabellenwerke oder vom Hersteller in Erfahrung zu bringen, so kann die Bestimmung dieser Parameter durch Versuche sinnvoll sein. Auch die Prüfung der Außenputze vor Ort mit dem Karstensen Prüfröhrchen oder mit ähnlichen Methoden kann zur Abschätzung der Wasseraufnahmefähigkeit des Putzes verwendet werden.

Die Berechnungen der monolithischen Ziegelwand ohne Wärmedämmverbundsystem zeigten, dass bei Fassaden die besonnt sind, die bei Schlagregen aufgenommene Feuchtigkeit sehr schnell wieder nach außen abtrocknen kann, bevor sie nach innen weitergeleitet wird. Ist die Fassade jedoch verschattet, kann das aufgenommene Wasser nur sehr langsam abtrocknen. Ein großer Teil wird zum Ziegel weitergeleitet und langsam zum Innenputz transportiert, wo die Feuchtigkeit bei

entsprechender Wasserdampfdruckdifferenz in die Raumlufte abtrocknet. Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenoberfläche kann laut den Berechnungen im Zuge dieser Arbeit in der Mitte der Wand bis über 60 % betragen. Berechnet wurden nur zweidimensionale Bauteilsituationen. Durch geometrische Wärmebrücken in Außenecken steigt die relative Luftfeuchtigkeit in diesen Bereichen noch weiter an, wodurch dort 80% relative Luftfeuchte erreicht werden können. Gemäß ÖNORM EN ISO 13788 [ONO02] besteht das Risiko des Schimmelbefalls bei einer relativen Feuchtigkeit von 80% über mehrere Tage.

Auch wenn Möbel vor der Wand aufgestellt werden, kann es durch die verminderte Konvektion an der Wandoberfläche zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur kommen, was die relative Luftfeuchte weiter erhöht.

Besonders stark tritt somit dieses Problem bei einer längeren Abwesenheit der Bewohner auf oder wenn die Wohnung nur sehr selten genutzt wird. Ohne dass vom Nutzer Feuchtigkeit produziert wird, steigt die Raumlufffeuchte durch die Austrocknung aus der Außenwand ständig an. Ein Lüften des Raums ist bei Abwesenheit der Bewohner ohne eine Lüftungsanlage nicht oder nur sehr schwer möglich. Damit kann es auch ohne Feuchteproduktion wie Duschen, Kochen, etc. zu einem kritischen Innenraumklima kommen.

In den letzten Jahren treten häufig Schimmel- und Kondensatprobleme in Gebäuden mit Ziegelwänden ohne Wärmedämmverbundsystem auf. Untersuchungen haben gezeigt, dass häufig keine unzulässigen Wärmebrücken im Sinne der ÖNORM B 8110-2 [ONO03b] vorhanden sind und vor den betreffenden Stellen keine Möbel stehen. Der Grund für die Schimmelbildung kann somit nur eine erhöhte Raumlufffeuchte oder eine erhöhte Feuchte im Innenputz sein. Untersuchungen in Bezug auf die Schlagregenbelastung und die Beschattung der Außenwand können dann zu einer möglichen Erklärung für die Schimmel- und Kondensatbildungen führen.

Auch Abuku [ABU09a] stellte durch hygrothermische Simulationen fest, dass Schlagregen einen signifikanten Einfluss auf das Schimmelwachstum auf Innenoberflächen, speziell in Außeneckbereichen, haben kann. Des Weiteren stellte er fest, dass Schlagregen eine erkennbare Erhöhung der Innenlufffeuchte und des Energieverbrauchs für die Beheizung des Raums bewirkt.

In den letzten Jahren wird Außenputz auf monolithischem Ziegelmauerwerk ohne Wärmedämmverbundsystem meist mit einer Putzarmierung ausgeführt. Der Grund

dafür könnte sein, dass nach einigen Jahren häufig sehr kleine Risse in der Putzoberfläche entstehen können, die in der Summe jedoch ausreichend Wasser aufnehmen können, um die Feuchte im Mauerwerk zu erhöhen.

Risse mit einer Breite von weniger als 0,2 mm sind gemäß ÖNORM B 3346 [ONO06] zulässig. Eine größere Anzahl oder eine Konzentration von Rissen ist zulässig, wenn die technologischen bzw. bauphysikalischen Eigenschaften des Putzes nicht beeinträchtigt werden [ONO06]. Durch Putzarmierungen kann die Rissbildung jedoch weitgehend verhindert werden. Zudem sind neuere Putzsysteme sehr dicht und das durch Risse aufgenommene Wasser kann nur sehr schwer wieder nach außen abtrocknen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden nur die Auswirkungen der Randbedingungen auf die Außenwand untersucht. Um die genauen Auswirkungen von Schlagregen auf das Innenraumklima feststellen zu können, wären zusätzliche Untersuchungen nötig, bei denen die Feuchteabgabe in den Raum und das Verhalten des Nutzers simuliert werden können. Des Weiteren sollten dreidimensionale Bauteilsituationen untersucht werden und mit den realen Vorgängen an Bauwerken verglichen werden.

7. Verzeichnisse

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 – Darstellung der Anforderungen für wasserabweisende Außenputze gemäß DIN 4108-3 [DIN01]	6
Abb. 2 – Klassifizierung von Mörtel nach der ÖNORM EN 998-1 [ONO10]	8
Abb. 3 – Klassifizierung von Putzmörtel nach der ÖNORM B 3340 [ONO99].....	9
Abb. 4 – Beurteilung der Saugfähigkeit von Putzen nach der Form des aufgetragenen Tropfens [KÜN94].....	10
Abb. 5 – Sorptionsisotherme für hydraulischen Kalkputz	13
Abb. 6 – Absorptions- und Desorptionsisothermen von vier häufig verwendeten Baustoffen [KÜN82].....	14
Abb. 7 – lineare Verbindung von drei Stützstellen (rot) und die daraus approximierten Sorptionsisotherme für hydraulischen Kalkputz (blau)	15
Abb. 8 – Sorptionsisothermen für unterschiedliche Baustoffe [LUT02]	16
Abb. 9 – Schlagregen trifft Bauteil	19
Abb. 10 – Schematische Darstellung der Messanlage der K.U. Leuven, Belgien, (a) Ansicht, (b) Schnitt [ABU09].....	21
Abb. 11 – Schlagregensmessanlage des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen	22
Abb. 12 – Schlagregensmessanlage für Außenputze des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen.....	23
Abb. 13 – Isoplethendiagramm für Sporenauskeimung der Schimmelpilze <i>Aspergillus restrictus</i> (links) und <i>Aspergillus versicolor</i> (rechts) [SMI82].....	29
Abb. 14 – verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung und Myzelwachstum für die Substratgruppen I und II [SED01]	32
Abb. 15 – Orthofoto des Messstandortes [WIE10 - bearbeitet]	35
Abb. 16 – Schlagregensmessstelle an der Nordwestfassade des Laborgebäudes des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien	36
Abb. 17 – Häufigkeit der Windrichtung am Standort der Schlagregensmessstelle	36
Abb. 18 – Ventil für Wasserablauf aus der Auffangwanne	37
Abb. 19 – Schlagregensmessstelle mit hochgeklappter Metallverblendung	38
Abb. 20 – Lufttemperatur vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	39
Abb. 21 – relative Luftfeuchte vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010.....	39
Abb. 22 – absolute Luftfeuchte vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010.....	40
Abb. 23 – Windgeschwindigkeit vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	40
Abb. 24 – Direktstrahlung vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	41
Abb. 25 – Diffusstrahlung vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	41
Abb. 26 – Normalregen vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	42
Abb. 27 – Windfaktor vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	43
Abb. 28 – Schlagregen vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	44
Abb. 29 – Gewicht der Calciumsilikatplatte durch Wasseraufnahme vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	45
Abb. 30 – Gewicht des hydraulischen Kalkputzes durch Wasseraufnahme vom 24.06.2009 bis zum 24.06.2010	45

Abb. 31 – Messung der Wasseraufnahme, links: Calciumsilikatplatte, rechts: hydraulischer Kalkputz.....	47
Abb. 32 – Kurve der Wasseraufnahme der Calciumsilikatplatte (aus Messung 1).....	48
Abb. 33 – Kurve der Wasseraufnahme der Calciumsilikatplatte (aus Messung 2).....	49
Abb. 34 – Kurve der Wasseraufnahme des hydraulischen Kalkputzes (aus Messung 1).....	49
Abb. 35 – Kurve der Wasseraufnahme des hydraulischen Kalkputzes (aus Messung 2).....	50
Abb. 36 – Ablauf der hygrothermischen Simulation am Beispiel WUFI [KÜN94a].....	51
Abb. 37 – Eingabedaten für die Calciumsilikatplatte	53
Abb. 38 – Auszug aus der Wetterdatei für die vordere Seite.....	54
Abb. 39 – Auszug aus der Wetterdatei für die hintere Seite.....	54
Abb. 40 – Gesamtwassergehalt [kg] der Calciumsilikatplatte beim realen Aufsaugversuch (rot) und bei der Simulation (blau)	57
Abb. 41 – Gesamtwassergehalt [kg] des hydraulischen Kalkputzes beim realen Aufsaugversuch (rot) und bei der Simulation (blau)	57
Abb. 42 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf B	59
Abb. 43 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf C	60
Abb. 44 – Verlauf des Gesamtgewichts der Calciumsilikatplatte für Durchlauf D	61
Abb. 45 – Verlauf des Gesamtgewichts des hydraulischen Kalkputzes.....	62
Abb. 46 – Weg der Feuchtigkeit beim Austrocknen des Baustoffs (Rechenpunkte in der Mitte der Schicht).....	63
Abb. 47 – Weg der Feuchtigkeit beim Austrocknen des Baustoffs (Rechenpunkt der ersten Schicht am Rand).....	64
Abb. 48 – Auswirkung der einzelnen Eingabeparameter auf das Ergebnis einer 80-tägigen Bewitterung von Sander Sandstein [BED00].....	65
Abb. 49 – Auszug aus der Wetterdatei für innen	67
Abb. 50 – Bauteilsituation 1	68
Abb. 51 – Bauteilsituation 1 – Verlauf der Wassermasse im Außenputz	69
Abb. 52 – Bauteilsituation 1 – Verlauf der Wassermasse im Innenputz.....	69
Abb. 53 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Außenputz (mit $\mu = 10$).....	71
Abb. 54 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Außenputz (mit $\mu = 20$).....	71
Abb. 55 – Bauteilsituation 1a – Verlauf der Wassermasse im Innenputz (mit $\mu = 20$)	72
Abb. 56 – Bauteilsituation 1b – Verlauf der Wassermasse im Außenputz	73
Abb. 57 – Bauteilsituation 1b – Verlauf der Wassermasse im Innenputz.....	74
Abb. 58 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Außenputz	75
Abb. 59 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Innenputz	75
Abb. 60 – Sorptionsisotherme des Innenputzes	76
Abb. 61 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenoberfläche.....	77
Abb. 62 – Bauteilsituation 1c – Wasserfalldiagramm für die relative Luftfeuchte (ohne Feuchteübergang innen).....	77
Abb. 63 – Bauteilsituation 1c – Wasserfalldiagramm für die relative Luftfeuchte (mit Feuchteübergang innen).....	78
Abb. 64 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Gesamtwassermasse über fünf Jahre.....	79
Abb. 65 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Außenputz ohne Schlagregen ...	80

Abb. 66 – Bauteilsituation 1c – Verlauf der Wassermasse im Innenputz ohne Schlagregen.....	80
Abb. 67 – Bauteilsituation 1d – Verlauf der Wassermasse in der Calciumsilikatplatte	81
Abb. 68 – Sorptionsisotherme der verwendeten Calciumsilikatplatte.....	82
Abb. 69 – Bauteilsituation 2	83
Abb. 70 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der Wassermasse im Außenputz	84
Abb. 71 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der Wassermasse in der äußeren Ziegelschale.....	84
Abb. 72 – Sorptionsisotherme der äußeren Ziegelschale.....	85
Abb. 73 – Bauteilsituation 2 – Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenseite der äußeren Ziegelschale	86
Abb. 74 – Bauteilsituation 3	87
Abb. 75 – Bauteilsituation 3 – Verlauf der Wassermasse im Ziegel.....	88
Abb. 76 – Bauteilsituation 3 – Verlauf der Wassermasse im Ziegel über fünf Jahre.....	89

7.2. Tabellenverzeichnis

Tab. 1 – Putzarten [HEI10].....	4
Tab. 2 – Wasseraufnahmefähigkeit w verschiedener Putzarten nach Otto [OTT95]	4
Tab. 3 – Wasseraufnahmefähigkeit w und Wassergehalt bei freier Sättigung u_F verschiedener Putzarten nach Bednar [BED00].....	5
Tab. 4 – Wasserdampfdurchlässigkeit μ verschiedener Putzarten in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [OTT95]	5
Tab. 5 – Wärme- und Feuchtetransportmechanismen [KÜN94a].....	12
Tab. 6 – Substratgruppen [SED01].....	32
Tab. 7 – Schimmelpilzwachstumsindex [VIIT10, VIIT07].....	33
Tab. 8 – gemessene Wasseraufnahmekoeffizienten.....	47
Tab. 9 – gemessene volumenbezogene Masse des Feuchtegehalts bei freier Sättigung	50
Tab. 10 – Eingabeparameter für die Feuchtespeicherfunktion.....	56
Tab. 11 – sonstige Eingabeparameter	56
Tab. 12 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 1	68
Tab. 13 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 1a.....	70
Tab. 14 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 2.....	83
Tab. 15 – Eingabeparameter für die Berechnung der Bauteilsituation 3.....	87

7.3. Literaturverzeichnis

- [ABU09] Abuku, M.; Blocken, B.; Roels, S.: Moisture response of building facades to wind-driven rain: Field measurements compared with numerical results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97, 2009, S. 197 – 207
- [ABU09a] Abuku, M.; Janssen, H.; Roels, S.: Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. *Energy and Buildings* 41, 2009, S. 101 – 110
- [BED00] Bednar, Thomas: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Dissertation, TU Wien, 2000
- [BLO04] Blocken, Bert; Carmeliet, Jan: A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, 2004, S. 1079 – 1130
- [BLO06] Blocken, Bert; Carmeliet, Jan: Influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, 2006, S. 101 – 127
- [BLO07] Blocken, Bert; Roels, Staf; Carmeliet, Jan: A combined CFD-HAM approach for wind-driven rain on building facades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 2007, S. 585 – 607
- [BLO07a] Blocken, Bert; Carmeliet, Jan: On the errors associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades. *Atmospheric Environment* 41, 2007, S. 2335 – 2343
- [BLO10] Blocken, Bert; Carmeliet, Jan: Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory. *Building and Environment* 45, 2010, S. 691 – 703
- [BRI92] British Standard BS 8104: 1992: Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain
- [BUW10] Bauen und Wohnen – Österreichs objektive Plattform zum Thema Bauen & Wohnen www.buw.at/bw/buw.nsf/Menue/21.9.1.1?OpenDocument, 25.10.2010

- [CAM85] Cammerer, J.; Achtziger, J.: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Kurzberichte aus der Bauforschung 1985, Bericht Nr. 115, S. 491 – 494
- [DIN01] DIN 4108-3: 06-2001: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [FRA09] Jahresbericht 2008 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart, 2009
- [HEI10] Heimwerkerkatalog 2010, bauMax
- [HOL01] Holm, Andreas: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation, Stuttgart, 2001
- [HOL02] Holm, A.; Krus, M.; Künzel, H.M.: Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbar Kennwerten. IBP-Mitteilung 29, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2002
- [KÜN76] Künzel, Helmut: Beurteilung des Regenschutzes von Außenbeschichtungen. IBP-Mitteilung 18, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1976
- [KÜN81] Künzel, Helmut: Schlagregenbeanspruchung von Gebäuden und Beurteilung des Schlagregenschutzes von Außenputzen. IBP-Mitteilung 69, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1981
- [KÜN82] Künzel, Helmut: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 4, 1982, S. 101 – 107
- [KÜN94] Künzel, Helmut: Schäden an Fassadenputzen. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, Stuttgart, 1994
- [KÜN94a] Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Stuttgart, 1994

- [KÜN94b] Künzel, Hartwig: Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen. IBP-Mitteilung 263, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1994
- [KÜN94c] Künzel, Hartwig: Regendaten für die Berechnung des Feuchtetransports. IBP-Mitteilung 265, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1994
- [KÜN06] Künzel, Hartwig; Fitz, Cornelia: Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen. WTA-Schriftenreihe 28, Sonderheft zum Hindelanger Baufachkongress 2006
- [LUT02] Lohmeyer, G.C.O.; Post, M.; Bergmann, H.: Praktische Bauphysik – Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen. Vieweg + Teubner Verlag, 7. Auflage, Wiesbaden, 2010
- [LUT02] Lutz, Peter; u.a.: Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. Verlag B. G. Teubner, 5. Auflage, Stuttgart, 2002
- [MAS11] MASEA-Materialdatenbank
Link: http://www.irb.fraunhofer.de/denkmalpflege/angebote_partner/masea/,
23.01.2011
- [NOU08] Nouidui, Thierry Stephane: Entwicklung einer objektorientierten Modellbibliothek zur Ermittlung und Optimierung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen. Dissertation, Stuttgart, 2008
- [OIB07] OIB-Richtlinie 6 – Energieeinsparung und Wärmeschutz. Österreichisches Institut für Bautechnik, Ausgabe April 2007
- [ONO99] ÖNORM B 3340: 04-1999: Putzmörtel – Begriffsbestimmungen, Einteilungskriterien, Anforderungen und Normkennzeichnung
- [ONO02] ÖNORM EN ISO 13788: 01-2002: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren
- [ONO03] ÖNORM EN ISO 15148: 03-2003: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen

- [ONO03a] ÖNORM B 8110-2 Beiblatt 4: 09-2003: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz – Hinweise zur Vermeidung von Feuchtigkeitsschäden durch raumklimatische Einflüsse
- [ONO03b] ÖNORM B 8110-2: 01-2003: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz
- [ONO05] ÖNORM EN 13914-1: 06-2005: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 1: Außenputz
- [ONO05a] ÖNORM EN 1015-19: 02-2005: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 19: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Festmörteln aus Putzmörteln
- [ONO06] ÖNORM B 3346: 07-2006: Putzmörtel – Regeln für die Verwendung und Verarbeitung – Ergänzende Bestimmungen zu den ÖNORMEN EN 13914-1 und -2
- [ONO06a] ÖNORM B 8115-2: 12-2006: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz
- [ONO07] ÖNORM EN 15026: 07-2007: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation
- [ONO07a] ÖNORM EN 1015-10: 03-2007: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 10: Bestimmung der Trockenrohddichte von Festmörtel
- [ONO07b] ÖNORM EN 1015-11: 03-2007: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel
- [ONO08] ÖNORM EN ISO 9346: 02-2008: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen – Physikalische Größen für den Stofftransport – Begriffe
- [ONO09] ÖNORM EN 15927-3: 07-2009: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 3: Berechnung des Schlagregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten
- [ONO09a] ÖNORM B 3345: 06-2009: Sanierputzsysteme für feuchtes und salzbelastetes Mauerwerk – Anforderungen, Prüfverfahren, Hinweise für die Verarbeitung

- [ONO10] ÖNORM EN 998-1: 11-2010: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel
- [OTT95] Otto, Frank: Einfluss von Sorptionsvorgängen auf die Raumlufffeuchte – Entwicklung von Kenngrößen zur Beschreibung des hygrischen Verhaltens von Räumen. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1995
- [PER90] Perez, Richard; Ineichen, Pierre; Seals, Robert; Michalsky, Joseph; Stewart, Ronald: Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. Solar Energy, Vol. 44, No. 5, 1990, S. 271 – 289
- [SED01] Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Lehrstuhl für Bauphysik, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 2001
- [SED02] Sedlbauer, Klaus; Krus, Martin: Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht – Beurteilung durch a_w -Werte oder Isoplethensysteme? Tagung: Schimmelpilze im Wohnbereich, München, 2002
- [SMI82] Smith, S. L.; Hill, S. T.: Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *Aspergillus versicolor*. Transaction of the British Mycological Society, Vol. 79, 1982, S. 558 – 560
- [VIIT91] Viitanen, Hannu; Ritschkoff, Anne-Christine: Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Report no. 221, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Uppsala, 1991
- [VIIT07] Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo: Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials. Buildings X, 10th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelope of Whole Buildings, Florida, 2007
- [VIIT10] Viitanen, Hannu: Schimmelpilzwachstum auf Holz – Simulation und Modellierung auf Basis langjähriger Untersuchungen. Holzbau 4/2010, S. 17 – 20
- [VOG05] Vogt, R.; Kriegel, R.: Untersuchungen zum Salztransport und zum kritischen Porenfüllungsgrad der Salzzimmobilisierung in Bauwerkstoffen. Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Vol. 11, No. 3, 2005, S. 129 – 140
- [WEG10] Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen – Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten, Diplomarbeit, TU Wien, 2010

[WIE10] Stadt Wien: Stadtplan Wien

Link: <http://www.wien.gv.at/stadtplan/>, 19.08.2010

[WIK10] Wikipedia: Numerische Strömungsmechanik

Link: http://de.wikipedia.org/wiki/Numerische_Str%C3%B6mungsmechanik/,
27.12.2010