

# DIPLOMARBEIT

## Master's Thesis

### **Ermittlung eines Bemessungs-Außenklimas für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer innengedämmten Wandkonstruktion**

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

unter der Leitung von

A.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar

und

Dipl.-Ing. Paul Wegerer

E206

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Johann Schwaller

0627633

Gerasdorferstraße 10  
2620 Mollram

Wien, Januar 2014

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

Wien, Januar 2014

## **Danksagung**

Am Ende meines Studiums möchte ich mich vor allem bei meiner Familie bedanken. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei meinen Eltern Johann und Margit Schwaller, die mich die gesamte Zeit meines Studiums finanziell unterstützt haben und es mir damit ermöglicht haben, mein Studium gerade in der Schlussphase möglichst effizient zu betreiben. Meinen Großeltern Martha Schwaller sowie Franz und Gabriele Sinabel danke ich für ihren guten Zuspruch und ihre Unterstützung.

Mein Dank gilt weiters den Betreuern dieser Diplomarbeit, Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar sowie Dipl.-Ing. Paul Wegerer, die trotz ihres oftmals vollen Terminkalenders immer kurzfristig Zeit für Besprechungen und Diskussionen gefunden und das Entstehen dieser Diplomarbeit mit viel persönlichem Interesse begleitet haben.

## Kurzfassung

Im Falle historischer Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden stellt die Ausführung einer Innendämmung die einzige Möglichkeit dar, die Transmissionswärmeverluste über außenluftberührte Wände zu reduzieren. Die Applikation eines Innendämmsystems birgt jedoch immer gewisse bauphysikalische Risiken. Durch die thermische Abkopplung der Bestandskonstruktion vom Innenraum wird während der kalten Jahreszeit das Temperaturniveau im Bauteil deutlich reduziert, was zu einer Verringerung des Trocknungspotentials nach Schlagregenereignissen und einer erhöhten Gefahr von Tauwasserbildung in der Konstruktion führt. Das Risiko des Auftretens von kritischen Feuchtezuständen, die in weiterer Folge zu Feuchteschäden (z.B. Schimmelbildung) führen, erhöht sich dabei mit zunehmender Dämmstärke. Um sowohl eine ausreichende Versagenssicherheit der Konstruktion als auch eine Maximierung des Energieeinsparpotentials zu gewährleisten, ist eine Dimensionierung des Innendämmsystems mittels hygrothermischer Simulation Stand der Technik. Dabei kann der zeitliche Verlauf der Temperatur- und Feuchtegrößen im Bauteil unter Beachtung sämtlicher wesentlicher Wärme- und Feuchtetransportprozesse sowie unter Verwendung realer Klimadaten (Temperatur, Luftfeuchte, Schlagregen, Solare Einstrahlung) simuliert werden. Wie in der statischen Dimensionierung von Bauteilen ist die Wahl der maßgebenden Belastung entscheidend für das erhaltene Ergebnis. Im Falle der hygrothermischen Simulation stellen die außen- und innenklimatischen Bedingungen die Belastung der Konstruktion dar.

Die Wahl eines Klimadatensatzes, der in geeigneter Weise das Langzeit-Versagensrisiko einer Konstruktion unter den gegebenen örtlichen Randbedingungen wiedergeben kann, erfolgte über ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Konzept. Dabei wurden die Auswirkungen verschiedener Klimadatensätze auf die Konstruktion verglichen und den Ergebnissen von Langzeit-Simulationen über mehrere Jahrzehnte gegenübergestellt. Die Untersuchungen wurden entsprechend der Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade gegliedert. Während für den Fall einer Fassade mit wasserabweisendem Putz gezeigt werden kann, dass die Wahl eines Referenzjahres maßgeblich vom Temperaturniveau des entsprechenden Klimadatensatzes bestimmt wird, zeigt sich im Falle eines Putzes mit einer für eine Gründerzeitbau-Fassade üblichen (höheren) Wasseraufnahmefähigkeit, dass sowohl in Bezug auf das Temperaturniveau als auch das Schlagregenaufkommen ein bestimmtes Maß an Belastung gegeben sein muss, um das Langzeitrisiko des Auftretens kritischer Feuchtezustände wiedergeben zu können. Schließlich wird versucht, auf Grundlage der in den angestellten Untersuchungen gefundenen Zusammenhänge Hinweise für eine vereinfachte Wahl eines Referenz-Klimadatensatzes zu geben.

## **Abstract**

In case of historical buildings, where the façade is to be preserved for aesthetical and preservationist reasons, the application of an interior insulation system is the only possibility to reduce the transmission heat losses of external walls. However, the application of an interior insulation always causes certain risks. Because of the thermal separation from the interior, the temperature level in the construction decreases, what might cause a reduced drying potential of the wall after driving rain and leads to a raised danger of condensation problems. The risk of moisture problems increases with the insulation thickness. To guarantee an adequate failure security of the construction as well as the maximization of the energy saving potential, the assessment of interior insulation systems by means of numerical simulation methods is state of the art. In these simulation methods the coupled transport of heat and mass is taken into account as well as unsteady climate data (temperature, air humidity, driving rain, solar radiation). As in static calculations, the choice of a representative load determines the result. In case of a hygrothermal simulation, the inside and outside climate conditions are the loads for the construction.

The choice of a representative outdoor climate for a hygrothermal simulation was made by a concept, which has been developed within the framework of this thesis. In this concept, the effects of different outdoor climate records on the construction were compared to each other and to the results of longtime simulations based on continuous outdoor climate records of several decades. The studies were divided according to the water absorptive capacity of the façade. While it can be shown, that in case of a hydrophobic exterior rendering the choice of a representative outdoor climate record is mainly determined by the temperature level, in case of façades with a higher water absorptive capacity (which is normal for historical buildings), a representative outdoor climate contains a specific combination of the temperature level and the driving rain load. Based on the insights of this thesis, it was also tried to give recommendations for the preselection of a reference year.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hygrothermische Simulation.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Physikalische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Vorbemerkungen .....	3
2.1.2	Feuchtespeicherung .....	3
2.1.3	Feuchtetransport.....	3
2.1.4	Wärmespeicherung .....	5
2.1.5	Wärmetransport .....	5
<b>2.2</b>	<b>Grundlagen der hygrothermischen Simulation .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>HAM4D_VIE .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen Innendämmung .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Gründe für Innendämmmaßnahmen .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Bauphysikalische Auswirkungen .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>Arten von Innendämmsystemen .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>Bemessung kapillaraktiver Innendämmsysteme .....</b>	<b>14</b>
3.4.1	Vorbemerkungen .....	14
3.4.2	Bemessung mittels hygrothermischer Simulation .....	15
<b>4</b>	<b>Klimadaten.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Vorbemerkungen .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>Arten von Klimadaten.....</b>	<b>18</b>
4.2.1	Grundlagen.....	18
4.2.2	Testreferenzjahre .....	19
4.2.3	Halbsynthetische Klimadaten .....	19
<b>4.3</b>	<b>Aufbereitung der Klimadaten .....</b>	<b>20</b>
4.3.1	Vorbemerkungen.....	20
4.3.2	Schlagregen.....	20
4.3.3	Solare Strahlung.....	22
4.3.4	Gewählte Randbedingungen .....	22
4.3.5	Fehlende Daten .....	24
<b>4.4</b>	<b>Innenraumklima .....</b>	<b>24</b>
<b>4.5</b>	<b>Erstellung von Klimadateien für HAM4D_VIE .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Modellbildung .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1</b>	<b>Gewähltes Detail .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2</b>	<b>Vorbemerkungen zur Modellierung in HAM4D_VIE .....</b>	<b>28</b>
<b>5.3</b>	<b>Gitterstruktur .....</b>	<b>29</b>
5.3.1	Grundlagen.....	29
5.3.2	Wahl einer Gitterstruktur .....	30
<b>5.4</b>	<b>Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade .....</b>	<b>32</b>
5.4.1	Grundlagen.....	32
5.4.2	Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten mit HAM4D_VIE .....	33
5.4.3	Ermittelte Wasseraufnahmekoeffizienten .....	34
<b>5.5</b>	<b>Anfangsbedingungen .....</b>	<b>34</b>

<b>6</b>	<b>Ermittlung eines Bemessungs-Außenklimas .....</b>	<b>37</b>
6.1	Ziel .....	37
6.2	Ansätze in der Literatur .....	37
6.3	Methodik .....	40
6.3.1	Sicherheitskonzept .....	40
6.3.2	Anfangsbedingungen .....	41
6.3.3	Verglichene Größen .....	43
6.3.4	Gewählte Auswertungspunkte .....	43
6.3.5	Unterteilung der Untersuchungen .....	46
6.4	<b>Wasserabweisender Außenputz .....</b>	<b>47</b>
6.4.1	Vorbemerkungen .....	47
6.4.2	Testreferenzjahr mit Temperaturabminderung .....	47
6.4.2.1	Methodik .....	47
6.4.2.2	Ergebnisse .....	49
6.4.2.3	Schlussfolgerungen .....	51
6.4.3	Eigenschaften der Jahresdatensätze (Wien).....	52
6.4.4	Mittleres Jahr mit Temperaturabminderung .....	54
6.4.4.1	Methodik .....	54
6.4.4.2	Ergebnisse .....	55
6.4.4.3	Alternative Ermittlung einer mittleren Jahres .....	57
6.4.4.4	Schlussfolgerungen .....	58
6.4.5	Referenzjahr .....	58
6.4.5.1	Methodik .....	58
6.4.5.2	Ergebnisse .....	59
6.4.5.3	Schlussfolgerungen .....	61
6.5	<b>Wasserhemmende/wassersaugende Außenhülle .....</b>	<b>61</b>
6.5.1	Vorbemerkungen .....	61
6.5.2	Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade .....	61
6.5.3	Schlagregenbelastung .....	62
6.5.4	Eigenschaften der Jahresdatensätze (Wien).....	63
6.5.5	Testreferenzjahr .....	67
6.5.5.1	Vorbemerkungen .....	67
6.5.5.2	Ergebnisse TRY $-\Delta T$ , Regen $\cdot 0,7$ .....	68
6.5.5.3	Ergebnisse TRY, Regen $\cdot 0,7 \cdot x$ .....	68
6.5.5.4	Schlussfolgerungen .....	69
6.5.6	Mittleres Jahr .....	69
6.5.6.1	Vorbemerkungen .....	69
6.5.6.2	Methodik .....	69
6.5.6.3	Ergebnisse .....	70
6.5.6.4	Schlussfolgerungen .....	71
6.5.7	Referenzjahr .....	71
6.5.7.1	Methodik .....	71
6.5.7.2	Ergebnisse .....	71
6.5.7.3	Schlussfolgerungen .....	75
6.6	<b>Eigenschaften der ermittelten Jahre .....</b>	<b>76</b>
6.6.1	Vorbemerkungen .....	76
6.6.2	Standort Wien, Westausrichtung .....	76
6.6.3	Standort Wien, Nord-Ausrichtung .....	77
6.6.4	Standort Klagenfurt, Westausrichtung.....	78
6.6.5	Standort Wien, Westausrichtung, Variation $W_w$ -Wert .....	79

---

6.6.6	Schlussfolgerungen .....	81
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>82</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>84</b>
8.1	Abbildungsverzeichnis .....	84
8.2	Tabellenverzeichnis .....	86
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>87</b>

## 1 Einleitung

Dem Feuchteschutz kommt gerade bei der Sanierung historischer Gebäude große Bedeutung zu, da durch Eingriffe in die Bausubstanz (Wärmedämmung, Abdichtungen, Fenstertausch) oft auch eine Veränderung des Feuchtehaushaltes hervorgerufen wird. Die Folgen einer erhöhten Durchfeuchtung von Baustoffen und Bauteilen sind etwa Geruchsbildung, Schimmelpilzbildung, die Verrottung organischer Materialien oder der Verlust der wärmedämmenden Eigenschaften. [BED13]

Der Feuchteschutz umfasst gemäß OIB-Richtlinie 3 [OIB11] den Schutz vor Feuchtigkeit aus dem Boden und aus Niederschlagswässern, die Vorsorge vor Überflutung und die Vermeidung von Schäden durch Wasserdampfkondensation. Für die Gewährleistung des Schutzes vor Bodenfeuchte und Niederschlagswässern sind geeignete konstruktive Vorkehrungen zu treffen. Der vereinfachte rechnerische Nachweis, dass es zu keinen Schäden durch Wasserdampfdiffusion kommt, erfolgt gemäß ÖNORM EN ISO 13788 [ONO01] nach dem sogenannten Glaser-Verfahren. Dieses beruht jedoch auf vereinfachenden Annahmen: Es wird etwa angenommen, dass kein kapillarer Feuchtetransport im Bauteil infolge von Schlagregen oder Bodenfeuchte stattfindet und dass die zu Beginn vorhandene Baufeuchte bereits ausgetrocknet ist. Weiters werden die Effekte der Wärme- und Feuchtespeicherung sowie die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleiteigenschaften vernachlässigt. Zudem gehen nur stationäre Klimadaten in Form von Monatsmittelwerten in die Berechnung ein. [BED13]

Gerade im Zuge von Sanierungsmaßnahmen kommt es oft zu einem komplexen und von den konkreten örtlichen und baulichen Verhältnissen abhängigen Zusammenspiel von Außenklima, Bodenfeuchte, Bestandskonstruktion, Sanierungsmaßnahme und nutzungsabhängigem Innenraumklima. Hier stoßen herkömmliche Nachweismethoden an ihre Grenzen. Dies führte, beginnend in den 1990er-Jahren, zur Entwicklung von Programmen zur Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtehaushaltes. Damit ist eine Darstellung des zeitlichen Verlaufes von Wärme- und Feuchtetransportprozessen unter Einbeziehung von instationären, realen Klimadaten möglich. Ein typisches Anwendungsgebiet der hygrothermischen Simulation sind innengedämmte Außenwände, die feuchtetechnisch immer ein gewisses Risiko beinhalten (siehe dazu Abschnitt 3). Im Falle historischer Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden stellt die Applikation einer Innendämmung den einzigen Weg dar, die Transmissionswärmeverluste über Außenwände zu reduzieren. Eine solche Innendämmung ist feuchtetechnisch umso kritischer, je stärker sie ausgeführt wird. Andererseits ist eine möglichst hohe Dämmstärke gewünscht, damit der Nutzen einer Innendämmung bezüglich des Energieeinsparpotentials maximiert wird. Die hygrothermische Simulation erlaubt über die Erfassung des Zusammenspiels von Außenklima, Bestandskonstruktion und

Innenraumklima eine Dimensionierung der Innendämmung, durch die kritischen Feuchtezustände vermieden werden können.

Wie bei der statischen Dimensionierung von Bauteilen hängen die erhaltenen Ergebnisse und damit die zulässigen Dämmstärken von den Einwirkungen ab, denen die Konstruktion bei der Berechnung ausgesetzt wird. Im Falle der statischen Berechnung erfolgt die Belastung durch Kräfte (Eigenlasten, Nutzlasten, Schneelasten, etc), bei der hygrothermischen Simulation wird die Konstruktion durch die innen- und außenklimatischen Verhältnisse beansprucht. Besondere Bedeutung kommt dabei dem verwendeten Außenklima (Schlagregen, Temperatur, Solare Einstrahlung, Luftfeuchte) zu.

Im Rahmen der Arbeit wird zunächst auf die bauphysikalischen Auswirkungen einer Innendämmmaßnahme sowie die Bemessung mittels einer hygrothermischen Simulation eingegangen (siehe Abschnitt 3). Weiters werden die vorhandenen Klimadaten erläutert sowie deren Aufbereitung für eine konkrete örtliche Situation beschrieben (siehe Abschnitt 4). Die Modellbildung im verwendeten Simulationsprogramm HAM4D\_VIE, die durch die Wahl der Materialeigenschaften, die Diskretisierung (Auflösung des Modells in kleine Elemente) sowie die Wasseraufnahmefähigkeit des Außenputzes das Simulationsergebnis wesentlich beeinflusst, wird in Abschnitt 5 erörtert. Die Untersuchungen zur Ermittlung eines Bemessungs-Außenklimas in Abschnitt 6 erfolgen auf Basis von [SAN96]. Darin wurden Überlegungen bezüglich des zulässigen Versagensrisikos von Konstruktionen sowie zur Ermittlung eines Feuchte-Referenzjahres angestellt. Zudem finden die weiterführenden Arbeiten von Künzel und Holm Eingang in die vorliegende Arbeit, auf denen die Empfehlungen bezüglich der für Bemessungsaufgaben heranzuziehenden Klimadaten in ÖNORM EN 15026 [ONO07] maßgeblich beruhen. Aufbauend auf den genannten Quellen soll im Rahmen dieser Arbeit die erforderliche Zusammensetzung eines Bemessungs-Außenklimas ermittelt werden. Weiters werden verschiedene Möglichkeiten, durch einen Jahres-Klimadatensatz das Versagensrisiko einer Konstruktion realistisch abzubilden, untersucht.

## 2 Hygrothermische Simulation

### 2.1 Physikalische Grundlagen

#### 2.1.1 Vorbemerkungen

Um eine realitätsnahe Abbildung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen zu gewährleisten, bedarf es der Berücksichtigung aller für eine bauphysikalische Beurteilung wesentlichen physikalischen Prozesse. Dabei ist auch zu beachten, dass thermische und hygri-sche Prozesse miteinander gekoppelt sind und sich somit gegenseitig beeinflussen.

#### 2.1.2 Feuchtespeicherung

Die zwei wesentlichen Feuchtespeichermechanismen für poröse Baustoffe sind die „Anlagerung von Wassermolekülen an den Porenwänden durch Oberflächenkräfte“ (Sorptionsfeuchte) sowie die „Aufnahme von ungebundenem Kapillarwasser in benetzbaren Kapillarporen“ (Kapillarwasserbereich). [KRU96]

In der Darstellung der Feuchtespeichereigenschaften eines Baustoffes mittels der Feuchtespeicherfunktion (siehe Abb. 1) wird deshalb zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich, dem Kapillarwasserbereich und dem Übersättigungsbereich unterschieden. Im **Sorptionsfeuchtebereich** wird Wasser aus der den Baustoff umgebenden Luftfeuchte in den Poren eingelagert, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, der auch als Gleichgewichtsfeuchte oder Ausgleichsfeuchte bezeichnet wird. Der Bereich zwischen der Gleichgewichtsfeuchte und der freien Wassersättigung wird als **Kapillarwasserbereich** bezeichnet. Der Verlauf der Feuchtespeicherfunktion wird hier durch eine Saugspannungsmessung bestimmt (vgl. Abb. 1). Die freie Wassersättigung wird als jene Stofffeuchte definiert, „die durch freies Saugen ohne Einwirkung äußerer Kräfte erreicht werden kann“. Als **Übersättigungsbereich** wird der Bereich zwischen freier Wassersättigung und maximaler Sättigung  $u_{\max}$  bezeichnet, bei der der gesamte Porenraum eines Baustoffs mit Wasser gefüllt ist. [HOL01]

#### 2.1.3 Feuchtetransport

Als wesentliche Feuchtetransport-Prozesse sind die Wasserdampfdiffusion, die Oberflächendiffusion und die Kapillarleitung zu nennen.

Unter **Wasserdampfdiffusion** versteht man einen Gastransport durch poröse Materialien. Das treibende Potential für den Wasserdampftransport durch Baukonstruktionen ist das Dampfdruckgefälle, wobei der Partialdampfdruck durch Temperatur und relative Luftfeuchte bestimmt ist [HOL01].

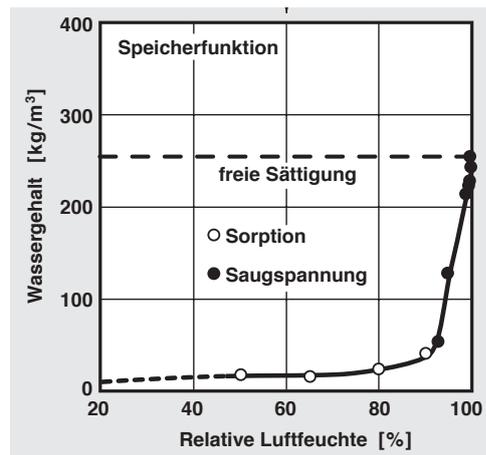


Abb. 1: Beispiel einer Feuchtespeicherfunktion [KRU96]

In der kühlen Jahreszeit kommt es aufgrund des höheren Dampfdrucks im Gebäudeinneren zu einem Diffusionsstrom von innen nach außen. Da der Wasserdampftransport durch die „eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten im Porenraum“ behindert wird, wird über die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  angegeben, um welchen Faktor sich der Diffusionswiderstand einer Materialschicht von dem einer gleich dicken Luftschicht unterscheidet. Durch die Multiplikation der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mit der Materialschicht-Dicke  $d$  erhält man die äquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ , die angibt „wie dick eine Luftschicht sein muss, um den selben Durchlasswiderstand zu haben“. [WTA01] [BED13]

Enthält ein Baustoff so viel hygroskopische Feuchte, dass „der Sorbatfilm an den Porenwänden beweglich wird, (...) dann findet neben der normalen Dampfdiffusion auch die sog. **Oberflächendiffusion**, eine Bewegung sorbierter Wasserfilme an den Porenwänden, statt“. Das treibende Potential für die Oberflächendiffusion ist die relative Luftfeuchte, da es sich dabei nicht um einen Gas- sondern um einen Flüssigwassertransport handelt. Oberflächendiffusion und Dampfdiffusion sind dabei zwei parallel ablaufende Prozesse, die bei üblichen Klimabedingungen (innen höherer Dampfdruck, außen höhere relative Luftfeuchte) in entgegengesetzter Richtung erfolgen (siehe Abb. 2). [HOL01]

**Kapillarleitung** tritt bei überhygroskopischer Feuchte im Baustoff auf, die zum Beispiel bei der einseitigen Feuchtebelastung einer Konstruktion durch Schlagregen auftreten kann [HOL01]. Aufgrund von Kapillarkräften ergibt sich „solange ein ausgleichender Feuchtestrom, bis sich die Wassermasse in einem mechanischen Gleichgewicht befindet“ [WTA01]. Der Feuchtestrom im Baustoff erfolgt dabei stets vom höheren zum niedrigeren Feuchtegehalt.

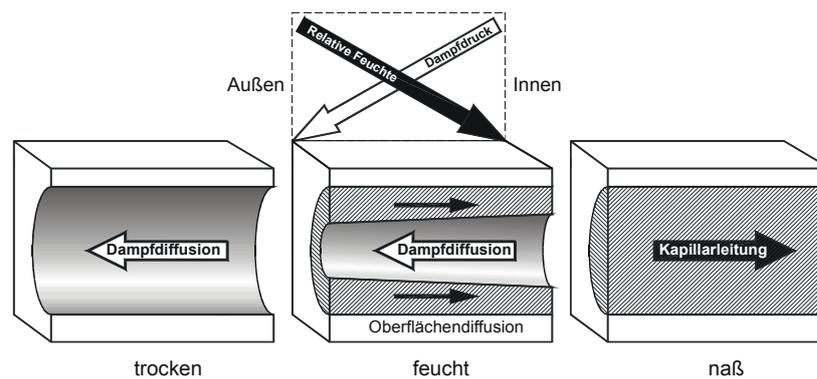


Abb. 2: Feuchtetransport-Prozesse in porösen Baustoffen [HOL01]

#### 2.1.4 Wärmespeicherung

Das Wärmespeichervermögen eines Baustoffes wird von der Dichte  $\rho_s$  sowie der spezifischen Wärmekapazität  $c_s$  des Baustoffs bestimmt. Bei einem feuchten Baustoff müssen auch der Beitrag des enthaltenen Wassers sowie die Effekte durch Änderungen des Aggregatzustandes (Schmelz- bzw. Verdampfungsenthalpie) berücksichtigt werden. [WTA01]

#### 2.1.5 Wärmetransport

Ein Wärmestrom wird durch eine Temperaturdifferenz innerhalb der Konstruktion hervorgerufen. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  hängt dabei von der Dichte des Baustoffs bzw. der Größe und Verteilung der Poren ab. Bei Vorhandensein von Wasser (z.B. durch kapillaren Feuchtetransport) erhöht sich  $\lambda$ , da Wasser eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. [BED13] Weiters kann Wärme auch über Wasserdampfdiffusion transportiert werden. Sind die Diffusionsströme mit Phasenänderungen (Verdunstung, Kondensation) verbunden, kann diese Form des Wärmetransports (z.B. bei Trocknungsvorgängen) „für die Wärmebilanz von großer Bedeutung sein“. [KÜN94]

## 2.2 Grundlagen der hygrothermischen Simulation

Weil mit dem Glaserverfahren, wie bereits in Abschnitt 1 erläutert, lediglich in eingeschränktem Ausmaß Aussagen über die Dauerhaftigkeit einer Konstruktion angestellt werden können, da nur Diffusionsvorgänge bei stationären Innen- und Außenklimabedingungen betrachtet werden, wurden seit den frühen 1990er-Jahren Simulationsprogramme zur Vorhersage der Wärme- und Feuchteübertragung von „mehrschichtigen Gebäudehüllen, die auf beiden Seiten instationären klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind“ entwickelt [ONO07]. Mit diesen kann „die zeitliche Entwicklung der Temperatur- und Feuchtefelder unter realen Klimarandbedingungen“ und unter Einbeziehung sämtlicher in Abschnitt 2.1 beschriebenen Transport- und Speichervorgänge ermittelt werden. [HOL01]

Die Zusammenhänge zwischen Veränderungen in den Klimarandbedingungen und den daraus folgenden Reaktionen innerhalb des Bauteils sowie der zeitliche Verlauf der Temperatur- und Feuchtefelder werden durch Transport- und Bilanzgleichungen hergestellt, die in der ÖNORM EN 15026 [ONO07] bzw. im WTA-Merkblatt 6-2 [WTA01] festgelegt sind. Simulationsprogramme lösen numerisch das entstehende System von Differentialgleichungen bei vorgegebenen Randbedingungen.

### 2.3 HAM4D\_VIE

Das Simulationsprogramm HAM4D\_VIE wurde am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien entwickelt. Damit ist eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Betrachtung von Wärme-, Feuchte- und Lufttransportprozessen in Baukonstruktionen möglich. Eine Darstellung der eingehenden und ausgehenden Parameter zeigt Abb. 3.

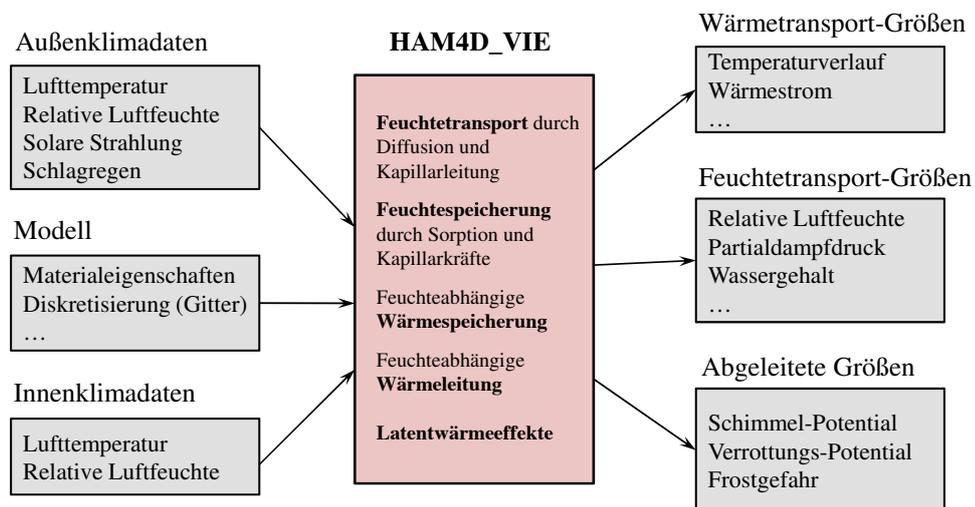


Abb. 3: Simulation mit HAM4D\_VIE

Grundlage der Simulation ist die Eingabe eines Modells des betrachteten Bauteils. Dabei werden zunächst die Konstruktionsabmessungen eingegeben sowie Materialien zugewiesen. Die Eigenschaften der Baustoffe sind in einer Materialdatenbank in Form einer Text-Datei festgelegt. Je Baustoff werden folgende Angaben benötigt:

- Dichte des trockenen Materials  $\rho$  in  $\text{kg/m}^3$
- Spezifische Wärmekapazität des trockenen Materials  $c$  in  $\text{J/kgK}$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in  $\text{W/mK}$
- Luftpermeabilität  $k$  in  $\text{m}^2$
- Feuchtespeicherfunktion
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$

- Flüssigkeitsleitfähigkeit  $K_s$
- Mechanische Eigenschaften (E-Modul, etc)

Weiters ist die Eingabe sogenannter „Modifikationen“ möglich, die lediglich über eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl definiert sind. Diese werden genutzt, um beispielsweise dampfbremsende Schichten an Materialgrenzen zu definieren, ohne sie als eigene Materialschichten eingeben zu müssen, was von Vorteil für die Rechendauer der Simulation ist. Ein Beispiel für die Eingabe der erforderlichen Materialparameter des Baustoffes „Vollziegel“ zeigt Abb. 4.

*ANFANG*						
Vollziegel						
Farbe_RGB	171	175	177			
Dichte_kg/m3	1800					
SpezWKP_J/kgK	890					
WLF_W/mK	1	0.55				
Permeabilitaet_m2	0					
Feuchtespeicherfunktion	1	320.	1e6	0.8	2	
DiffWid_dimlos	1	19	19	19		
Flleitzaehl	1	0	320.	4.89e-5	1.2	0.2
EModul	0					
GModul	0					
Querkontraktion	0					
Verrotung	0					
Schimmelpilz	1	365	23			

**Abb. 4:** Eintrag Materialdatenbank

Nach der Zuweisung der Materialien erfolgt die Diskretisierung des Modells in kleine Elemente, deren Abmessungen festgelegt werden können. Die numerische Lösung der Gleichungssysteme für den Wärme- und Feuchtetransport erfolgt für diese definierten Elemente. Genauer wird auf die Modellbildung in Abschnitt 5.3 eingegangen.

Die Klima-Randbedingungen der Konstruktion werden ebenfalls über Textdateien definiert (siehe Abb. 5). Für diese sind folgende Daten erforderlich:

- Zeitschritt (Periodenende) in h
- Lufttemperatur in °C
- Konvektiver Wärmeübertragungskoeffizient in  $W/m^2K$
- Strahlungstemperatur in °C
- Effektiver Emissionsgrad
- Solare Einstrahlung in  $W/m^2$
- Absorptionsgrad
- Relative Luftfeuchte
- Wasserdampfübergangskoeffizient in  $kg/m^2sPa$
- Saugspannung in Pa
- Regenmenge auf der Oberfläche in der abgelaufenen Zeitdauer in  $kg/m^2$
- Luftdruck in Pa

zeit (PeriodenEnde)	temp_alphaC	tempS	eps	rad	absG	phi	betaV	suc	qL	druck	
0	Referenzh?e										
1	22.16	5	22.16	0.9	0	0.5	0.41	2.50E-08	0	0	-0.09
2	22.16	5	22.16	0.9	0	0.5	0.41	2.50E-08	0	0	-0.09
3	22.16	5	22.16	0.9	0	0.5	0.41	2.50E-08	0	0	-0.09
4	22.16	5	22.16	0.9	0	0.5	0.41	2.50E-08	0	0	-0.09
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
8760	22.16	5	22.16	0.9	0	0.5	0.41	2.50E-08	0	0	-0.10

**Abb. 5:** Beispiel Klimadatei

Das Ergebnis der Simulation ist eine Textdatei, durch die je Zelle und gewähltem Ausgabeschritt (z.B. alle 24 Stunden) folgende Ergebnisse erhalten werden:

- Temperatur in °C
- Partialdruck in Pa
- Relative Luftfeuchte
- Wassergehalt in kg/m<sup>3</sup>
- Kondensat in kg/m<sup>3</sup>
- Verrottungspotential
- Masseverlust durch Verrottung in kg
- Schimmelpotential
- Tage Schimmelpotential = 1 in d
- Frostgefahr in d

Neben Wärme- und Feuchtegrößen werden auch von diesen abgeleitete Größen wie das Schimmelpotential oder das Verrottungspotential organischer Baustoffe ausgegeben.

Das Schimmelpotential wird in HAM4D\_VIE über die Erfassung des Zusammenspiels von Temperatur und relativer Luftfeuchte in der Konstruktion ermittelt. Je Zelle wird dabei festgestellt, ob Klimabedingungen vorhanden sind, die eine Sporenauskeimung ermöglichen. Kritische Bedingungen bezüglich Temperatur und relativer Luftfeuchte müssen jedoch auch über einen gewissen Zeitraum vorhanden sein, damit tatsächlich Schimmelwachstum auftritt. Dies wird durch das Schimmelpotential abgebildet, das sich immer mehr dem Wert von 1 annähert, solange entsprechende Klimabedingungen im Material vorherrschen. Erreicht das Schimmelpotential den Wert von 1, tritt Schimmelwachstum auf. Sind die entsprechenden Bedingungen bezüglich Temperatur und Luftfeuchte nicht mehr gegeben, reduziert sich das Schimmelpotential wieder.

Die Ermittlung des Verrottungspotentials organischer Baustoffe (z.B. Braunfäule bei Holz) basiert auf dem Modell von Viitanen. Wie bei der Ermittlung des Schimmelpotentials wurden dabei kritische Kombinationen für Temperatur und relative Luftfeuchte in Baumaterialien ermittelt, die

zu Verrottung führen. Bei Vorhandensein kritischer Zustände über einen längeren Zeitraum steigt das Verrottungspotential, bis es beim Wert von 1 zu einem Masseverlust des Baustoffes aufgrund von Verrottungsvorgängen kommt, der in Kilogramm angegeben werden kann. [VII97]

Die Validierung von HAM4D\_VIE erfolgte durch Bednar in [BED00]. Wegerer konnte in [WEG10] durch einen Vergleich von berechneten und gemessenen Feuchtegrößen in einer innen-gedämmten Wandkonstruktion zeigen, dass bei richtiger Modellierung sowie der Verwendung von gemessenen Innen- und Außenklimadaten mit HAM4D\_VIE realitätsnahe Ergebnisse erhalten werden.

## 3 Grundlagen Innendämmung

### 3.1 Gründe für Innendämmmaßnahmen

Die Transmissionswärmeverluste über außenluftberührte Bauteile machen einen Großteil der Wärmeverluste eines Gebäudes aus. Insofern ist durch eine energetische Verbesserung der Gebäudehülle ein großes Energieeinsparpotential vorhanden. Zudem führt eine thermische Sanierung zu einer Erhöhung der Wandoberflächentemperatur im Innenraum. Dadurch wird einerseits die Gefahr von Oberflächenkondensat bzw. in weiterer Folge Schimmelbildung verringert und andererseits die thermische Behaglichkeit für den Bewohner gesteigert, da die operative (empfundene) Raumtemperatur sich aus der Lufttemperatur im Raum und der Strahlungstemperatur der begrenzenden Bauteile zusammensetzt. [WTA09]

Im Normalfall erfolgt die energetische Sanierung von Außenwänden über das Anbringen von Dämmschichten an der Außenseite der bestehenden Konstruktion. Im Falle historischer Gebäude mit gegliederten, erhaltenswerten Fassaden, die etwa in Wien einen bedeutenden Teil der vorhandenen Bausubstanz ausmachen, ist die Realisierung einer Außendämmung jedoch nicht möglich. In diesem Fall bleibt nur die Möglichkeit, eine Innendämmung auszuführen. Die Applikation eines Innendämmsystems birgt jedoch, im Gegensatz zur bauphysikalisch weitgehend unproblematischen Außendämmung, immer ein Risiko bezüglich der hygrischen Prozesse im Bauteil und bedarf einer besonders sorgfältigen Planung und Ausführung. Eine Innendämmung sollte deshalb gemäß WTA-Merkblatt 6-4 [WTA09] nur dann ausgeführt werden, „wenn andere Möglichkeiten der Anordnung von Wärmedämmschichten ausscheiden“.

Neben den bauphysikalischen Risiken, auf die in Abschnitt 3.2 gesondert eingegangen wird, weist ein Innendämmsystem jedoch auch Vorteile auf. So ist etwa eine Sanierung von einzelnen Wohnungen und Büros im Altbestand möglich. Auch der Aufwand für eine Einrüstung der Fassade entfällt. In selten genutzten Gebäuden ist durch die Innendämmmaßnahme eine rasche Aufheizbarkeit der Räume gegeben, da die massiven Außenbauteile nicht miterwärmt werden müssen. Im Gegenzug tragen die Außenwände jedoch nur mehr in geringem Maße zum sommerlichen Wärmeschutz bei, da sie nicht mehr als speicherwirksame Masse herangezogen werden können. Grundsätzlich kann durch eine Innendämmung auch eine Verbesserung des Schallschutzes erzielt werden. Neben dem Nachteil eines grundsätzlich höheren bauphysikalischen Risikos kommt es durch eine Innendämmmaßnahme auch zu einer Reduktion der Wohnfläche. Zudem sind die Innenräume während der Zeit der Ausführung nur eingeschränkt nutzbar. [WTA09]

### 3.2 Bauphysikalische Auswirkungen

Durch die Applikation eines Innendämmsystems kommt es zu einer Veränderung des thermischen Verhaltens der Bestandskonstruktion (siehe Abb. 6).

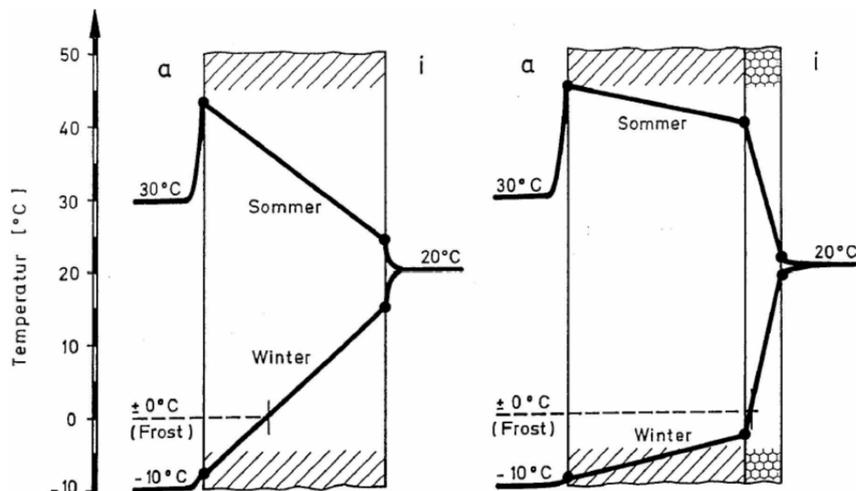


Abb. 6: Veränderung des thermischen Verhaltens durch Applikation einer Innendämmung [KIE92]

Während der Bestandskonstruktion ursprünglich in der kalten Jahreszeit Wärme aus dem Innenraum zugeführt wurde, ist sie nun, in Abhängigkeit von der Dämmstärke, weitgehend abgekoppelt von der Innentemperatur. Dadurch kommt es zu einer stärkeren thermischen Belastung der Bestandskonstruktion im Sommer wie im Winter. Der Taupunkt verlagert sich ins Innere der Konstruktion, was unter anderem eine erhöhte Gefahr von Frostschäden mit sich bringt.

In der kalten Jahreszeit kann „die Temperatur hinter der Dämmung unter den Taupunkt der Raumluft absinken“ [KÜN02]. Durch Wasserdampfdiffusion oder das Eindringen warmer, feuchter Raumluft in die Konstruktion kommt es dann an der Grenzfläche zwischen Bestandskonstruktion und Dämmmaterial zu einem Tauwasserausfall (siehe Abb. 7), der zu Feuchteschäden und Schimmelbildung führen kann.

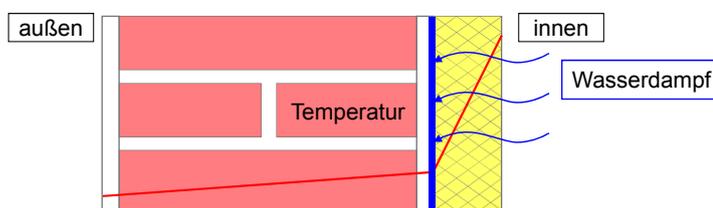


Abb. 7: Tauwasseranfall an der Grenzfläche zur Bestandskonstruktion [PLA13]

Zudem wird, vor allem in der kalten Jahreszeit, das Trocknungspotential der Außenwand durch die Absenkung des Temperaturniveaus in der Bestandskonstruktion reduziert. Bei hoher Schlagregenbeanspruchung kann dies zu kritischen Feuchtezuständen führen. [WTA09]

### 3.3 Arten von Innendämmsystemen

Um die in Abschnitt 3.2 beschriebene Gefahr einer Tauwasserbildung hinter der Dämmschichtebene zu reduzieren, gibt es zwei grundsätzliche Arten der Ausführung einer Innendämmung.

#### a) Dampfbremsende Ausführung

Eine Möglichkeit besteht darin, den Eintrag von Wasserdampf über Diffusion bzw. Konvektion durch eine raumseitig angebrachte Dampfbremse zu begrenzen (siehe Abb. 8). Üblicherweise besteht eine solche Konstruktion aus einer Dämmschicht (meist Mineralwolle), einer Dampfbremse sowie einer Verkleidung aus Gipskartonplatten. Eine dampfdichte Ausführung ist auch durch die Verwendung dampfdichter Dämmmaterialien wie Schaumglasplatten oder vakuumgedämmter Isolationspaneele möglich. [WEG10]

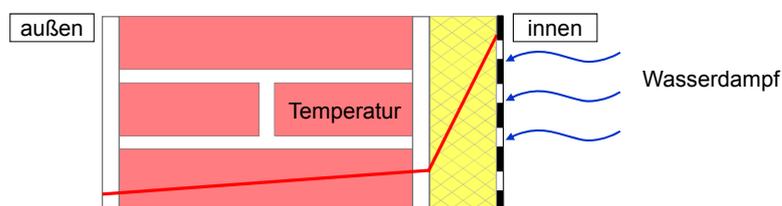
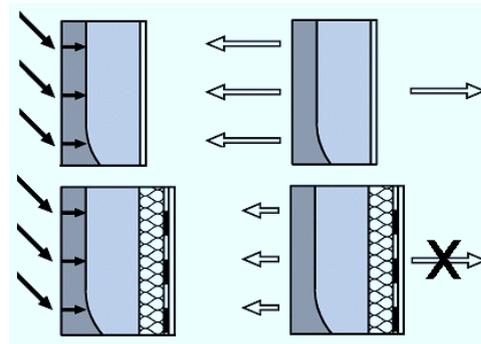


Abb. 8: Dampfbremsende Ausführung einer Innendämmung [PLA13]

Die Ausführung eines wasserdampfdichten bzw. -bremsenden Innendämmsystems weist jedoch Nachteile auf. Die Montage einer solchen Konstruktion bedarf großer Sorgfalt, da gerade im Bereich der Verklebung der Folienbahnen leicht Leckagen entstehen können, durch die ein Feuchteintrag in unzulässigem Maße möglich ist. Bei unregelmäßiger Geometrie oder Sprüngen im Mauerwerk wie zum Beispiel im Bereich von Fenstern oder Heizkörpernischen ist die erforderliche dampfbremsende Wirkung des Systems selbst bei sorgfältiger Verarbeitung oft nicht möglich. Auch langfristig besteht die Gefahr einer Beschädigung der Dampfbremse, etwa bei der Befestigung von Bildern, Vorhängen, etc durch den Bewohner.

Weiters ist durch die dampfdichte Ausführung eine Trocknung der Konstruktion nach einer Schlagregenbelastung nur mehr nach außen hin möglich und auch dies aufgrund der Senkung des Temperaturniveaus in vermindertem Ausmaß (siehe Abb. 9). [KÜN02]

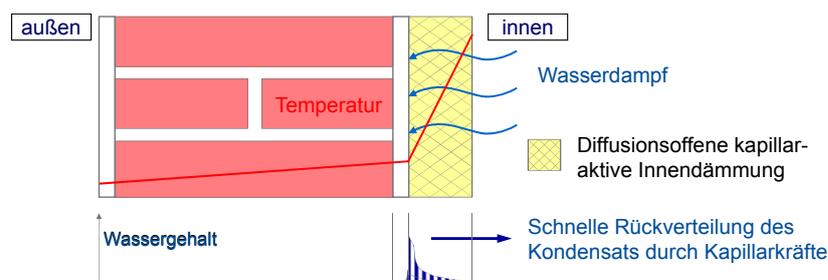


**Abb. 9:** Veränderung des Trocknungsverhaltens durch eine Innendämmung mit Dampfbremse [KÜN02]

#### b) Kapillaraktive Innendämmung

Aufgrund der Fehleranfälligkeit von dampfdichten Innendämmsystemen kommen vermehrt kapillaraktive Dämmsysteme zum Einsatz. Diese bestehen aus einem diffusionsoffenen Material mit ausgeprägter kapillarer Leitfähigkeit. Zumeist werden Platten aus Kalziumsilikat (CaSi) verwendet, die aus Kalziumoxid, Siliziumoxid, Zellulosefasern und Wasser hergestellt werden und hauptsächlich als Dämmmaterial im Hochtemperaturbereich Anwendung finden. Weitere kapillaraktive Materialien sind etwa Ziegel, Holzwerkstoffe oder Lehm. [WEG10]

Da das Dämmmaterial diffusionsoffen ist, dringt in der kalten Jahreszeit Feuchte über Wasserdampfdiffusion in die Konstruktion ein und kondensiert hinter der Dämmebene. Dieses angefallene Tauwasser wird durch die kapillare Leitfähigkeit des Dämmmaterials in den Raum zurückgeführt bzw. im Material verteilt, da der kapillare Feuchtetransport stets vom höheren zum geringeren Feuchtegehalt stattfindet (siehe Abb. 10). Es kommt zu einer Überlagerung von Dampf- und Flüssigwassertransport in den Poren des Dämmmaterials, die in entgegengesetzter Richtung ablaufen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Durch diese Vorgänge können kritische Feuchtezustände hinter der Dämmung reduziert werden. Auch Trocknungsvorgänge nach Schlagregenbelastungen können schneller ablaufen. Die Wirksamkeit und Funktionstüchtigkeit kapillaraktiver Innendämmsysteme konnte bereits mehrfach in Objekten mit begleitender Messung nach dem Einbau verifiziert werden. [WEG10]



**Abb. 10:** Prinzip der kapillaraktiven Innendämmung [PLA13]

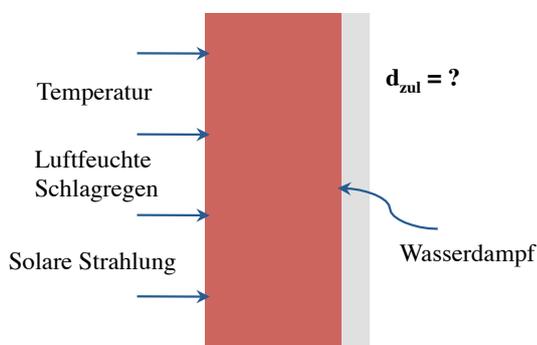
Ein Nachteil der Kalziumsilikatplatten besteht darin, dass die Wärmeleitfähigkeit etwas höher ist als die üblicher Dämmstoffe. Während EPS-Platten oder Mineralwolle einen  $\lambda$ -Wert von etwa 0,04 W/mK aufweisen, liegt er bei Kalziumsilikatplatten bei 0,065 bis 1,0 W/mK. Aufgrund der sehr guten kapillaren Leitfähigkeit und des hohen pH-Wertes von 10, durch den die Schimmelbildung zusätzlich behindert wird, wird sie jedoch sehr häufig für Innendämmungen herangezogen. [WEG10]

### 3.4 Bemessung kapillaraktiver Innendämmsysteme

#### 3.4.1 Vorbemerkungen

Bei kapillaraktiven Innendämmsystemen ist der Begriff des Feuchtemanagements von großer Bedeutung. Im Gegensatz zu dampfdichten Konstruktionen kann der Bauteil in einem gewissen Maße Feuchtigkeit aufnehmen, jedoch nur so viel, dass ein Austrocknen nach kurzer Zeit möglich ist. Es gibt also immer ein Maß an Feuchtebelastung, das eine Konstruktion nicht schadensfrei bestehen kann.

Ob es bei einer bestimmten Belastung der Konstruktion zu kritischen Feuchtezuständen kommt, ist auch von den Dimensionen der Innendämmung abhängig. Eine Innendämmung ist feuchte-technisch umso kritischer, je stärker sie ausgeführt wird. Je stärker, desto weniger Wärme kann im Winter von innen nach außen dringen und desto geringer ist somit das Trocknungspotential der Bestandskonstruktion. Die Temperatur hinter der Dämmung ist ebenfalls umso geringer, je höher die Dämmstärke ist, was die Gefahr eines Tauwasserausfalls erhöht. Bei besonders großer Feuchtebelastung aus dem Innenraum können jedoch auch bei geringen Dämmstärken bereits kritische Feuchtezustände entstehen. Andererseits soll der Nutzen der Innendämmung durch eine möglichst große Dämmstärke maximiert werden (siehe Abb. 11).



**Abb. 11:** Klimatische Einflussfaktoren für die Bemessung einer kapillaraktiven Innendämmung

Die Bemessung einer kapillaraktiven Innendämmung muss somit möglichst genau auf die vor Ort vorhandenen innen- und außenklimatischen Verhältnisse eingehen. Im Gegensatz zu bewährten

Konstruktionen kann aufgrund der komplexen bauphysikalischen Zusammenhänge und der selbst innerhalb kürzester räumlicher Distanzen unterschiedlichen außenklimatischen Verhältnisse (An- und Umströmungsverhältnisse des Gebäudes, Verschattung, etc) sowie unterschiedlicher Nutzung (Feuchtelast aus dem Innenraum) keine pauschale Empfehlung für die Dimensionierung einer Innendämmung gegeben werden.

### 3.4.2 Bemessung mittels hygrothermischer Simulation

Stand der Technik für eine feuchteschutztechnisch sichere Bemessung einer kapillaraktiven Innendämmung bei gleichzeitiger Maximierung des Energieeinsparpotentials ist die Bemessung mittels hygrothermischer Simulation, da damit eine Berücksichtigung sämtlicher wesentlicher Wärme- und Feuchtetransportprozesse möglich ist und durch die Verwendung instationärer Klimadaten sehr genau auf die innen- und außenklimatischen Verhältnisse vor Ort eingegangen werden kann. Eine Bemessung mittels Glaser-Verfahren ist nicht möglich, da dabei weder die Belastung durch Schlagregen noch die Effekte der kapillaren Rückleitung durch das Dämmmaterial erfasst werden können.

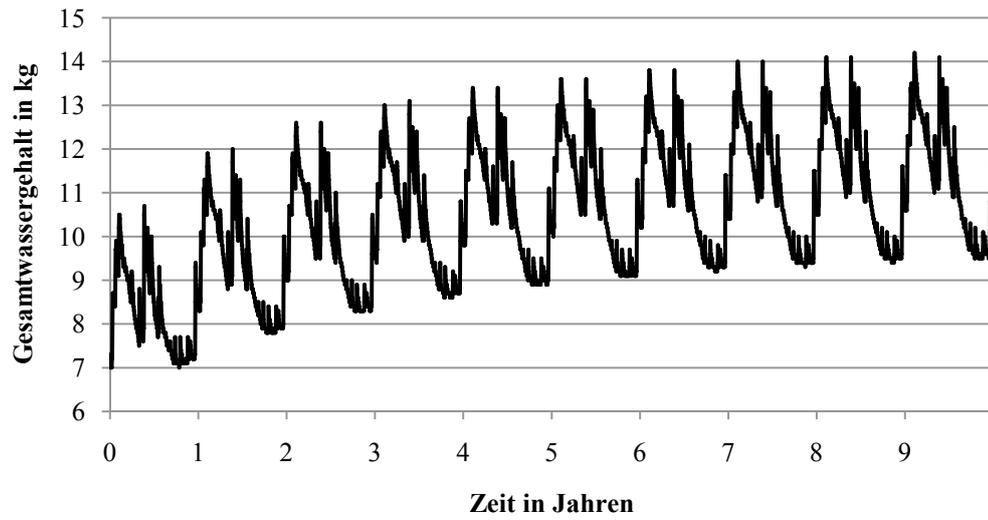
Das WTA-Merkblatt E 6-5 [WTA12], das derzeit als Entwurf vorliegt, bietet Hinweise für die Wahl der Simulations-Randbedingungen sowie die Bewertung der erhaltenen Ergebnisse. Um die Dauerhaftigkeit der untersuchten Innendämmung zu gewährleisten, werden zwei zu erfüllende Kriterien angegeben:

1. Vorhandensein eines eingeschwungenen Zustandes

Bei Verwendung eines sich jährlich wiederholenden (Referenz-)Klimadatensatzes darf es zu keiner kontinuierlichen Feuchteanreicherung in der Konstruktion kommen. Nach einer Einschwingphase von einigen Jahren (aufgrund der Anfangsfeuchten in den Materialschichten) sollte der Gesamtwassergehalt einen Grenzwert anstreben. Ein eingeschwungener Zustand gilt als erreicht, wenn die Steigerung des Gesamtwassergehaltes einen Wert von 1% gegenüber dem Gesamtwassergehalt des Vorjahres unterschreitet (siehe Abb. 12).

2. Keine unzulässigen Feuchtegehalte

Wird ein eingeschwungener Zustand erreicht, müssen die auftretenden maximalen Feuchtegehalte beurteilt werden. Dabei soll die Festigkeit und Frostbeständigkeit der Materialien gewährleistet sein und keine Gefahr von Schimmelbildung oder Verrottung bestehen. Als wesentliche Kenngröße wird die relative Luftfeuchte einer Materialschicht angegeben.



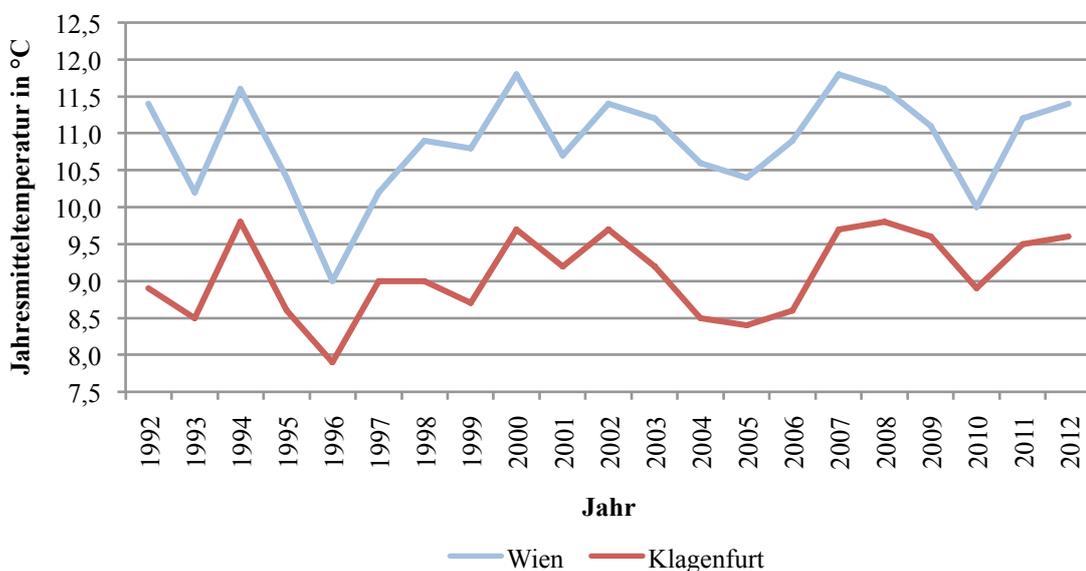
**Abb. 12:** Beispiel eines eingeschwungenen Zustands nach etwa 7 Jahren

## 4 Klimadaten

### 4.1 Vorbemerkungen

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Klima-Rohdaten wurden über das Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in Wien von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) bezogen.

Zunächst wurde der Standort Wien für die anzustellenden Untersuchungen herangezogen, da hier aufgrund der umfangreichen historischen Bausubstanz ein großes Anwendungspotential für Inwenddämmsysteme gegeben ist und zudem für den Standort Wien Hohe Warte besonders vollständige Aufzeichnungen der in die hygrothermische Simulation eingehenden Klimaparameter vorhanden sind. Als zweiter Standort wurde Klagenfurt betrachtet. Klagenfurt weist, gerade in den Wintermonaten, besonders geringe mittlere Temperaturen auf, weshalb dieser Standort oft als maßgeblicher bzw. besonders kritischer Fall für Untersuchungen bezüglich der Dauerhaftigkeit von Konstruktionen herangezogen wird [ZEL12]. Einen Vergleich der Jahresmitteltemperaturen (Mittelwert der stündlichen Werte eines gesamten Jahres) für beide Standorte im Zeitraum 1992 bis 2012 zeigt Abb. 13.



**Abb. 13:** Vergleich Jahresmitteltemperatur Wien/Klagenfurt

Für den Standort Wien Hohe Warte standen im Rahmen dieser Arbeit stündliche Daten seit 01.01.1951 zur Verfügung. Am Standort Klagenfurt waren Daten für sämtliche Parameter erst ab dem Jahr 1992 verfügbar.

In Wien wurde auf Grundlage der Daten von 1983 bis 2012 (30 Jahre) eine langjährige Durchschnittstemperatur von 10,7°C ermittelt, in Klagenfurt beträgt diese für den Zeitraum 1993 bis 2012 (20 Jahre) 9,1°C.

## 4.2 Arten von Klimadaten

### 4.2.1 Grundlagen

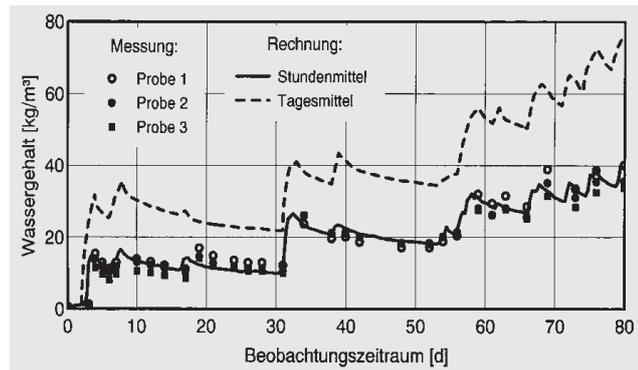
Für die Erstellung der für die Simulation mit HAM4D\_VIE benötigten Klima-Dateien wurden folgende Klimaparameter verwendet:

- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Globalstrahlung
- Diffusstrahlung
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Niederschlag

Diese Klimaparameter können in verschiedener zeitlicher Auflösung vorliegen. Während für Berechnungen mittels Glaser-Verfahren Monatsmittelwerte ausreichen, werden im Rahmen von hygrothermischen Simulationen üblicherweise stündliche Daten herangezogen.

Wenn die Schlagregenbelastung großen Einfluss auf den Feuchtehaushalt der betrachteten Konstruktion hat, kann es ratsam sein, eine noch feinere Zeitauflösung zu verwenden (z.B. 10 Minuten), da Regenereignisse zumeist zu Beginn stärker ausfallen und die Niederschlagsmenge nach einiger Zeit abnimmt. Die zeitliche Streckung des gefallenen Niederschlags über den Zeitraum von einer Stunde führt tendenziell zu einer größeren Wasseraufnahme, da durch die begrenzte Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade bei starken Regenereignissen ein größerer Teil des Niederschlags nicht aufgenommen werden kann. [KÜN94a]

Niederschlagsdaten mit einer Auflösung von 10 Minuten liegen jedoch für keinen österreichischen Standort über einen langen Zeitraum vor und werden im Normalfall nur durch eigene Messungen erhalten. Künzel zeigte zudem in [KÜN94a], dass durch Berechnungen mit Stundenmittelwerten der Feuchtehaushalt einer Konstruktion gut wiedergegeben werden kann. Lediglich bei der Verwendung von Tagesmittelwerten ergaben sich deutlich zu hohe Wassergehalte für den untersuchten Probekörper (siehe Abb. 14).



**Abb. 14:** Vergleich von Messwerten und Berechnungen mit Stunden- und Tagesmittelwerten [KÜN94a]

Für die vorliegende Arbeit wurden für alle Parameter stündliche Werte herangezogen. Dabei stellen die Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte Momentanwerte zur vollen Stunde dar, während für den Niederschlag Stundensummen gebildet werden. Bei den Werten für Global- und Diffusstrahlung sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit handelt es sich um Mittelwerte über den Zeitraum von einer Stunde.

#### 4.2.2 Testreferenzjahre

Testreferenzjahre (Test Reference Year - TRY) wurden für die energetische Gebäudesimulation entwickelt. Diese Datensätze enthalten alle in Abschnitt 4.2.1 genannten Parameter in stündlicher Auflösung für den Zeitraum eines Jahres und stellen je Klimaregion repräsentative, mittlere Witterungsverhältnisse dar. Sie dienen der Ermittlung des Langzeit-Energieverbrauchs eines Gebäudes. [KÜN00]

Zur Ermittlung eines TRY für einen bestimmten Standort werden zunächst die langjährigen Monatsmittelwerte für sämtliche in den Datensatz aufzunehmende Klimaparameter ermittelt. Üblicherweise sollten den Testreferenzjahren langjährige Messreihen über 30 Jahre zugrunde gelegt werden. Durch das „Aneinanderstückeln von aus dem Basisdatensatz ausgesuchten Monaten spezieller Jahre, die Monatsmittelwerte bzw. Monatssummen liefern, die den vorgegebenen Werten möglichst nahe kommen“ wird ein TRY generiert. Um die Korrelationen zwischen den betrachteten Klimaparametern zu erhalten, werden stets vollständige Monats-Datensätze aneinandergereiht. [KRE10]

Für die vorliegende Arbeit standen Testreferenzjahre für den Standort Wien und Klagenfurt für die Periode 1991 bis 2005 zur Verfügung.

#### 4.2.3 Halbsynthetische Klimadaten

Halbsynthetische Klimadaten (HSKD) basieren auf den zuvor beschriebenen Testreferenzjahren. Diese werden durch „kleine Änderungen an den Stundenwerten aller in Betracht gezogenen me-

teorologischen Größen derart verändert, dass die vorgegebenen Monatsmittelwerte von jeder Datenart möglichst genau eingehalten werden und gleichzeitig die Korrelation zwischen den Werten verschiedener Datenarten erhalten bleibt“. [KRE10]

In [KRE10] wurden Datensätze mit halbsynthetischen Klimadaten, unter anderem für den Standort Wien, erstellt. Diese enthalten jedoch nicht alle für die hygrothermische Simulation erforderlichen Parameter (vgl. Abschnitt 4.2.1) und konnten deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden.

### 4.3 Aufbereitung der Klimadaten

#### 4.3.1 Vorbemerkungen

Eine Klimadatei, die als Außenrandbedingung für die hygrothermische Simulation mittels HAM4D\_VIE verwendet wird, enthält Werte für die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die solare Einstrahlung und die Schlagregenbelastung. Während die stündlichen Daten für die Temperatur und die relative Luftfeuchte direkt aus den Messdaten übernommen werden können, hängen die Schlagregenbelastung und die solare Einstrahlung von der Ausrichtung des betrachteten Bauteils bzw. dem Zusammenwirken mehrerer Klimaparameter ab.

#### 4.3.2 Schlagregen

Eine Schlagregenbelastung entsteht gemäß DIN 4108-3 [DIN01] „bei Regen und gleichzeitiger Windanströmung auf die Fassade“. Es handelt sich somit um jenen Teil des Niederschlags, der auf einen Bauteil mit bestimmter Ausrichtung tatsächlich auftrifft.

Von den Messdaten für den Normalregen kann nicht auf die Schlagregenbelastung einer Fassade geschlossen werden. Diese ist nämlich davon abhängig, ob zur Zeit des Niederschlages eine Windströmung in Richtung der betrachteten Fassade mit einer gewissen Windgeschwindigkeit vorhanden ist. Zudem beeinflussen lokale An- und Umströmungsverhältnisse, Hindernisse (Nachbargebäude, Bäume, etc) sowie die Lage des betrachteten Bauteils am Gebäude die Menge des Schlagregens.

Künzel konnte in [KÜN94a] für den Standort Holzkirchen einen proportionalen Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Schlagregen und Normalregen bei einer nach Westen ausgerichteten Fassade nachweisen. Er führte deshalb einen Proportionalitätsfaktor  $r_s$  ein, mit dem die stündliche Schlagregenbelastung einer Fassade näherungsweise nach Gleichung (1) errechnet werden kann.

$$R_S = r_S \cdot v \cdot R_N \quad (1)$$

$R_S$  Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche in mm/h

$R_N$  Normalregen in mm/h

$v$  Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche in 10 m Höhe in m/s

$r_S$  Proportionalitätsfaktor in s/m

Dieser Proportionalitätsfaktor muss jedoch in der Regel durch Schlagregenmessungen ermittelt werden und ist zudem „von der Position der betrachteten Bauteiloberfläche am Gebäude abhängig“. [KÜN94a]

In Anlehnung an die britische Schlagregen-Norm entstand die ÖNORM EN ISO 15927-3 [ONO09], die es ermöglicht, auf Grundlage stündlicher Wind- und Niederschlagsdaten das Schlagregenaufkommen für eine bestimmte Bauteilausrichtung zu ermitteln. Das darin enthaltene Verfahren wurde auch im Rahmen dieser Arbeit angewandt.

Zunächst wird ein Windfeldindex ermittelt. Dabei handelt es sich um jene Schlagregenmenge, die „während einer Stunde je Quadratmeter der Wandfläche an einer senkrechten Wand gegebener Ausrichtung in einer Höhe von 10 m über der Geländeoberkante in der Mitte eines Windfeldes am geographischen Ort der Wand auftreten würde“. [ONO09]

In [ONO09] ist die Formel für den jährlichen Windfeldindex  $I_A$  gemäß Gleichung (2) angegeben.

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

$I_A$  Jährlicher Windfeldindex in l/m<sup>2</sup>

$v$  Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in m/s

$r$  stündliche Gesamtregenmenge in mm

$D$  Stundenmittel der Windrichtung, Bezugsrichtung Norden in °

$\Theta$  Ausrichtung der Wand in Bezug auf Norden in °

$N$  Anzahl der Jahre mit verfügbaren Daten

Beim jährlichen Windfeldindex handelt es sich um eine mittlere jährliche Schlagregenmenge. Dabei werden nur jene Stunden erfasst, in denen  $\cos(D - \Theta)$  positiv ist, wo also die betrachtete Wand durch Wind belastet wird. Um zu geeigneten Eingabedaten für HAM4D\_VIE zu gelangen, wurde der Windfeldindex für jede Stunde ausgegeben.

Bei den ermittelten Windfeldindizes handelt es sich um jene Schlagregenmengen, die von einem „frei stehenden Schlagregenmessgerät in einem flachen offenen Gelände aufgefangen würden“. Um die örtlichen Gegebenheiten miteinzubeziehen, wird der ermittelte Windfeldindex mit ver-

schiedenen Abminderungsfaktoren multipliziert. Dadurch wird der Wandindex  $I_{WA}$  erhalten, der die auf eine Wand auftreffende Schlagregenmenge unter Berücksichtigung der Wandausrichtung sowie der örtlichen Gegebenheiten darstellt. [ONO09]

$$I_{WA} = I_A \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \quad (3)$$

$I_{WA}$	Wandindex in $l/m^2$
$I_A$	Windfeldindex in $l/m^2$
$C_R$	Geländeunebenheitsfaktor
$C_T$	Topographiefaktor
$O$	Hindernisfaktor
$W$	Wandfaktor

Der Geländeunebenheitsfaktor hängt von der vorhandenen Geländekategorie ab (I - Raue offene See bis IV - Stadtgebiete). Der Topographiefaktor „berücksichtigt den Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeit über einzelnen liegenden Hügel und Steilhängen“. Der Hindernisfaktor ist abhängig von der horizontalen Entfernung des nächstgelegenen Hindernisses, das mindestens genauso hoch wie die Wand ist. Der Wandfaktor  $W$  ist von der Gebäudehöhe sowie der Position des betrachteten Bauteils auf der Gebäudefläche abhängig. [ONO09]

#### 4.3.3 Solare Strahlung

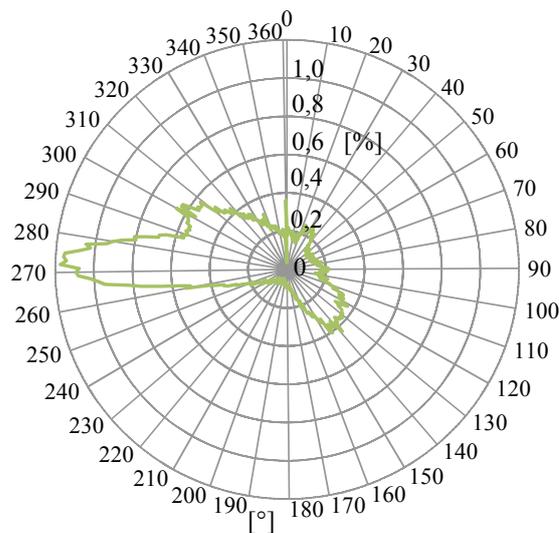
Auch im Falle der solaren Einstrahlung auf die betrachtete Konstruktion erfolgte eine Umrechnung der erhaltenen Daten für Direkt- und Diffusstrahlung entsprechend der Ausrichtung und Neigung des Bauteils sowie verschiedener Umgebungs-Randbedingungen nach [PER90].

#### 4.3.4 Gewählte Randbedingungen

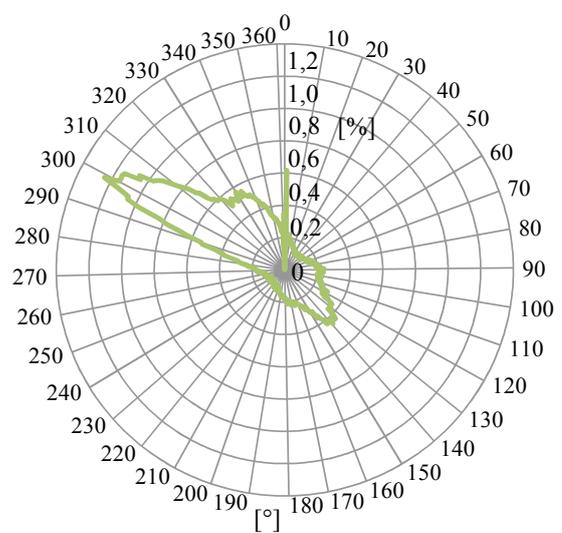
Um die Ergebnisse der anzustellenden Untersuchungen vergleichen zu können, wurden die verfügbaren Klimadaten, auch im Falle der Testreferenzjahre, stets unter Verwendung der gleichen örtlichen Randbedingungen umgerechnet. Dabei wurde darauf geachtet, möglichst realistische Parameter zu wählen.

Als ein Hauptanwendungsgebiet für Innendämmsysteme wurden bereits in Abschnitt 3.1 innerstädtisch gelegene Bauten aus der Gründerzeit identifiziert. Somit wurde Geländekategorie IV („Stadtgebiete, in denen mindestens 15% der Oberfläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet“) gewählt. Als Topographiefaktor wurde der Wert 1,0 gewählt, da angenommen wird, dass sich das betrachtete Gebäude in einer flachen, innerstädtischen Umgebung befindet. Es wird weiters angenommen, dass sich das nächste Hindernis (gegenüberliegende

Häuserzeile) in 15 bis 25 m Entfernung befindet, wodurch sich ein Hindernisfaktor von 0,4 ergibt. Als Wandfaktor wurde ein Wert von 0,3 gewählt, was einen mittelmäßig kritischen Wert darstellt. Bezüglich der Ausrichtung des betrachteten Bauteils soll gemäß WTA-Merkblatt E 6-5 [WTA12] der Hauptwetterseite besondere Beachtung geschenkt werden. Da die Schlagregenmenge von der Windbelastung abhängig ist, wurden die Häufigkeiten der Windrichtungen für Wien und Klagenfurt ermittelt (siehe Abb. 15 sowie Abb. 16). Grundlage für die ermittelten Häufigkeiten waren die Jahre 1983 bis 2012 (30 Jahre) für den Standort Wien Hohe Warte und die Jahre 1993 bis 2012 (20 Jahre) für den Standort Klagenfurt.



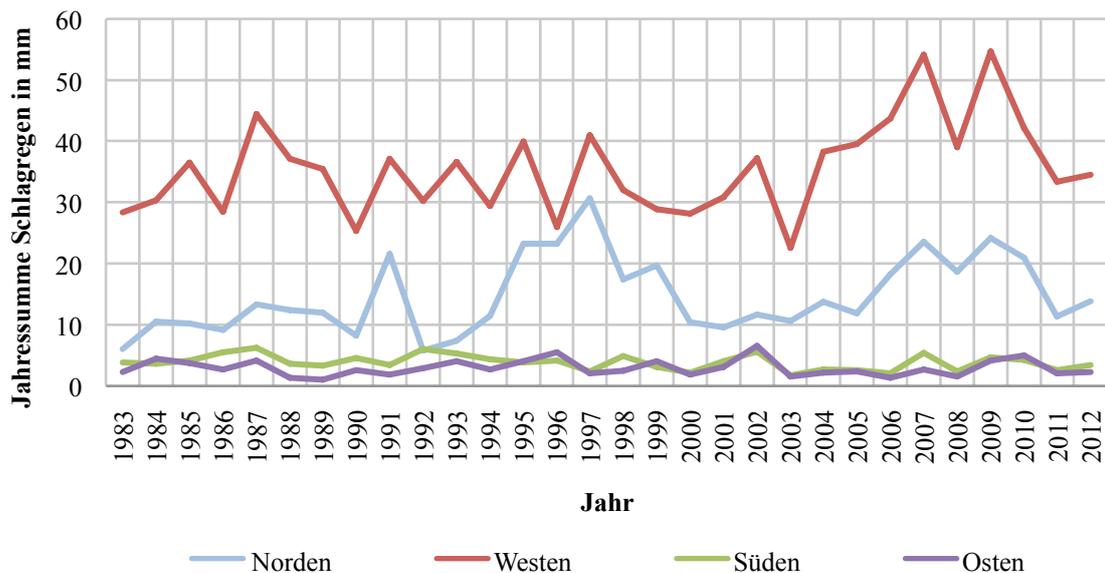
**Abb. 15:** Häufigkeit Windrichtung Wien



**Abb. 16:** Häufigkeit Windrichtung Klagenfurt

In den Abbildungen ist erkennbar, dass am Standort Wien eindeutig Westen (270° von Norden aus) die Hauptwetterseite darstellt, am Standort Klagenfurt ist die Hauptwetterseite Westen bis Nord-Westen.

Für die Aufbereitung der Klimadaten bezüglich Schlagregenbelastung und Solarer Strahlung wird aufgrund dieser Erkenntnisse für beide Standorte grundsätzlich eine Westausrichtung der Konstruktion angenommen. Gemäß [WTA12] ist auch die Nordausrichtung von Interesse für die hygrothermische Beurteilung. Zwar ist die Schlagregenbelastung bei Nordausrichtung in der Regel deutlich geringer als bei Westausrichtung, gleichzeitig sind jedoch die Werte für die solare Strahlung bei Nordausrichtung gering, wodurch ein reduziertes Trocknungspotential nach einer Schlagregenbelastung besteht und somit geringere Regenmengen kritische Feuchtezustände verursachen können. Einen Vergleich des Schlagregenaufkommens am Standort Wien für verschiedene Ausrichtungen unter den gewählten Randbedingungen zeigt Abb. 17.



**Abb. 17:** Errechnetes Schlagregenaufkommen je Ausrichtung (Standort Wien)

#### 4.3.5 Fehlende Daten

Sowohl für den Standort Wien Hohe Warte wie auch für Klagenfurt waren die erhaltenen Daten in den betrachteten Zeitabschnitten teilweise unvollständig. Dies ist vor allem durch Fehler bei der Aufzeichnung der Messdaten bedingt. Die fehlenden Daten wurden durch Daten aus vergleichbaren bzw. benachbarten Jahren oder, wenn es sich um einzelne fehlende Stundenwerte handelte, durch interpolierte Werte ersetzt. Wurde beispielsweise in Stunde 22 eine Temperatur von 3,2°C gemessen und in Stunde 24 eine Temperatur von 3,4°C, wurde für die fehlende Stunde 23 ein Wert von 3,3°C eingesetzt. Ergab sich aufgrund von Messfehlern bei Global- und Diffusstrahlung eine negative Direktstrahlung, wurde der betreffende Wert auf 0 gesetzt.

#### 4.4 Innenraumklima

Da in der vorliegenden Arbeit vor allem die Auswirkungen verschiedener Außenklimata untersucht werden, ist das gewählte Innenklima von untergeordneter Bedeutung. Durch die Verwendung von einheitlichen Innenraumbedingungen für alle durchzuführenden Simulationen soll gewährleistet werden, dass das Innenklima die Ergebnisse in gleicher Weise beeinflusst.

Um den Simulationen dennoch möglichst realistische Innenklima-Bedingungen zugrunde zu legen, wurde ein instationärer, sinusförmiger Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte gewählt, wie dies auch in WTA-Merkblatt 6-2 [WTA01] empfohlen wird. Beide Parameter erreichen im August ihr Maximum. Der gewählte Verlauf ist in Abb. 18 dargestellt (1 Jahr entspricht 8760 Stunden). Die Temperatur bewegt sich dabei im Bereich von 22 bis 26°C und die relative Luftfeuchte zwischen 40 und 60% („normale Feuchtelast“). [WTA01]

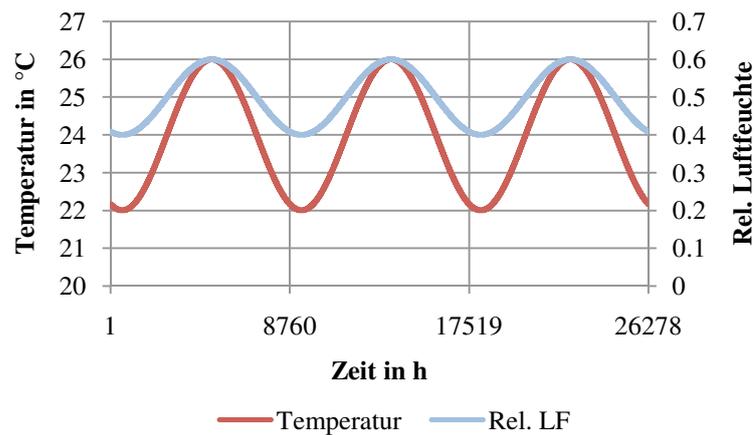


Abb. 18: Gewählter Verlauf der Innenklima-Parameter

#### 4.5 Erstellung von Klimadateien für HAM4D\_VIE

Für die hygrothermische Simulation mittels HAM4D\_VIE müssen die gemessenen bzw. errechneten Daten in einer Klimadatei zusammengefasst werden. In diese gehen neben den stündlichen Werten für Temperatur, relative Luftfeuchte, Solare Strahlung und Schlagregenbelastung auch weitere Parameter ein (siehe Abschnitt 2.3).

Die ÖNORM EN 15026 [ONO07] empfiehlt, den konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten  $h_c$  nach Gleichung (4) zu ermitteln.

$$h_c = 4 + 4 \cdot v \quad (4)$$

$h_c$  konvektiver Wärmeübertragungskoeffizient in  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

$v$  Windgeschwindigkeit (nahe der Gebäudeoberfläche gemessen) in  $\text{m}/\text{s}$

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, sind dazu aber Messwerte der Windgeschwindigkeit an der Gebäudeoberfläche erforderlich. Laut WTA-Merkblatt 6-2 [WTA01] ist die Abhängigkeit des konvektiven Übertragungskoeffizienten von „den lokalen Strömungsverhältnissen, der Temperatur und der Bauteilgeometrie“ ohnehin so komplex, dass empfohlen wird, für  $h_c$  im Außenbereich einen Wert von  $17 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  und im Innenbereich einen Wert von  $8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  heranzuziehen. Auch die Werte für den Wasserdampfübergangskoeffizienten  $\beta_p$  wurden aus dem WTA-Merkblatt übernommen.

Die Strahlungstemperatur wurde im Außenbereich in Anlehnung an [ONO08] stets um 10 K geringer angenommen als die Lufttemperatur. Im Innenraum wurde angenommen, dass die Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur ist.

Die Saugspannung sowie der Luftdruck wurden in allen Klimadateien gleich 0 gesetzt, da diese Parameter für die durchzuführenden Simulationen keine Bedeutung haben. Eine Zusammenstellung sämtlicher gewählter Parameter zeigt Tab. 1.

**Tab. 1:** Gewählte Parameter der Klimadateien

Parameter	Außen	Innen	Einheit
Konvektiver Wärmeübertragungs- koeffizient $h_c$	17	8	W/m <sup>2</sup> K
Wasserdampfübergangskoeffizient $\beta_p$	$75 \cdot 10^{-9}$	$25 \cdot 10^{-9}$	kg/m <sup>2</sup> sPa
Effektiver Emissionsgrad $\varepsilon$	0,9	0,9	-
Absorptionsgrad	0,6	0,5	-

## 5 Modellbildung

### 5.1 Gewähltes Detail

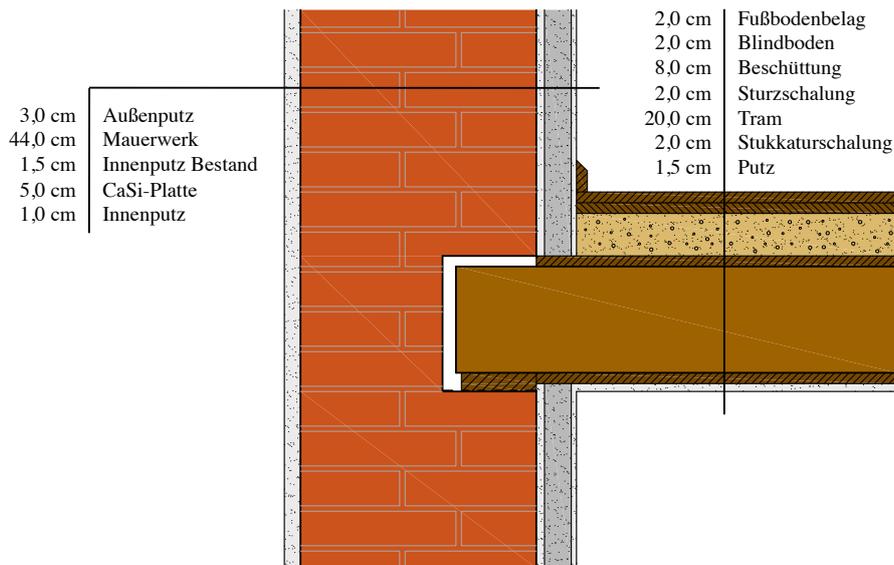
Die auf Grundlage einer hygrothermischen Simulation erhaltenen Dimensionen eines Innendämmsystems sind auch vom untersuchten Detail abhängig. Eine Simulation für ein kritisches Detail, das etwa Querschnittschwächungen oder Bauteildurchdringungen enthält, wird im Normalfall eher kritische Feuchtezustände aufweisen als die Simulation für einen eindimensional betrachteten Wandquerschnitt.

Übliche kritische Details bei Applikation eines Innendämmsystems sind

- Innenwandanschlüsse,
- Deckenanschlüsse (Massivdecke),
- der Balkenkopf (Tramdecke),
- Fensterlaibungen und
- Raumecken. [WEG10]

Auf Innenwandanschlüsse und Fensterlaibungen muss zwar in einer separaten Dimensionierung eingegangen werden, sie haben jedoch keinen Einfluss auf die Dimensionen der Innendämmung an der Außenwand.

Da die Applikation einer Innendämmung durch die in Abschnitt 3.2 beschriebenen bauphysikalischen Vorgänge immer ein gewisses Risiko birgt und, wenn möglich, vermieden werden sollte, stellen Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden, wo eine Reduktion der Transmissionswärme auf anderem Wege nicht möglich ist, das Hauptanwendungsgebiet für Innendämmsysteme dar. Gründerzeithäuser weisen im Normalfall auch Tramdecken-Konstruktionen auf, wobei der Bereich des Tramaufagers als besonders kritisch anzusehen ist. Die Durchdringung des Mauerwerks durch den Holztram sowie die Schwächung des Wandquerschnittes im Bereich des Tramaufagers stellen Wärmebrücken dar, die zu kritischen Feuchtezuständen im Bereich der Innendämmung führen können. Zudem sind der Balkenkopf und der Bereich des Auflagers, da es sich um organische Materialien handelt, besonders durch kritische Feuchtezustände (Braunfäule, etc) bedroht. Für die Dimensionierung einer Innendämmung ergeben sich dadurch verschiedene in feuchtetechnischer Hinsicht kritische Punkte, auf die in Abschnitt 6.3.4 näher eingegangen wird. Dieses Detail hat somit bestimmenden Einfluss auf die mögliche Stärke der Innendämmung an der Außenwand in einer typischen Anwendungssituation und wird deshalb für die weiteren Untersuchungen herangezogen (siehe Abb. 19).



**Abb. 19:** Untersuchtes Balkenkopf-Detail

Die Dimensionen der betrachteten Konstruktion wurden gemäß dem üblichen Aufbau in einem Wiener Gründerzeithaus gewählt. Die Mauerwerksstärke von 44 cm basiert auf dem altösterreichischen Ziegelformat (14·29·6,5 cm), die Außenputzstärke beträgt 3 cm (vgl. [BED00]). Die Fußbodenkonstruktion besteht aus einer auf die Sturzschalung aufgetragenen, 8 cm hohen Beschüttung, in die die Polsterhölzer eingebettet sind. Auf diesen sind der Blindboden und der Fußbodenbelag aus Holz angebracht. [RIC98] Die Innendämmung aus Calciumsilikat-Platten wurde jeweils bis zur Sturz- bzw. Stukkatorschalung gezogen.

## 5.2 Vorbemerkungen zur Modellierung in HAM4D\_VIE

Neben der Wahl des maßgeblichen Details hat die Modellierung der betrachteten Konstruktion in HAM4D\_VIE entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Diese erfolgt, wie in Abschnitt 2.3 ausgeführt, zunächst über die Eingabe der Konstruktionsdimensionen und der Definition von Materialien mit passenden Materialeigenschaften. Im vorliegenden Fall wurden die Daten aus der Masea-Datenbank des IBP Fraunkirchen [IBP13a] bezogen. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Diskretisierung des erstellten Modells durch eine Gitterstruktur. Die Berechnung erfolgte für den zweidimensionalen Fall ohne Berücksichtigung der Raumtiefe.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde angenommen, dass kein Lufteintritt in die Konstruktion bzw. keine Hinterströmung der Innendämmung mit Luft aus dem Innenraum vorliegt. Gemäß den Untersuchungen in [WEG12] erhöht sich das Schadensrisiko bei Vorliegen derartiger Luftströmungen, da feuchte Innenluft in die Konstruktion eindringen und zu einem erhöhten Tauwasseranfall führen kann. Es kann jedoch angenommen werden, dass sich die Effekte von Luftströmungen

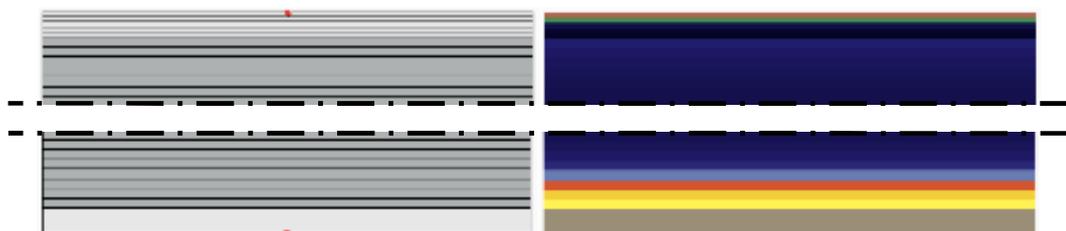
gen nicht oder nur in geringem Maße auf die Wahl eines Bemessungs-Außenklimas auswirken, da die Erhöhung des Schadensrisikos durch das Einbeziehen von Luftströmungen in die Simulation bei Verwendung verschiedener Außenklima-Datensätze in der jeweils selben Größenordnung liegen wird. Ein Hinweis, dass diese Annahme plausibel ist, ist in Abschnitt 6.5.7.2 (Punkt c) enthalten.

### 5.3 Gitterstruktur

#### 5.3.1 Grundlagen

Die Genauigkeit der bei einer hygrothermischen Simulation erhaltenen numerischen Lösung ist von der Diskretisierung des Modells (Auflösung in kleine Elemente) abhängig. Hygrothermische Simulationen führen zu Näherungslösungen für die gesuchten Wärme- und Feuchtetransportgrößen, die gegen analytische Lösungen konvergieren. Das WTA-Merkblatt 6-2 [WTA01] empfiehlt deshalb, Sensibilitätsanalysen mit verschiedenen Gitterstrukturen für ein Modell durchzuführen bzw. die Auswirkungen einer „verfeinerten Elementierung im Bereich erhöhter Temperatur- und/oder Feuchtegradienten“ zu beobachten. Dadurch werden gerade an kritischen Materialschicht-Rändern (z.B. Grenzschicht Dämmmaterial-Bestandsinnenputz) höhere Feuchtegehalte ausgegeben, da der Feuchtegehalt stets als Mittelwert über die Zellbreite ermittelt wird. Der begrenzende Faktor für die Feinheit der Gitterstruktur bzw. die Anzahl der Elemente ist die Rechen-dauer.

Während für die numerische Ermittlung der Wärme- und Feuchtegrößen eine umso höhere Genauigkeit der Ergebnisse erzielt werden kann, je feiner das Gitternetz strukturiert ist, ist dies bezüglich der Wasseraufnahmefähigkeit einer Konstruktion bei Schlagregen nicht der Fall.



**Abb. 20:** Wasseraufnahme bei unterschiedlicher Gitterstruktur

Abb. 20 zeigt zwei Varianten betreffend die Gitterstruktur eines einfachen Wandaufbaus, der durch Schlagregen belastet wird. Links ist jeweils das Modell, rechts das Simulationsergebnis bezüglich der Wassergehalte in den einzelnen Gitter-Schichten dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist der hellgrau dargestellte 5 cm dicke Außenputz in fünf 1-cm-Schichten unterteilt, im unteren Teil der Abbildung besteht der Außenputz aus nur einer Zelle. Die Teilung des dun-

kelgrau dargestellten Mauerwerks ist in beiden Fällen gleich gewählt (2 cm). Es zeigt sich, dass bei gleichem Schlagregenaufkommen deutlich kritischere Feuchtezustände bzw. größere Eindringtiefen des Wassers in die Konstruktion vorliegen, wenn die äußerste Zelle groß gewählt wird. Die Ursache hierfür liegt darin, dass eine Zelle immer nur so lange Wasser aufnehmen kann, bis sie gesättigt ist. Danach kann von der äußersten Zelle erst wieder Wasser aufgenommen werden, wenn ein Teil des zuvor aufgenommenen Wassers an die nächste Zelle weitergeleitet wurde. Eine schmale Zelle kann wenig Wasser aufnehmen und reduziert somit den Feuchteeintrag in die Konstruktion.

Neben den Materialeigenschaften ist somit auch die Gitterstruktur des Außenputzes von großer Bedeutung für die Menge des aufgenommenen Regenwassers und damit für den Feuchtehaushalt der betrachteten Konstruktion. Während im Falle der Feuchtegrößen jedoch eine feingliedrigere Unterteilung genauere Ergebnisse lieferte, müssen im Fall des Außenputzes Materialparameter und Gitterteilung so aufeinander abgestimmt werden, dass sich eine realistische Wasseraufnahmefähigkeit einstellt.

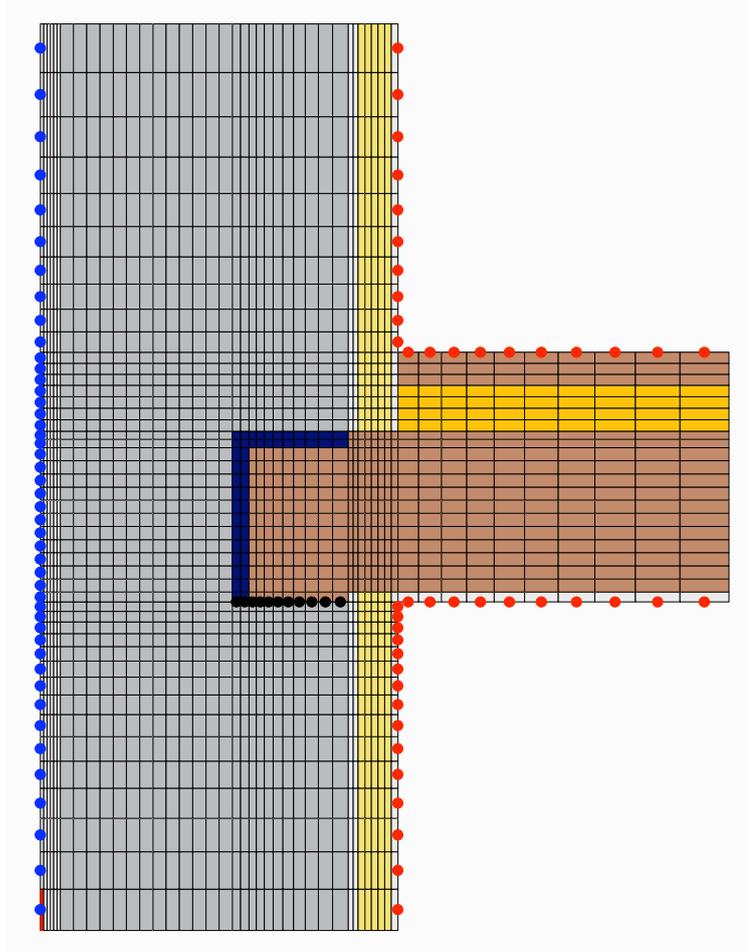
### 5.3.2 Wahl einer Gitterstruktur

Abb. 21 zeigt die gewählte Diskretisierung des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Details. Die blauen und roten Punkte an den Konstruktionsgrenzen stellen die Anordnung der gewählten Außen- und Innenklima-Randbedingungen dar. Unter dem Tram-Auflager befindet sich üblicherweise eine Feuchtigkeitsabdichtung (Teerpappe), die durch eine Modifikation (schwarze Punkte) in die Simulation Eingang findet.

Grundsätzlich wurde ein grobes Gitter mit 2 cm Zellbreite verwendet, um die Rechendauer der Simulation möglichst gering zu halten. So wurden etwa das Mauerwerk in vertikaler Richtung und der Tram (sowie der darauf befindliche Fußbodenaufbau) in horizontaler Richtung in Zellen von 2 cm Breite geteilt. Vergleichende Simulationen mit geringeren Zellbreiten in diesen Bereichen führten bezüglich der Ergebnisse zu keinen relevanten Unterschieden.

Entsprechend der Empfehlungen in WTA-Merkblatt 6-2 [WTA01] wurden kritische Bereiche des betrachteten Details mit einem feineren Gitter versehen. Dazu gehören neben der CaSi-Dämmplatte und dem Bestandsinnenputz der Bereich des Tramkopfes sowie der Außenputz.

Im Randbereich des Tramkopfes wurde eine Zellbreite von 0,5 cm festgelegt. Diese vergrößert sich zur Innendämmung hin pro Zelle um jeweils 10%, damit die Rechendauer weiterhin so gering wie möglich gehalten werden kann. Der 1,5 cm starke Bestandsinnenputz wurde in 2 Zellen aufgeteilt, wodurch sich eine Zellbreite von 0,75 cm ergibt.

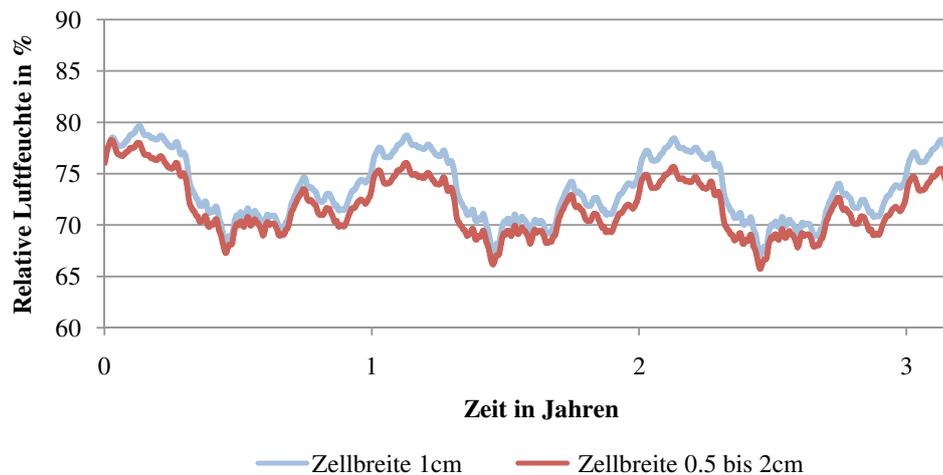


**Abb. 21:** Diskretisierung des betrachteten Details in HAM4D\_VIE

Bezüglich der Breite der Zellen der CaSi-Platte wurden vergleichende Simulationen zwischen einem Modell mit einer Zellbreite von 1 cm und einem Modell, deren Zellen an der Grenze zum Bestandsinnenputz eine Breite von 0,5 cm aufweisen und sich zum Innenraum hin um einen festgelegten Faktor bis auf eine Breite von 2 cm vergrößern, durchgeführt.

Wie in Abb. 22 ersichtlich ist, treten durch die Verwendung von 1 cm breiten Zellen höhere Maxima der relativen Luftfeuchte in der CaSi-Platte (Auswertungspunkt: äußerste Zelle an der Grenzfläche zum Bestandsinnenputz) auf. Um Ergebnisse auf der sicheren Seite zu erhalten, wird für die CaSi-Platten somit eine Zellbreite von 1 cm gewählt.

Für den Außenputz wurde eine Zellbreite von 0,5 cm festgelegt. Um den gewünschten Wasseraufnahmekoeffizienten der Fassade zu erzeugen, wurden die Materialparameter des Putzes variiert.

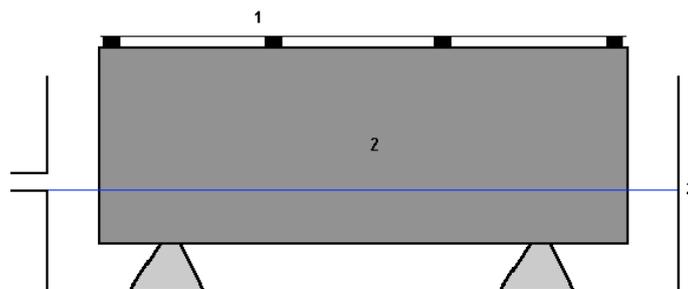


**Abb. 22:** Relative Luftfeuchte in der CaSi-Platte bei verschiedenen Zellbreiten

## 5.4 Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade

### 5.4.1 Grundlagen

Die Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten eines Baustoffes ist in ÖNORM EN ISO 15148 [ONO03] geregelt. Als Wasseraufnahmekoeffizient  $W_w$  wird demnach „die von einem Probekörper je Flächeneinheit und Wurzel aus der Zeit aufgenommene Wassermenge“ in  $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  bezeichnet. Zur experimentellen Bestimmung des  $W_w$ -Wertes dient eine Versuchsanordnung gemäß Abb. 23.



**Abb. 23:** Versuchsanordnung Wasseraufnahmekoeffizient [ONO03]

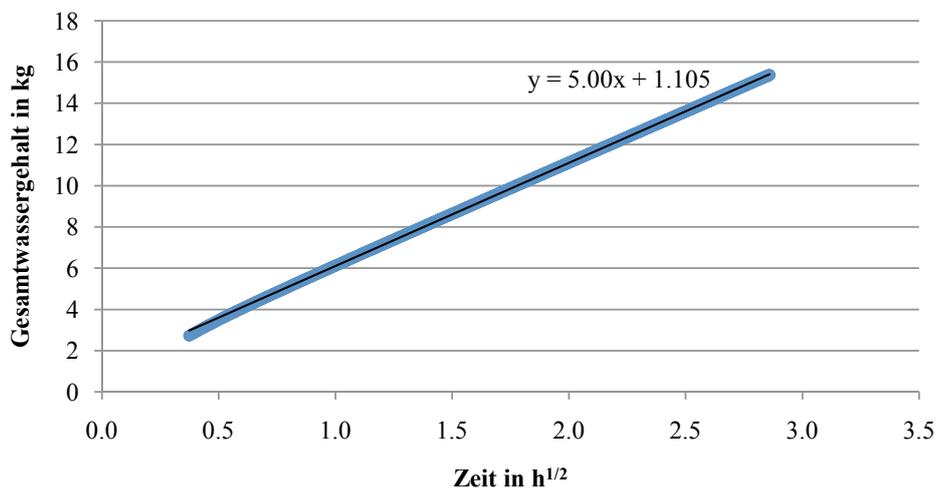
Der Prüfkörper wird für eine bestimmte Zeit (üblicherweise 24 Stunden) teilweise in Wasser eingetaucht. Nach gewissen Zeitschritten (z.B. jede Stunde) wird die Massenänderung des Probekörpers in Bezug auf seine Ausgangsmasse ermittelt, was der Menge des aufgenommenen Wassers entspricht, und auf die wasseraufnehmende Fläche des Probekörpers  $A$  in  $\text{m}^2$  bezogen. Werden die so erhaltenen Werte über die Wurzel der Zeit aufgetragen, ergibt sich üblicherweise eine Funktion in Form einer Geraden. Die Steigung dieser Geraden entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten  $W_w$  in  $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ . [ONO03]

#### 5.4.2 Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten mit HAM4D\_VIE

Für die anzustellenden Untersuchungen werden die Materialparameter des Außenputzes in der Materialdatenbank von HAM4D\_VIE so eingestellt, dass sich bei gewählter Gitterstruktur ein gewünschter  $W_w$ -Wert ergibt.

Dazu wurde das in [ONO03] beschriebene Verfahren zur Bestimmung des  $W_w$ -wertes in HAM4D\_VIE nachgestellt. Eingegeben wurde ein Quader bestehend aus dem Putzmaterial mit einer Grundfläche von  $1 \text{ m}^2$  sowie einer Höhe von 10 cm. In der Höhe wurde das Modell in Schichten zu je 0,5 cm geteilt, was der festgelegten Teilung des Außenputzes entspricht. Die Anfangstemperatur beträgt  $22^\circ\text{C}$ , der Anfangsfeuchtegehalt wurde sehr niedrig mit  $0,1 \text{ kg/m}^3$  angenommen. An der Unterseite des Quaders wurden als Klimarandbedingungen eine Temperatur von  $22^\circ\text{C}$ , eine Luftfeuchte von 100% sowie eine Saugspannung von 1 Pa definiert. Der Ausgabeschritt für die Simulationsergebnisse wurde auf den Wert von 0,01 Stunden (entspricht 36 Sekunden) eingestellt. Da das untersuchte Material zu Beginn beinahe trocken war, stellen die durch die Simulation erhaltenen Gesamtwassergehalte die Menge des aufgenommenen Wassers dar.

Der entscheidende Parameter für die Flüssigkeitsaufnahme eines Materials ist die Flüssigkeitsleitfähigkeit  $K_s$ . Durch Variation der Werte für  $K_s$  in der Materialdatenbank von HAM4D\_VIE wurde jener Wert ermittelt, durch den sich der gewünschte  $W_w$ -Wert im Außenputz bei gegebener Gitterstruktur einstellt.



**Abb. 24:** Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Abb. 24 zeigt die erhaltenen Gesamtwassergehalte je Zeitpunkt  $h^{1/2}$  (blau eingetragen). Über eine Ausgleichsgerade wurde die Steigung der erhaltenen Funktion ermittelt (schwarze Linie). Im gezeigten Beispiel ergibt sich durch die Verwendung eines  $K_s$ -wertes von  $5,59 \cdot 10^{-6}$  ein  $W_w$ -Wert von  $5,0 \text{ kg/m}^2 h^{1/2}$ .

### 5.4.3 Ermittelte Wasseraufnahmekoeffizienten

Bei der Wahl jener  $W_w$ -Werte, für die passende  $K_s$ -Werte ermittelt werden sollten, orientierte sich die vorliegende Arbeit unter anderem an der Einteilung der Putze in DIN 4108-3 [DIN01]. Dort werden Außenputze entsprechend dem vorliegenden Wasseraufnahmekoeffizienten (in [DIN01] wird dieser mit  $w$  bezeichnet) als wasserabweisend ( $w < 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ), wasserhemmend ( $0,5 < w < 2,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ) oder wassersaugend ( $w \geq 2,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ) klassifiziert. Um die Auswirkungen der jeweiligen Kategorie auf den Feuchtehaushalt zeigen zu können, wurden die erforderlichen  $K_s$ -Werte für  $W_w$ -Werte von etwa 0.1, 1 und 2  $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  ermittelt.

Bednar untersuchte in [BED00] verschiedene, in ihrer Zusammensetzung für Gründerzeithäuser übliche Außenputze experimentell bezüglich ihrer Feuchtetransport-Eigenschaften. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt Tab. 2.

**Tab. 2:** Übliche  $W_w$ -Werte bei Außenputzen an Gründerzeithäusern (eigene Darst. nach [BED00])

Putzmaterial	$W_w$ [ $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ]
Gipsmörtel	18
Kalkmörtel/grober Sand	5,7
Hydr. Kalkmörtel/feiner Sand	5,2
Hydr. Kalkmörtel/grober Sand	4,0
Kalkzementmörtel/grober Sand	5,1
Kalkzementmörtel/feiner Sand	3,4

Für einen üblichen Außenputz eines Gründerzeithauses kann also ein  $W_w$ -Wert von  $5,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  angenommen werden. Ein solcher Putz fällt gemäß [DIN01] in die Kategorie „wassersaugend“.

Um auch die Auswirkungen eines besonders stark saugenden Putzes oder einer Außenhülle aus nicht-gesinterten Mauerziegeln auf den Feuchtehaushalt der Konstruktion untersuchen zu können, wurde zusätzlich der erforderliche  $K_s$ -Wert für  $W_w$ -Werte von 10,0 und 20,0  $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst. Für Simulationen mit dem gewünschten Wasseraufnahmekoeffizienten des Außenputzes wurde eine Materialdatenbank mit dem jeweils ermittelten  $K_s$ -Wert herangezogen.

## 5.5 Anfangsbedingungen

Jede Simulation beginnt zu einem festgelegten Zeitpunkt, an dem bestimmte Anfangsbedingungen bezüglich der Temperatur und des Wassergehaltes in den Materialschichten herrschen.

**Tab. 3:** Erforderliche  $K_s$ -Werte

$W_w$ [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	$K_s$ [-]	Bemerkung
0,09	$1,00 \cdot 10^{-10}$	wasserabweisend
1,0	$1,50 \cdot 10^{-7}$	wasserhemmend
2,0	$8,00 \cdot 10^{-7}$	schwach wassersaugend
5,0	$5,59 \cdot 10^{-6}$	wassersaugend
10,0	$2,24 \cdot 10^{-5}$	stark wassersaugend
20,0	$8,94 \cdot 10^{-5}$	z.B. Ziegelmauerwerk

Die Anfangstemperatur spielt nur eine untergeordnete Rolle, da sich die Temperaturverhältnisse relativ schnell entsprechend der Klima-Randbedingungen einstellen. Hier ist es ausreichend, eine einheitliche Temperatur für alle Materialschichten zu wählen [WTA01]. Laut WTA-Merkblatt E 6-5 [WTA12] sollte ein Wert von 20°C oder ein Mittelwert zwischen Innen- und Außenlufttemperatur angenommen werden. Im vorliegenden Fall wurde deshalb eine einheitliche Anfangstemperatur von 10°C gewählt.

Die Anfangsfeuchte sollte möglichst realitätsnah gewählt werden, da sich der Feuchtehaushalt eines Bauteils nur sehr träge verändert. In [WTA12] werden drei Möglichkeiten zur Ermittlung der Anfangsfeuchte angegeben:

1. Wahl: Messdaten
2. Wahl: Feuchteprofil im eingeschwungenen Zustand anhand der Referenzrechnung
3. Wahl: Gleichgewichtsfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte

Um eine geeignete Anfangsfeuchte für die zu untersuchende Konstruktion zu ermitteln, wurde die Referenzkonstruktion (ohne Innendämmsystem) zehn Jahre dem in Abschnitt 4.4 festgelegten Innenraumklima sowie dem Außenklima der Jahre 2002 bis 2012 (10 zusammenhängende Jahre) ausgesetzt. Es wurde ein wasserhemmender Putz mit einem  $W_w$ -Wert von 1,0 kg/m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup> angenommen. Als Anfangsfeuchte für diese Berechnung wurde für sämtliche Bauteilschichten eine relative Luftfeuchte von 60% festgelegt. Die dadurch erhaltenen Wassergehalte je Materialschicht sind in Tab. 4 dargestellt.

Diese ermittelten Referenz-Feuchtegehalte stellen jenes Feuchteniveau dar, das vor der Applikation des Innendämmsystems vorhanden war. Da die Jahre zwischen 2002 und 2012 eine besonders hohe Schlagregenbelastung aufweisen, liegen die ermittelten Werte auf der sicheren Seite. Durch das Anbringen einer Innendämmung ist aber ohnehin mit einer Erhöhung des Feuchteniveaus zu rechnen.

**Tab. 4:** Anfangs-Feuchtegehalte Referenzkonstruktion

Material	Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]
Putze/CaSi-Platten	5,0
Ziegel	15,0
Tramkopf (in Mwk)	65,0
Tram (raumseitig)	50,0
Luftraum (Auflager)	2,0
Schalungen/Fußboden	55,0
Beschüttung	10,0

## 6 Ermittlung eines Bemessungs-Außenklimas

### 6.1 Ziel

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Referenz-Außenklima als Randbedingung für eine hygrothermische Simulation ermittelt werden, durch das eine sichere und wirtschaftliche Dimensionierung einer innengedämmten Wandkonstruktion möglich ist. Gleichzeitig soll es möglich sein, derartige Bemessungsaufgaben mit einem Minimum an Daten- und Simulationsaufwand durchzuführen. Das zu ermittelnde Außenklima sollte schließlich möglichst unabhängig von weiteren Faktoren wie Konstruktionsdimensionen und den Innenraumklimabedingungen sein.

### 6.2 Ansätze in der Literatur

In der ÖNORM EN 15026 [ONO07] werden drei grundsätzliche Möglichkeiten für die Wahl von Außenklimabedingungen angegeben:

a) Verwendung langjähriger Messdaten

Die Verwendung von zusammenhängenden Klimadaten vieler Jahre (die Norm empfiehlt, mindestens zehn Jahre heranzuziehen), hat den Vorteil, dass für den Feuchtehaushalt einer Konstruktion besonders kritische Jahre immer in Zusammenhang mit den vorangegangenen und den nachfolgenden Jahren betrachtet werden. Langjährige Messreihen enthalten „automatisch das gesamte Spektrum zu erwartender Normal- und Belastungsszenarien mit den zu erwartenden Häufigkeiten“ [IBP13]. Somit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass ein besonders kritisches Jahr eventuell auf einige in feuchtetechnischer Hinsicht unproblematische Jahre folgt und insofern weniger kritisch für die Konstruktion ist, als würde diese periodisch mit einem extremen Klima belastet werden. Der Nachteil beim Einsatz langjähriger Messreihen besteht darin, dass eine große Menge an Daten benötigt wird, die zumeist teuer eingekauft werden müssen.

b) Referenzjahr

Durch die Verwendung eines Referenzjahres, auch Auslegungsbezugsjahr genannt, wird mit der Verwendung eines einzelnen, geeigneten Jahres eine Belastung repräsentiert, durch die die langjährige Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion gut abgebildet werden kann. [ONO07]

c) Mittleres Jahr mit Temperaturverschiebung

Wenn weder Referenzjahre noch langjährige Messreihen verfügbar sind, gibt die Norm als weitere Möglichkeit noch die Verwendung eines „mittleren Datensatzes“ an, wobei die Temperatur jeweils um 2 K nach oben oder unten verschoben wird, um das Jahr kritischer

in seinen hygri-schen Auswirkungen auf die Konstruktion zu machen. Sämtliche weitere Klimaparameter (Relative Luftfeuchte, Solare Strahlung, Schlagregen) bleiben unverändert. [ONO07]

Alle genannten Möglichkeiten beinhalten durch die Wahl der Klimadaten immer auch einen Sicherheitsanspruch. Selbst bei der Verwendung langjähriger Messdaten, die am besten das tatsächliche Verhalten bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion unter den gewählten Randbedingungen wiedergeben, ist es für das Ergebnis von Bedeutung, ob Daten etwa aus zehn, zwanzig oder dreißig Jahren herangezogen werden und welcher konkrete Zeitabschnitt dabei betrachtet wird. Die Verwendung von Klimadaten der letzten zehn Jahre wird zu anderen Feuchtezuständen führen als die Verwendung von zehn besonders kritischen Jahren innerhalb der letzten Jahrzehnte. Es ist also im Rahmen dieser Arbeit auch der Frage nachzugehen, welcher Sicherheitsanspruch mit dem zu wählenden Außenklima erfüllt werden soll.

Eine erste umfangreiche Beschäftigung mit der Frage, was als zulässig zu erachtende Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Ausfallhäufigkeit einer Konstruktion infolge von Feuchteschäden bezeichnet werden kann, findet sich in [SAN96]. Dort wird darauf hingewiesen, dass sich eine akzeptierte Ausfallhäufigkeit in Relation mit dem entstehenden Schaden im Versagensfall befinden muss. Ein Feuchteschaden kann demzufolge nicht als so kritisch eingestuft werden, dass eine Ausfallhäufigkeit von einmal in 100 Jahren (1% Versagenswahrscheinlichkeit), wie dies zum Beispiel in der statischen Bemessung bei wichtigen Infrastrukturbauten verlangt wird, gerechtfertigt erscheint. Ohne weitere Erläuterungen wird eine Versagenshäufigkeit von einmal in zehn Jahren (10% Versagenswahrscheinlichkeit) als angemessen festgelegt. [SAN96]

Es wird zudem darauf hingewiesen, dass das zu wählende Bemessungsklima auch von der betrachteten Konstruktion abhängig ist. Holm spricht in diesem Zusammenhang in seiner Dissertation von „Problemkategorien“. Er unterscheidet zwischen den Problemkategorien

- Winterliche Tauwasserbildung
- Erhöhte Schlagregenbeanspruchung
- Sommerliche Tauwasserbildung und
- Baufeuchte.

Es wird empfohlen, Sensibilitätsanalysen mit geeigneten, repräsentativen Kurzklimatezyklen durchzuführen, um die betrachtete Konstruktion in eine Problemkategorie einordnen zu können. [HOL01]

In [SAN96] wurde versucht, ein Konzept zur Ermittlung eines Referenzjahres („Design Reference Year“ - DRY) zu erarbeiten. Mit Hilfe des Glaser-Verfahrens oder eines geeigneten anderen Verfahrens soll für drei definierte Konstruktionen (eine Massivbauwand, eine Leichtbauwand, je einmal nach Norden bzw. Süden ausgerichtet sowie ein Flachdach) für die Monatsmittelwerte von

Außentemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und solarer Einstrahlung bei stationären Innenklimabedingungen die jährliche Feuchteanreicherung für möglichst viele Jahre errechnet werden. Die ermittelten Feuchteanreicherungen werden dann je Konstruktion bzw. Ausrichtung in einer Normalverteilung dargestellt. Aus dieser Normalverteilung wird anschließend jene Feuchteanreicherung ermittelt, die nur in 10% aller betrachteten Jahre überschritten wird. Schließlich wird jenes Jahr gesucht, bei dem die Feuchteanreicherung diesem Perzentilwert entspricht. Dieses wird dann als Design Reference Year für die jeweilige Konstruktion bezeichnet. Die betreffende Problemkategorie wird dabei automatisch beachtet, da ein Referenzjahr nach seinen Auswirkungen auf die Konstruktion bestimmt wird. [SAN96]

Künzel hat etwa in [KÜN99] darauf hingewiesen, dass das in [SAN96] vorgeschlagene Verfahren mit einigem Aufwand verbunden ist. In seinen Untersuchungen konnte er feststellen, dass bei der Belastung einer Konstruktion mit dem Außenklima verschiedener Jahre eine deutliche Korrelation zwischen der Jahresmitteltemperatur und der Feuchtebilanz der Konstruktion zu erkennen war, während andere Parameter wie relative Luftfeuchtigkeit oder solare Strahlung keinen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hatten. Dies veranlasste ihn zu der Empfehlung, das Referenzjahr über die Normalverteilung der Jahresmitteltemperaturen zu ermitteln. [KÜN00]

In weiterer Konsequenz schlägt Holm vor, beim Fehlen langjähriger stündlicher Klimadatenätze einen „Standardklimadatenatz“ (mittlere Bedingungen) mit Hilfe eines „Temperaturshiftes bei Beibehaltung aller anderen Klimadaten“ kritischer zu machen, da gemäß den Untersuchungen von Künzel die Temperatur der entscheidende Parameter für den Feuchtehaushalt einer Konstruktion ist. [HOL01]

Die Erkenntnisse von Künzel bzw. Holm haben in die ÖNORM EN 15026 [ONO07] Eingang gefunden. Die enthaltenen Hinweise zur Ermittlung von Referenzjahren bzw. zur Höhe des empfohlenen Temperaturshifts beziehen sich dabei weiterhin auf die in [SAN96] empfohlene Versagenswahrscheinlichkeit von 10%. So wird in der Norm empfohlen, als Referenzjahr ein Jahr zu wählen, „in dem die mittlere Temperatur am dichtesten am 10. Perzentilwert der Verteilung der Jahresmitteltemperaturen aller verfügbaren Daten liegt“. Sind sommerliche Bedingungen (Problemkategorie Sommerliche Tauwasserbildung) entscheidend, soll der 90. Perzentilwert gewählt werden. Bezüglich der Temperaturverschiebung eines mittleren Jahres wird ein Temperaturshift von  $\pm 2\text{K}$  empfohlen, je nachdem, ob die Konstruktion empfindlicher auf winterliche oder sommerliche Bedingungen reagiert. Dazu wird erläutert, dass eine Änderung um 2K, jene Jahre repräsentiert, die „wahrscheinlich einmal in 10 Jahren auftreten“. [ONO07]

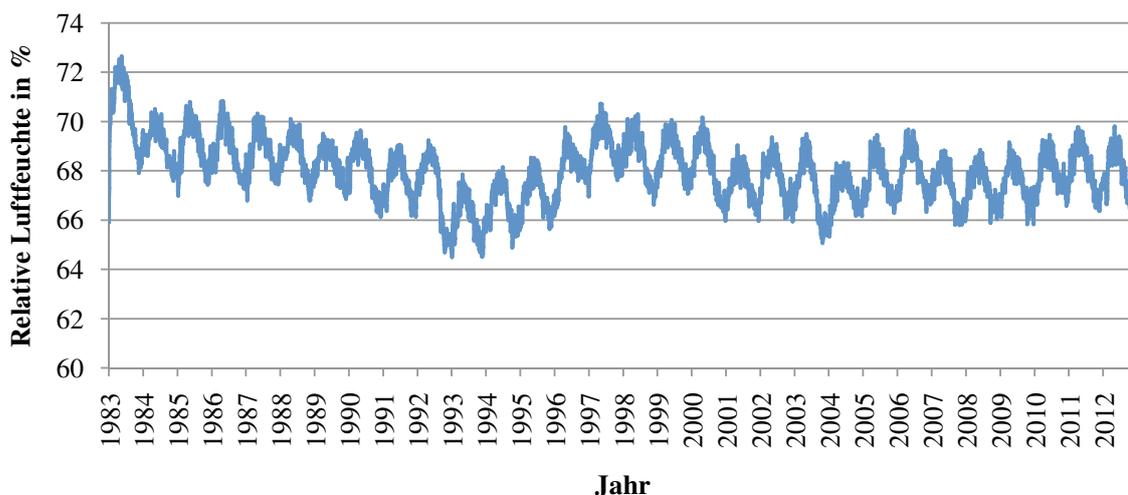
## 6.3 Methodik

### 6.3.1 Sicherheitskonzept

Wie bereits ausgeführt, impliziert die Wahl eines Referenzjahres immer auch einen Sicherheitsanspruch. Durch das gewählte Jahr wird jenes Maß an Beanspruchung festgelegt, das die Konstruktion bestehen muss, ohne dass es zu kritischen Feuchtezuständen kommt. Die ÖNORM EN 15026 [ONO07] geht davon aus, dass eine hundertprozentige Sicherheit gegen Versagen dann gewährleistet ist, wenn der in Bezug auf die resultierenden Feuchtezustände in der Konstruktion am kritischsten einzustufende Klimadatenatz für die Simulation herangezogen wird. Wird ein weniger kritisches Jahr gewählt, dann entspricht dies laut Norm einer akzeptierten Ausfallhäufigkeit, wobei ein Versagen „einmal in zehn Jahren in der Regel als zulässig angesehen“ werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein eigener Ansatz für die Ermittlung eines angemessenen kritischen Referenzjahres erarbeitet. Im Grundsatz wird davon ausgegangen, dass eine Simulation mit langjährigen, zusammenhängenden Außenklimadaten das reale Verhalten einer Konstruktion bei gewählten Modelleigenschaften sowie Innenklimabedingungen gut abbildet. Diese Annahme konnte im Fall der verwendeten Software HAM4D\_VIE, wie in Abschnitt 2.3 ausgeführt, bereits durch vergleichende Untersuchungen verifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für den Standort Wien Hohe Warte stündliche Werte aller notwendigen Klimaparameter für 30 Jahre (1983 - 2012) herangezogen. Dieser Zeitraum scheint geeignet, das langjährige Verhalten einer Konstruktion abzubilden, da auch Schwankungen des Klimas über mehrere Jahrzehnte erfasst werden.

In Abb. 25 ist der simulierte Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit am Tramkopf des untersuchten Details mit 5 cm CaSi-Platten dargestellt, dessen Verhalten als repräsentativ für die Gesamtkonstruktion angesehen werden kann. Es ist ersichtlich, dass neben den durch den Wechsel der Jahreszeiten bedingten Schwankungen innerhalb der einzelnen Jahre auch deutliche langjährige Trends existieren. Während es in den Jahren 1983 bis 1992 zu einer stetigen Verringerung der relativen Luftfeuchte am Tramkopf kommt, steigt diese ab 1993 an, bis im Jahr 1997 ein Maximum erreicht wird. Um die realistische maximale Belastung, der eine Konstruktion standhalten muss, abzubilden, ist demnach nicht unbedingt jener Klimadatenatz maßgebend, der innerhalb eines Jahres die größte Feuchteanreicherung hervorruft. Vielmehr scheint es sinnvoll, einen Datensatz als Referenzjahr zu wählen, der in seinen Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt der Konstruktion das langjährige Maximum wiedergibt.

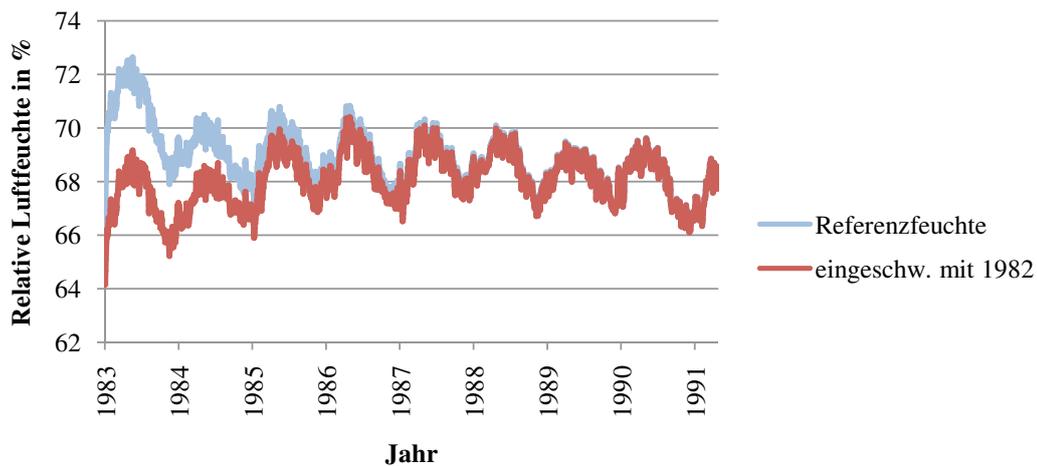


**Abb. 25:** Relative Luftfeuchte am Tramkopf (Wien, 1983 – 2012)

### 6.3.2 Anfangsbedingungen

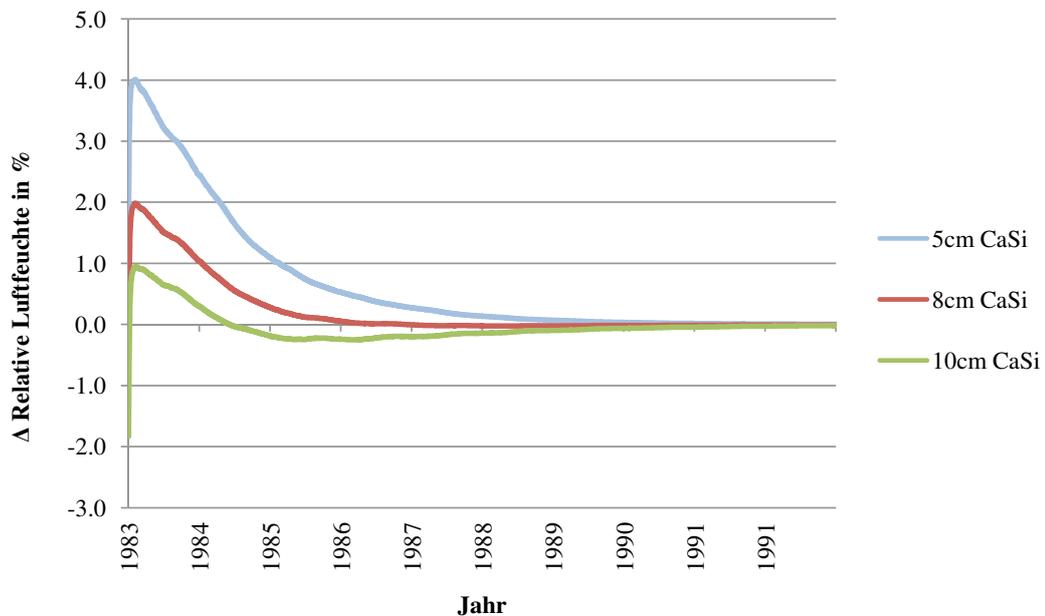
Bei der Identifizierung eines Langzeit-Maximums spielen die Anfangsbedingungen mitunter eine wichtige Rolle. In Abb. 25 ist ersichtlich, dass langjährige Maxima im Falle der relativen Luftfeuchtigkeit am Tramkopf in den Jahren 1997 sowie 1983 bzw. 1986 auftreten. Da Maxima somit bereits in den ersten Jahren der Simulation auftreten, war zu hinterfragen, inwieweit die Anfangsbedingungen bezüglich des Feuchtegehaltes der Baustoffschichten Einfluss auf den langjährigen Verlauf der Simulationsergebnisse ausüben. Werden die Referenz-Feuchtegehalte niedriger angesetzt, würden 1983 und 1986 möglicherweise keine Langzeit-Maxima aufweisen.

Da die Simulation mit dem Jahr 1983 beginnt, erschien es sinnvoll, die Konstruktion (inkl. Innendämmsystem) mit dem Klimadatensatz für 1982 periodisch über einen Zeitraum von 10 Jahren einschwingen zu lassen und die am Ende des 10. Jahres aufgetretenen Feuchtegehalte als Anfangsbedingungen für die langjährige Simulation ab dem Jahr 1983 einzusetzen. Im Vergleich zum Referenz-Feuchtegehalt, der gemäß Abschnitt 5.5 auf Basis der Jahre 2002 bis 2012 ermittelt wurde, ergeben sich dadurch geringere Feuchtegehalte, was durchaus schlüssig ist, da diese Jahre eine überdurchschnittlich hohe Schlagregenbeanspruchung aufweisen. Bei Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für 30 Jahre mit unterschiedlichen Feuchte-Anfangsbedingungen kann gezeigt werden, dass sich diese, in Abhängigkeit von der Dicke der CaSi-Platten, nach spätestens fünf Jahren angleichen. Abb. 26 zeigt die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit am Tramkopf für die Bestandskonstruktion mit 5 cm CaSi-Platten.



**Abb. 26:** Vergleich relative Luftfeuchte am Tramkopf bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen

In Abb. 27 wurden die Differenzen der Simulationsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Anfangsbedingungen für verschiedene Dämmstärken aufgetragen. Ist bei 5 cm Dämmstärke zu Simulationsbeginn eine Differenz von 4 Prozentpunkten zu beobachten, so beträgt sie bei 10 cm CaSi nur einen Prozentpunkt. Nach spätestens fünf Jahren, also mit Ende des Jahres 1987, sind kaum mehr nennenswerte Unterschiede ersichtlich. Insofern wurde die Simulation des langjährigen Feuchtehaushaltes erst ab dem Jahr 1988 betrachtet, da ein Langzeit-Maximum damit weitgehend unabhängig von den Anfangsbedingungen ermittelt werden kann.



**Abb. 27:** Differenzen der Simulationsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Anfangsbedingungen

### 6.3.3 Vergleichene Größen

Um einen Klimadatensatz zu finden, durch den das Langzeit-Bauteilverhalten abgebildet werden kann, müssen jene mittels Simulation erhaltenen Größen festgelegt werden, die untereinander verglichen werden sollen.

Dabei erscheint es sinnvoll, dass insbesondere jene durch die Simulation mit einem Referenzklima erhaltenen Größen sich mit dem langjährigen Verhalten decken sollen, die für eine Beurteilung bzw. Bemessung einer innengedämmten Konstruktion herangezogen werden. Laut WTA-Merkblatt E 6-5 [WTA12] sollen hierfür die „maximal auftretenden Wassergehalte der einzelnen Bauteilschichten beurteilt werden“. Als Kenngröße wird die relative Luftfeuchte einer Bauteilschicht empfohlen. Festigkeit, Frostbeständigkeit sowie das als abgeleitete Größe in HAM4D\_VIE ermittelte Verrottungs- und Schimmelpotential stehen in direkter Abhängigkeit zur ermittelten relativen Luftfeuchte. Da Schimmel sich bereits bei etwa 80% relativer Luftfeuchte, somit bevor die Gefahr von Festigkeitsverlust oder Verrottung gegeben ist, ausbilden kann, ist das Schimmelpotential eine wichtige Größe bei der Bemessung. Die maximale relative Luftfeuchte korreliert je Auswertungspunkt sehr deutlich mit dem maximal erhaltenen Schimmelpotential (siehe auch Abschnitt 6.5.4 sowie Abb. 47), weshalb sie als guter Indikator für die Versagenswahrscheinlichkeit einer Konstruktion bezeichnet werden kann.

Als zu vergleichende Größen werden somit die Maxima der relativen Luftfeuchte in den Bauteilschichten gewählt. Als weitere zu vergleichende Größe wird der Gesamtwassergehalt  $w_{\text{ges}}$  festgelegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Langzeit-Verhalten des Bauteils durch ein Referenzklima gut wiedergegeben werden kann, wenn sowohl die Ergebnisse für den Gesamtwassergehalt als auch für die Maxima der relativen Luftfeuchte an bestimmten Punkten einer Konstruktion durch ein solches Referenzklima gut wiedergegeben werden.

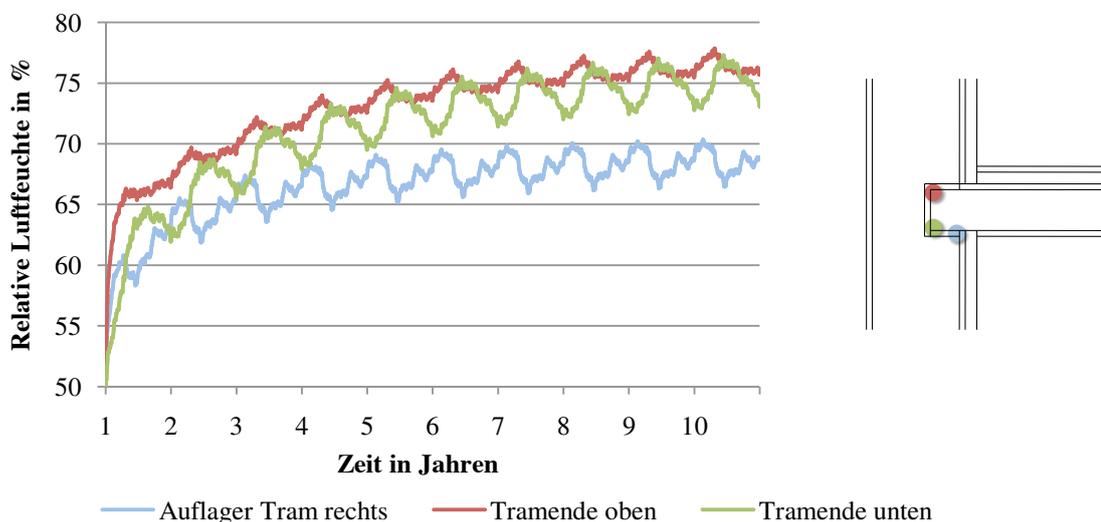
### 6.3.4 Gewählte Auswertungspunkte

Da die Bemessung bzw. Beurteilung einer Konstruktion sich an den kritischsten Punkten im Bauteil orientiert, werden diese im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gezielt herangezogen. Das WTA-Merkblatt E 6-5 [WTA12] führt als mögliche kritische Positionen an :

- die kalte Seite der Dämmung
- den Klebemörtel
- den Bestandsinnenputz
- die innere Wandoberfläche
- die Bestandskonstruktion

Im betrachteten Fall eines Tram-Auflagers sind wohl neben der neu angebrachten Innendämmung vor allem der Bereich des Tramkopfes, der durch den reduzierten Wandquerschnitt im Bereich des Auflagers besonders durch das Außenklima beansprucht wird, sowie das Bestandsmauerwerk, das aufgrund der Innendämmung nun ein geringeres Trocknungspotential aufweist, als kritische Punkte einzustufen. Um die Frage zu klären, welche Positionen im Bereich des Tramkopfes, des Bestandsmauerwerkes und des neu aufgebrachten Innendämmsystems besonders kritisch sind, wurden vergleichende Simulationen durchgeführt. Damit dabei eine deutliche Belastung durch das Außenklima gegeben ist, wurde der Klimadatensatz des Jahres 1996 herangezogen, der die geringste Jahresmitteltemperatur aller betrachteten Jahre aufweist. Nachfolgend wurden die zuvor genannten kritischen Bereiche an verschiedenen Auswertungspunkten untersucht. Der jeweils kritischste Punkt, der besonders hohe Feuchtwerte aufwies, wurde als Auswertungspunkt für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Untersuchungen gewählt.

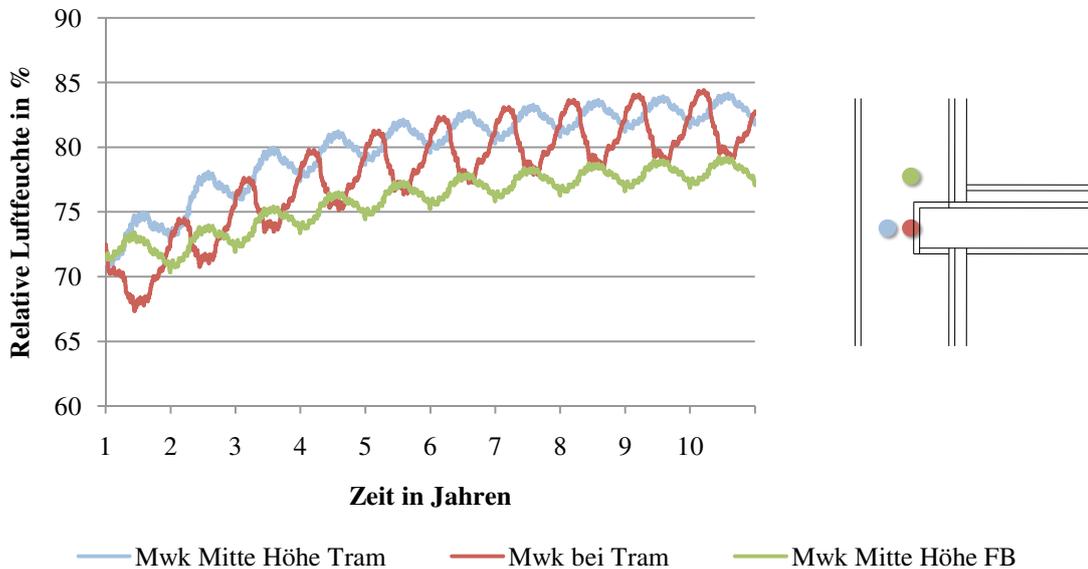
Besonders kritische Werte werden im Bereich des Tram-Auflagers für das Tramende oben sowie das Tramende unten erhalten (siehe Abb. 28). Am Auflager rechts werden deutlich geringere relative Luftfeuchten erhalten. Für das Auflager links (nicht im Diagramm dargestellt) ergeben sich sehr ähnliche Werte wie für die Position Tramende unten. Da am Tramende oben knapp höhere Werte als am Tramende unten erhalten werden, wird dieses als Auswertungspunkt im Rahmen der weiteren Untersuchungen herangezogen.



**Abb. 28:** Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Bereich des Tram-Auflagers

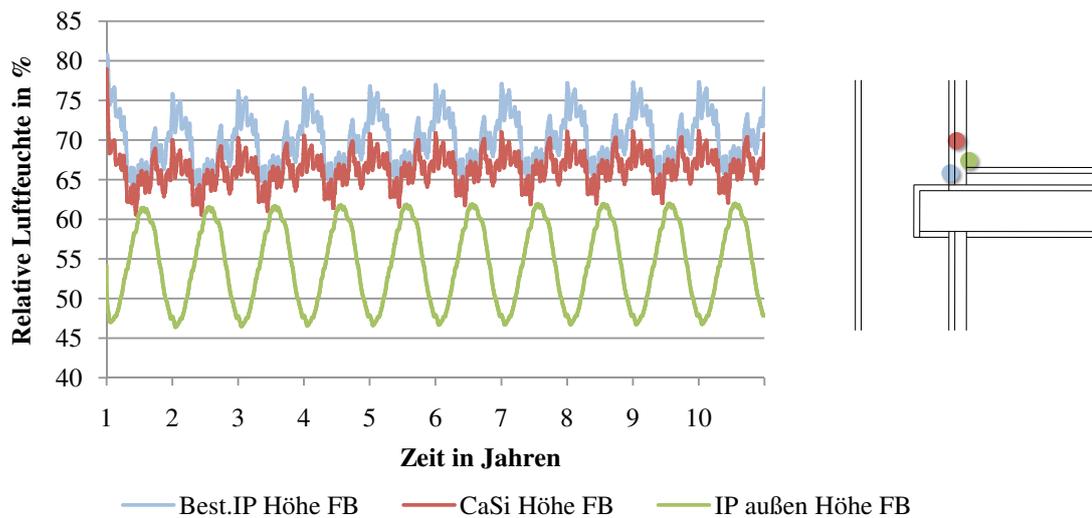
Im Bereich des Bestandsmauerwerkes ist es besonders der in seinem Querschnitt reduzierte Bereich des Tramauflagers, der am empfindlichsten auf ein kritisches Außenklima reagiert (siehe Abb. 29). Das Mauerwerk im Bereich des Fußbodens bzw. im unteren Geschoß weist deutlich geringere Werte für die maximale relative Luftfeuchte auf. Wegen des durchgehend höheren

Feuchteniveaus wird als Auswertungspunkt die Mitte des Mauerwerks im Bereich des Tram-Auflagers gewählt.



**Abb. 29:** Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Bestandsmauerwerk

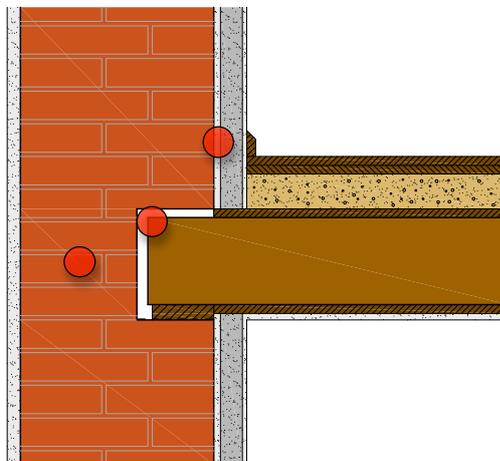
Im Fall des neu angebrachten Innendämmungssystems aus CaSi-Platten wurden der bestehende und der neu aufgebrachte Innenputz sowie die CaSi-Platten untersucht (siehe Abb. 30). Es zeigte sich, dass die Feuchte im neuen Innenputz hauptsächlich von den Schwankungen des Innenraumklimas abhängt, das im vorliegenden Fall zwischen 40 und 60% relative Luftfeuchte aufweist. Am kritischsten erweist sich der Bestandsinnenputz auf Höhe der Fußbodenoberkante.



**Abb. 30:** Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Innendämmungssystem

Um zu gewährleisten, dass ein Referenzklima das Bauteilverhalten in Bezug auf dessen Feuchtehaushalt möglichst gut wiedergibt, werden also die sich ergebenden Werte für den Gesamtwasser-

gehalt der Konstruktion sowie die relativen Luftfeuchten am Trankopf, im Bestandsmauerwerk und im Bestands-Innenputz an den ermittelten besonders kritischen Positionen (siehe Abb. 31) mit den Maxima aus einer Simulation über 30 zusammenhängende Jahre verglichen.



**Abb. 31:** Gewählte Auswertungspunkte

### 6.3.5 Unterteilung der Untersuchungen

Durch eine Hydrophobierung der Fassade im Zuge der Applikation eines Innendämmsystems bzw. bei Vorhandensein eines wasserabweisenden Außenputzes wird die Bedeutung der Schlagregenbelastung eines Klimadatensatzes für das hygrische Verhalten einer Konstruktion abnehmen. Es erscheint deshalb sinnvoll, die nachfolgenden Untersuchungen einmal für den Fall eines beinahe wasserdichten Außenputzes und in einem zweiten Schritt für wasserhemmende bis –saugende Putze durchzuführen, da anzunehmen ist, dass dann Klimadatensätze mit unterschiedlichen Eigenschaften gesucht werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Möglichkeiten betrachtet, einen Klimadatensatz entsprechend des erläuterten Sicherheitsansatzes zu wählen. Da es das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, ein möglichst einfach verfügbares bzw. wählbares Referenzklima für Bemessungsaufgaben zu ermitteln, wird zunächst versucht, über die Verwendung eines Testreferenzjahres, das, wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, mittlere Außenklimaverhältnisse für zur Berechnung des Langzeit-Energieverbrauchs darstellt, zu einem Bemessungsklima zu gelangen. Ein solches Testreferenzjahr liegt für viele Standorte vor und ist für den Planer leicht verfügbar.

## 6.4 Wasserabweisender Außenputz

### 6.4.1 Vorbemerkungen

Um das Verhalten eines wasserabweisenden Putzes zu simulieren, wurden die Gitterteilung des Modells und die Materialeigenschaften des Putzes so gewählt, dass sich ein  $W_w$ -Wert von  $0,09 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2}$  ergab (zur Ermittlung siehe Abschnitt 5.4.2). Dies entspricht gemäß der Einteilung in DIN 4108-3 einem wasserabweisenden Putz.

### 6.4.2 Testreferenzjahr mit Temperaturabminderung

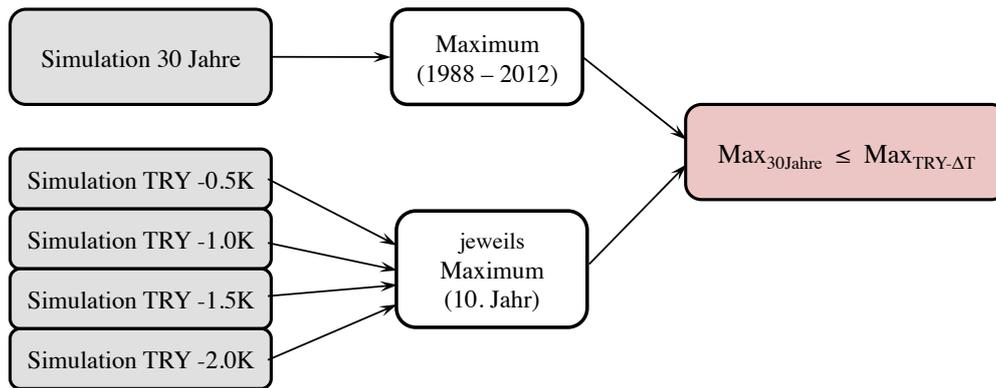
#### 6.4.2.1 Methodik

Als Grundlage für die anzustellende Untersuchung wurde für das betrachtete Balkenkopfdetail eine Simulation mit 30 zusammenhängenden Jahren durchgeführt. Je untersuchter Größe ( $w_{\text{ges, rel.}}$  Luftfeuchte) bzw. Auswertungspunkt (Tramkopf, Bestandsmauerwerk, Bestandsinnenputz) ergaben sich dadurch für den betrachteten Zeitraum zwischen 1988 und 2012 (vgl. Abschnitt 6.3.2) Maximalwerte, wobei diese nicht zwangsläufig im selben Jahr auftreten müssen (siehe Abb. 32).

Da die ÖNORM EN 15026 [ONO07] empfiehlt, für Konstruktionen, in denen winterliche Verhältnisse maßgebend sind, das Temperaturniveau des verwendeten mittleren Klimadatensatzes um 2 K abzusenken, werden für die betrachtete Konstruktion zum Vergleich vier Simulationen unter Verwendung des sich jährlich wiederholenden Testreferenzjahres (TRY) für den jeweiligen Standort mit einer Temperaturabminderung von 0,5 K, 1 K, 1,5 K und 2 K durchgeführt. Die Dauer der Simulationen wurde mit zehn Jahren festgelegt, da damit in allen Fällen ein eingeschwungener Zustand vorliegt. Je Größe und Auswertungspunkt wird dann der Maximalwert im jeweils letzten simulierten Jahr ermittelt.

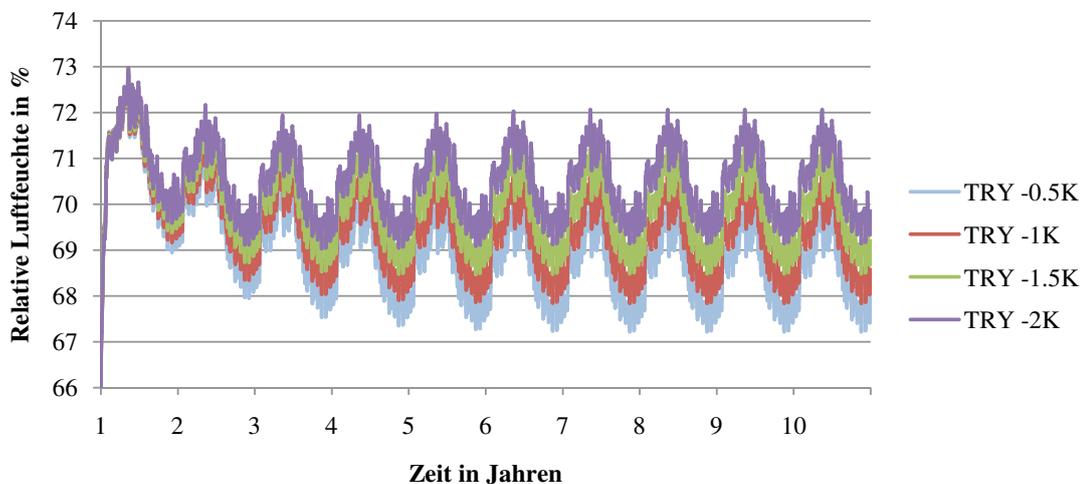
Durch einen Vergleich der Ergebnisse der langjährigen Simulation mit jenen der Testreferenzjahre wird je zu vergleichender Größe jenes Maß an Temperaturabminderung ermittelt, das notwendig ist, damit durch die periodische Simulation mit einem Testreferenzjahr der selbe bzw. ein knapp höherer Maximalwert erhalten wird als in der langjährigen Simulation (siehe Abb. 32). Nachfolgend soll die Vorgangsweise anhand der Bestandskonstruktion mit 5 cm CaSi-Platten, Standort Wien Hohe Warte, Westausrichtung sowie dem festgelegten Innenraumklima anschaulich dargelegt werden.

Betrachtet man beispielsweise die relative Luftfeuchte am Tramkopf, so ergibt sich durch eine Simulation mit 30 zusammenhängenden Jahren (1983 bis 2012) ein Verlauf gemäß Abb. 25. Im betrachteten Bereich zwischen 1988 und 2012 ist ein Langzeit-Maximum im Jahr 1997 feststellbar, das sich auf 70,72% relative Luftfeuchte beläuft.



**Abb. 32:** Schema zur Ermittlung der notwendigen Temperaturabminderung

Bei der Simulation mit einem periodisch wiederkehrenden Testreferenzjahr samt Temperaturabminderung  $\Delta T$  ergeben sich Verläufe für verschiedene  $\Delta T$  gemäß Abb. 33. Es ist ersichtlich, dass die Abminderung der Außentemperatur tatsächlich eine Parallelverschiebung der Verläufe der relativen Luftfeuchte am Tramkopf bewirkt. Nach spätestens zehn Jahren ist ein eingeschwungener Zustand erreicht, somit werden im zehnten Jahr nach Simulationsbeginn die Maxima je Temperaturabminderung erfasst.



**Abb. 33:** Simulationen mit TRY  $-\Delta T$

Im vorliegenden Fall ergibt sich bei einer Simulation mit dem TRY -1 K ein Wert für die relative Luftfeuchte am Tramkopf von 70,79%. Dieser Wert liegt somit knapp über dem zuvor ermittelten Langzeitmaximum von 70,72%. Abb. 34 stellt den langjährigen Verlauf der relativen Luftfeuchte dem Ergebnis des eingeschwungenen Zustands eines TRY -1 K gegenüber. Wie sich zeigt, kann die Spitze im Jahr 1997 (und somit die maximale auftretende relative Luftfeuchte) gut abgebildet werden (siehe Abb. 34)

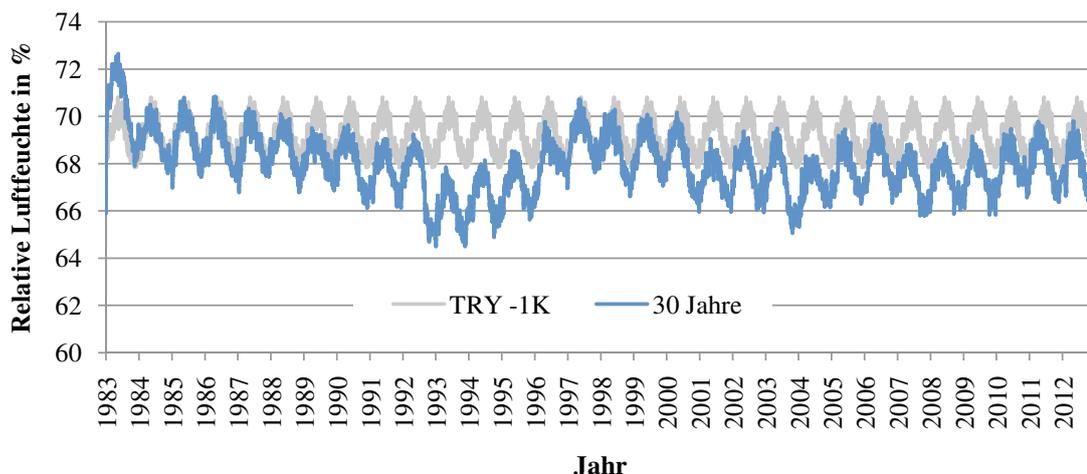


Abb. 34: Vergleich TRY -1K und langjähriger Verlauf 1983 - 2012

In Tab. 5 wurden die Ergebnisse für alle untersuchten Auswertungspunkte eingetragen. Jener Wert, der jeweils knapp höher war als das ermittelte Langzeit-Maximum, wurde hervorgehoben.

Tab. 5: Ergebnisse Simulationen 5cm CaSi

	Max 30 Jahre	Max TRY -0,5 K	Max TRY -1 K	Max TRY -1,5 K	Max TRY -2 K
$W_{ges}$ [kg]	20,12	19,86	20,01	<b>20,18</b>	20,36
Rel. LF Mwk [%]	74,58	73,90	<b>74,66</b>	75,44	76,25
Rel. LF Tram [%]	70,72	70,19	<b>70,79</b>	71,42	72,06
Rel. LF Putz [%]	79,19	74,22	75,04	75,86	76,68

Im Fall des Gesamtwassergehaltes ist demzufolge für die betrachtete Konstruktion ein TRY - 1,5 K erforderlich, um die Langzeit-Maxima der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk oder im Tram abzubilden bedarf es hingegen eines TRY -1 K. Konnte der langjährige Maximalwert auch durch eine Simulation mit einem TRY -2 K, wie im Fall des Bestandsinnenputzes in Tab. 5, nicht erreicht werden, wurde in den nachfolgenden Abschnitten die notwendige Temperaturabminderung durch die Extrapolation der erhaltenen Ergebnisreihe ermittelt.

#### 6.4.2.2 Ergebnisse

Für den Standort Wien Hohe Warte ergaben sich bei Ausrichtung der betrachteten Konstruktion zur Hauptschlagregenseite (Westen), dem festgelegten Innenraumklima sowie einer Innendämmung aus CaSi-Platten in Stärken von 5, 8 und 10 cm notwendige Temperaturabminderungen des Testreferenzjahres (TRY) je zu vergleichender simulierter Größe gemäß Tab. 6.

**Tab. 6:** Ergebnisse TRY- $\Delta T$  Wien

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk	Rel. LF Tram	Rel. LF Bestandsputz
5 cm CaSi	TRY -1,5 K	TRY -1 K	TRY -1 K	TRY -3 K
8 cm CaSi	TRY -1,5 K	TRY -1 K	TRY -1 K	TRY -3 K
10 cm CaSi	TRY -1,5 K	TRY -1 K	TRY -1 K	TRY -3 K

Zum Vergleich wurde für das selbe Detail der Standort Klagenfurt herangezogen. Sämtliche weitere Parameter wurden gleich belassen, die Hauptwetterrichtung ist auch hier Westen (siehe Tab. 7).

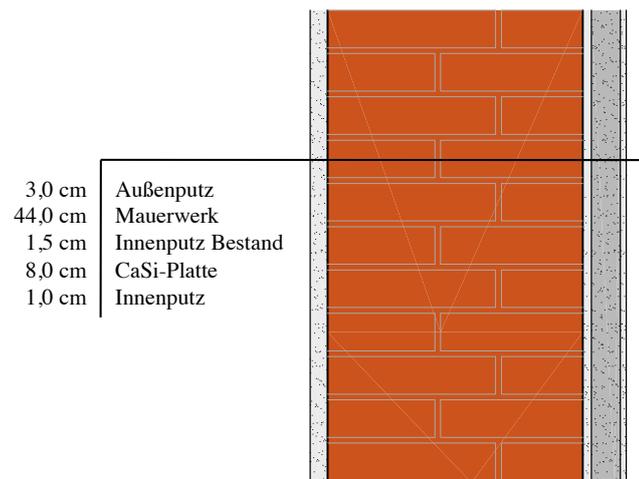
**Tab. 7:** Ergebnisse TRY- $\Delta T$  Klagenfurt

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk	Rel. LF Tram	Rel. LF Bestandsputz
5 cm CaSi	TRY -1,5 K	TRY -0,5 K	TRY -0,5 K	TRY -1 K
8 cm CaSi	TRY -1 K	TRY -0,5 K	TRY -0,5 K	TRY -1 K
10 cm CaSi	TRY -1 K	TRY -0,5 K	TRY -0,5 K	TRY -1 K

Sowohl für den Standort Wien als auch Klagenfurt ist ersichtlich, dass sich die notwendige Temperaturabminderung bei unterschiedlichen Dämmstärken je Auswertungspunkt nicht verändert ( $w_{ges}$  bei 5cm CaSi in Klagenfurt kann als Ausnahme bezeichnet werden), obwohl das Feuchteniveau umso kritischer wird, je dicker die Innendämmung ausgeführt wird.

Um zu überprüfen, wie sich die Ergebnisse bei weiterer Variation der betrachteten Konstruktion verändern, wurde beim Wandaufbau mit 8 cm CaSi-Platten (Standort Wien, sonstige Parameter wie zuvor) die Stärke des Bestandsmauerwerks variiert (siehe Tab. 8). Ausgehend von der einer Wandstärke von 44 cm wurde eine um 20 cm verminderte bzw. erhöhte Wandstärke betrachtet. Die Simulation erfolgte diesmal nicht am Tram-Detail, sondern am eindimensionalen Wandaufbau, um die Simulationsdauer zu reduzieren (siehe Abb. 35).

Als Auswertungspunkte wurden die Mitte des Mauerwerks und der Bestandsinnenputz gewählt. Auffällig ist, dass bei einer Mauerstärke von 24 cm höhere Temperatur-Abminderungen notwendig sind, obwohl anzunehmen ist, dass dasselbe Außenklima für eine 24 cm starke Wand kritischer ist als für eine 64 cm starke Wand.



**Abb. 35:** 1D - Wandquerschnitt

Es ist jedoch zu bedenken, dass die notwendige Temperaturabminderung davon abhängt, in welchem *Verhältnis* die Auswirkungen des Testreferenzjahres und jene langjähriger Messdaten bei einer bestimmten Konstruktion stehen. Somit ist die notwendige Temperaturabminderung für eine Konstruktion mit 24 cm, um ähnliche Ergebnisse wie bei einer Simulation mit 30 Jahren zu erhalten, nicht zwangsläufig niedriger als jene, die bei einer Konstruktion mit 44 cm notwendig ist.

**Tab. 8:** Variation Mauerwerks-Stärke

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Bestandsputz
24 cm Mwk	TRY -3 K	TRY -2 K	TRY -2,5 K
44 cm Mwk	TRY -1,5 K	TRY -1,5 K	TRY -2,5 K
64 cm Mwk	TRY -1,5 K	TRY -1,5 K	TRY -3 K

#### 6.4.2.3 Schlussfolgerungen

Im Fall von Klagenfurt kann gesagt werden, dass bei der Wahl einer Temperaturabminderung von 1 bis 1,5 K das Bauteilverhalten über eine Periode von 30 Jahren gut dargestellt wird. Beim Standort Wien fällt auf, dass für eine gute Abbildung der relativen Luftfeuchte im Bestandsinnenputz eine überdurchschnittlich hohe Temperaturabminderung erforderlich ist. Die größere Streuung der erhaltenen Abminderungen ist problematisch, da bei Bemessung der Konstruktion mit dem TRY -3 K die übrige Konstruktion zu kritisch und damit nicht mehr realitätsnah abgebildet wird. Bei einer Variation der Mauerwerksstärke sind in Wien ähnliche Effekte zu beobachten. Ein Testreferenzjahr mit Temperaturabminderung kann also das gesamte Konstruktionsverhalten im Einzelfall gut abbilden (siehe Klagenfurt), dies muss aber nicht immer der Fall sein (siehe Wien), da das Testreferenzjahr grundsätzlich nicht dafür optimiert ist, das mittlere hygrische Verhalten

einer innengedämmten Konstruktion wiederzugeben. In einem weiteren Schritt ist deshalb systematisch der Frage nachzugehen, wie ein geeignetes „mittleres Jahr“ gefunden werden kann, das den Feuchtehaushalt der Gesamtkonstruktion bei entsprechender Temperaturabminderung gut wiedergibt.

#### 6.4.3 Eigenschaften der Jahresdatensätze (Wien)

Um die Eigenschaften der Klimadatensätze verschiedener Jahre für den Standort Wien Hohe Warte aufzuzeigen, wurden Simulationen mit jedem Jahresdatensatz durchgeführt. Um die Rechenzeit zu verkürzen, wurde dabei wiederum ein 1D-Wandaufbau (44 cm Mwk, 8 cm CaSi) betrachtet. Nach einer Simulationsdauer von zehn Jahren (eingeschwungener Zustand) wurden die Maxima der zu vergleichenden Größen ( $w_{\text{ges}}$ , relative Luftfeuchte von Mauerwerk und Bestand-sinnenputz) ermittelt. In Abb. 36 wurden die Maxima des Gesamtwassergehalts gegen die Jahresmitteltemperatur des betreffenden Jahres aufgetragen.

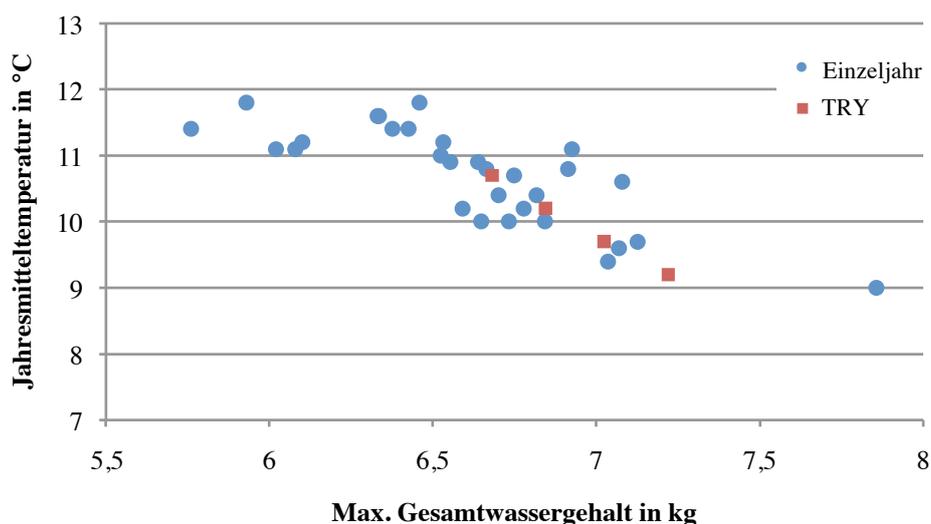
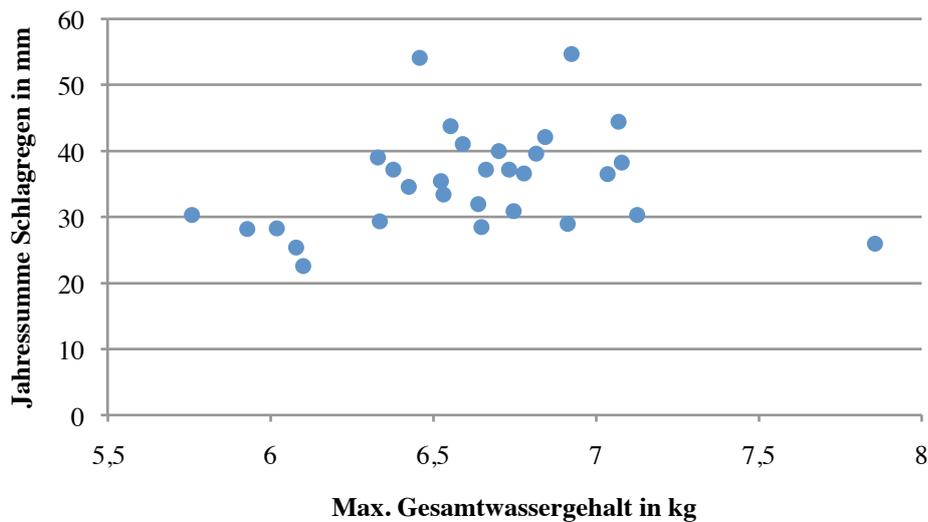


Abb. 36: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. Gesamtwassergehalt

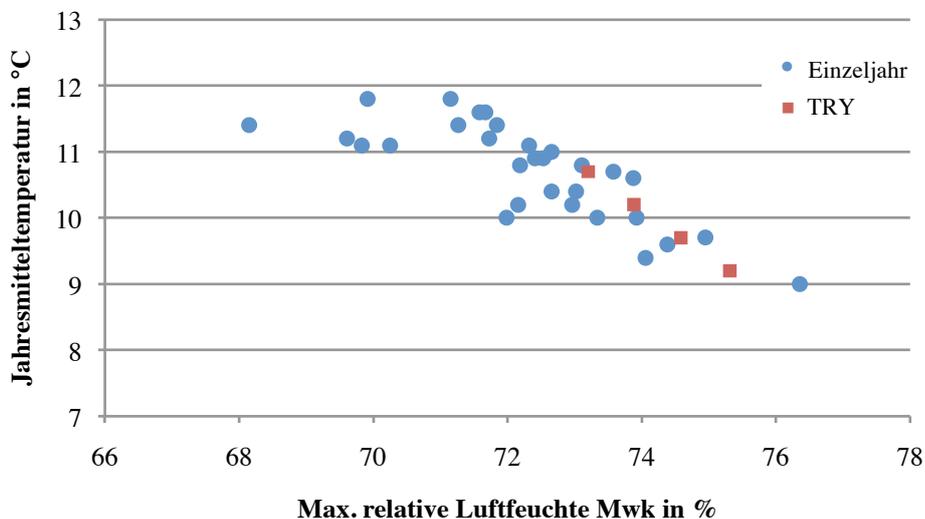
Darin ist eine deutliche Korrelation zwischen Jahresmitteltemperatur und maximalem Gesamtwassergehalt ersichtlich. Weiters sind die Simulationsergebnisse unter Verwendung des Testreferenzjahres mit variiertem Temperaturabminderung (-0.5 bis -2 K) eingetragen. Diese Ergebnisse liegen sehr gut im mittleren Trend.

Werden die maximalen Gesamtwassergehalte gegen die Jahressumme des im untersuchten Jahr auftretenden West-Schlagregens aufgetragen, ist aufgrund des wasserabweisenden Putzes keine eindeutige Korrelation erkennbar (siehe Abb. 37).



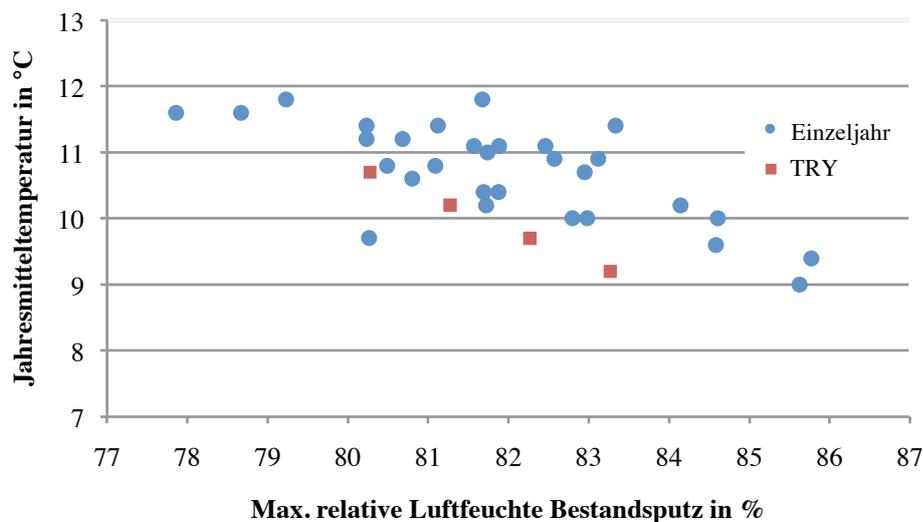
**Abb. 37:** Korrelation Jahressumme Schlagregen Westen – Max. Gesamtwassergehalt

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Analyse der erhaltenen maximalen relativen Luftfeuchten im Mauerwerk. Eine deutliche Korrelation zur Jahresmitteltemperatur ist feststellbar, wobei die durch das temperaturabgeminderte Testreferenzjahr erhaltenen Ergebnisse gut den generellen Trend abbilden (siehe Abb. 38).



**Abb. 38:** Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk

Im Fall der relativen Luftfeuchte im Bestandsinnenputz ergibt sich ein etwas abweichendes Bild (siehe Abb. 39). Die Korrelation zwischen Jahresmitteltemperatur und maximaler relativer Luftfeuchte ist zwar immer noch vorhanden, aber nicht mehr so deutlich ausgeprägt wie bei den anderen Auswertungspunkten. Zudem wird bei Verwendung des Testreferenzjahres der mittlere Trend nicht abgebildet, die auftretenden Maxima werden deutlich unterschätzt.



**Abb. 39:** Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Bestandputz

Darin liegt auch der Grund, wieso die Temperatur des Testreferenzjahres im Fall des Innenputzes überdurchschnittlich abgemindert werden musste (siehe Tab. 6). Da das vorliegende Testreferenzjahr für die Ermittlung des langjährigen Energieverbrauchs einer beliebigen Konstruktion entwickelt wurde, soll nachfolgend ein mittleres Jahr in Bezug auf den Feuchtehaushalt der betrachteten innengedämmten Konstruktion ermittelt werden.

#### 6.4.4 Mittleres Jahr mit Temperaturabminderung

##### 6.4.4.1 Methodik

In diesem Abschnitt soll versucht werden, ein mittleres Jahr zu finden, das so zusammengesetzt ist, dass die erhaltenen Simulationsergebnisse für alle Auswertungspunkte und somit repräsentativ für die gesamte Konstruktion im Mittel liegen. Bei einem solchen, für die hygrothermische Simulation und die vorliegende innengedämmte Wandkonstruktion optimierten mittleren Jahr ist zu erwarten, dass die Streuung der dann notwendigen Temperaturabminderungen geringer ist.

Der Grundgedanke des hier vorgeschlagenen Verfahrens besteht darin, dass ein Jahr gefunden werden soll, in dem die Summe der Abweichungen der Simulationsergebnisse für die betrachteten Auswertungspunkte vom jeweiligen Mittelwert ein Minimum aufweisen sollen. Zunächst werden dazu die jeweiligen Maxima der Simulationen, die für einen zehnmal sich wiederholenden Jahresdatensatz durchgeführt wurden, ermittelt. Untersucht wurde ein eindimensionaler Wandaufbau mit 8 cm CaSi-Platten und 44 cm Mauerwerk. Je zu vergleichender Simulationsgröße ( $w_{ges}$ , relative Luftfeuchte Mauerwerk, relative Luftfeuchte Bestandsinnenputz) wird ein Mittelwert gebildet. Anschließend werden die Differenzen zwischen den erhaltenen Ergebnissen für die Datensätze der einzelnen Jahre mit dem jeweiligen Mittelwert gebildet (siehe Abb. 40).

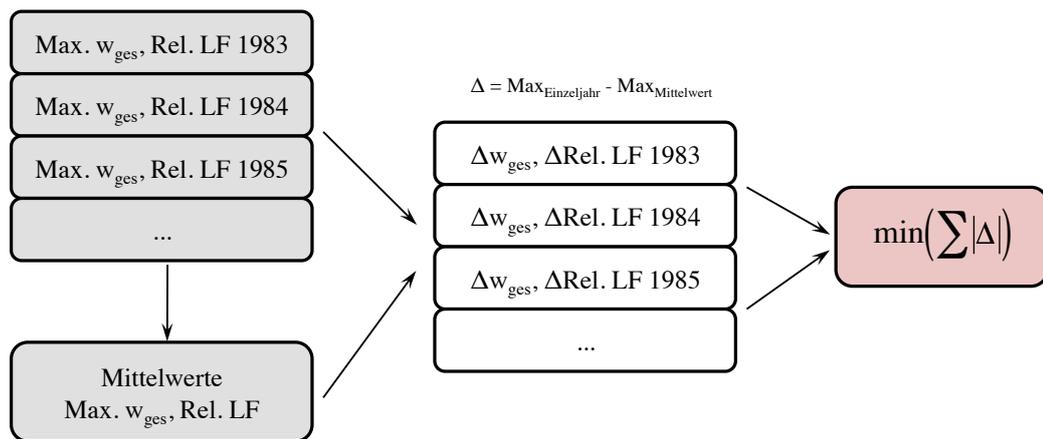


Abb. 40: Ermittlung eines mittleren Datensatzes

Da die ermittelten Differenzen unterschiedliche Einheiten aufweisen, wurden sie auf den jeweiligen Mittelwert („Abweichung“) bezogen, wodurch es möglich ist, die Absolutwerte der ermittelten Abweichungen zu summieren und ein Minimum zu finden. Eine Aufstellung der ermittelten Werte für den Standort Wien (Westausrichtung) zeigt Tab. 9. Ein Minimum an Abweichungen zum Mittelwert ergab sich dabei mit dem Klimadatensatz des Jahres 1997.

#### 6.4.4.2 Ergebnisse

Analog der in Abschnitt 6.4.2.1 beschriebenen Methodik wurden die Ergebnisse einer Simulation über 30 zusammenhängende Jahre und eines temperaturabgeminderten Jahres 1997 (-0,5 bis -2 K) je Größe bzw. Auswertungspunkt verglichen. In Tab. 10 wurden zudem die Ergebnisse für verschiedene Mauerwerksstärken eingetragen. Da das gesuchte mittlere Jahr für eine Konstruktion mit 44 cm Mauerwerk ermittelt wurde, sollte gezeigt werden, dass mit diesem Jahr auch für unterschiedliche Konstruktionsdimensionen brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

Es zeigt sich, dass die notwendigen Temperaturabminderungen für die Konstruktion mit 44 cm Mauerwerk zwar geringer ausfallen, gleichwohl bewegt sich  $\Delta T$  bei variiertem Mauerwerksstärke (bis auf einen Wert) im Bereich von 0,5 bis 2 K. Interessant ist auch, dass sich bei Untersuchung eines eindimensionalen Wandquerschnittes gleiche Ergebnisse in Bezug auf die notwendige Temperaturabminderung ergeben wie bei Untersuchung des zu Beginn betrachteten Tram-Details. Es konnte somit gezeigt werden, dass das ermittelte Jahr 1997 mit Temperaturabminderung für verschiedene Wandaufbauten und sowohl für eine eindimensionale wie zweidimensionale Betrachtung angewandt werden kann.

**Tab. 9:** Ermittlung eines mittleres Datensatzes für Wien

Jahr	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF	Rel. LF	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Summe Abw. absolut [%]
		Mwk [%]	Putz [%]	$w_{ges}$ [%]	Rel.LF Mwk [%]	Rel.LF Putz [%]	
1983	6,02	69,83	82,46	-9,06	-3,44	0,65	13,16
1984	7,13	74,95	80,26	7,66	3,65	-2,03	13,34
1985	7,04	74,05	85,77	6,29	2,40	4,70	13,40
1986	6,65	71,99	84,61	0,42	-0,45	3,27	4,14
1987	7,07	74,38	84,58	6,78	2,86	3,25	12,89
1988	6,66	72,19	81,09	0,65	-0,18	-1,02	1,85
1989	6,52	72,66	81,74	-1,45	0,48	-0,23	2,15
1990	6,08	70,25	81,88	-8,17	-2,86	-0,05	11,08
1991	6,73	73,33	82,80	1,71	1,41	1,06	4,19
1992	5,76	68,15	80,23	-13,00	-5,76	-2,06	20,82
1993	6,78	72,16	84,14	2,40	-0,21	2,71	5,31
1994	6,34	71,67	77,86	-4,29	-0,89	-4,96	10,14
1995	6,70	73,02	81,88	1,24	0,97	-0,06	2,27
1996	7,86	76,36	85,62	18,69	5,59	4,51	28,79
<b>1997</b>	<b>6,59</b>	<b>72,97</b>	<b>81,72</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,90</b>	<b>-0,25</b>	<b>1,60</b>
1998	6,64	72,53	83,11	0,28	0,30	1,45	2,03
1999	6,91	73,11	80,49	4,44	1,09	-1,75	7,29
2000	5,93	69,91	79,23	-10,44	-3,32	-3,29	17,05
2001	6,75	73,58	82,95	1,93	1,75	1,25	4,93
2002	6,38	71,84	81,12	-3,67	-0,65	-0,98	5,31
2003	6,10	69,61	80,68	-7,84	-3,75	-1,52	13,11
2004	7,08	73,87	80,80	6,93	2,15	-1,37	10,46
2005	6,82	72,65	81,69	2,97	0,47	-0,29	3,73
2006	6,55	72,41	82,57	-1,00	0,13	0,78	1,92
2007	6,46	71,15	81,68	-2,42	-1,61	-0,30	4,34
2008	6,33	71,58	78,67	-4,37	-1,02	-3,98	9,37
2009	6,93	72,32	81,57	4,62	0,01	-0,43	5,06
2010	6,84	73,92	82,98	3,38	2,22	1,29	6,90
2011	6,53	71,73	80,23	-1,33	-0,82	-2,07	4,21
2012	6,43	71,27	83,33	-2,93	-1,45	1,72	6,09
<b>MW</b>	<b>6,62</b>	<b>72,31</b>	<b>81,92</b>				

**Tab. 10:** Ergebnisse 1997 - $\Delta T$ 

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Tram	Rel. LF Be- standsputz
24 cm Mwk	1997 -2,5 K	1997 -1,5 K	-	1997 -2 K
44 cm Mwk	1997 -1 K	1997 -0,5 K	-	1997 -0,5 K
44 cm Mwk Tram Detail	1997 -1 K	1997 -0,5 K	1997 -0,5 K	1997 -0,5 K
64 cm Mwk	1997 -1,5 K	1997 -1 K	-	1997 -2 K

Um das erhaltene Jahr weiter zu verifizieren, wurden auch die Ausrichtung der Konstruktion sowie das Innenklima variiert. Die Konstruktion (44 cm Mauerwerk, 8 cm CaSi) wurde einmal nach Norden ausgerichtet betrachtet und einmal in der ursprünglichen Westausrichtung mit kritischerem Innenklima (Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit von 40 - 60% auf 50 - 70%). Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigt Tab. 11.

**Tab. 11:** Verifizierung des mittleren Jahres

Variante	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Be- standsputz
Nordausrichtung	1997 -1 K	1997 -0,5 K	1997 -1,5 K
Krit. Innenklima	1997 -1 K	1997 -0,5 K	1997 -1,5 K

#### 6.4.4.3 Alternative Ermittlung einer mittleren Jahres

Da die in Abschnitt 6.4.4.1 beschriebene Methodik zu Ermittlung eines mittleren Jahres-Datensatzes einen hohen Simulationsaufwand bzw. Datenbedarf mit sich bringt und für jeden Standort neu ermittelt werden müsste, wurde versucht, ob es möglich ist, ein mittleres Jahr auch anhand bestimmter Eigenschaften eines Klimadatensatzes zu bestimmen. Da laut Künzel (siehe Abschnitt 6.2) die erhaltenen Simulationsergebnisse hauptsächlich von der Jahresmitteltemperatur eines Datensatzes bestimmt werden, wurde deshalb versucht, als mittleres Jahr einen Datensatz mit mittlerer Jahresmitteltemperatur zu wählen. Im Falle von Wien ist dies das Jahr 2001, das eine mittlere Temperatur von 10,7°C aufweist, was der mittleren Temperatur der betrachteten Datensätze 1983 bis 2012 entspricht. Analog zu Abschnitt 6.4.4.2 wurden die notwendigen Temperaturabminderungen für verschiedene Mauerwerksstärken sowie das Tram-Detail ermittelt (siehe Tab. 12).

**Tab. 12:** Ergebnisse Wien 2001 - $\Delta T$ 

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Tram	Rel. LF Be- standsputz
24 cm Mwk	2001 -2 K	2001 -1 K	-	2001 -2 K
44 cm Mwk	2001 -1 K	2001 -0,5 K	-	2001 -1,5 K
44 cm Mwk Tram Detail	2001 -1 K	2001 -0,5 K	2001 -0.5K	2001 -1,5 K
64 cm Mwk	2001 -1 K	2001 -0,5 K	-	2001 -1,5 K

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass auch für das Jahr 2001 Temperaturabminderungen zwischen 0,5 und 2 K erhalten werden. Wieder weisen der eindimensionale Wandaufbau und das zweidimensionale Tram-Detail in Bezug auf  $\Delta T$  übereinstimmende Ergebnisse auf.

Um die gewählte alternative Methodik weiter zu verifizieren, wurde der Standort Klagenfurt herangezogen. Klagenfurt weist eine mittlere Jahresmitteltemperatur von 9,1°C auf. Da diese Temperatur in keinem Jahr vorliegt, wurde das Jahr 1998 herangezogen, das eine mittlere Jahresmitteltemperatur von 9,0°C aufweist (Ergebnisse siehe Tab. 13).

**Tab. 13:** Ergebnisse Klagenfurt 1998 - $\Delta T$

	$w_{ges}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Be- standsputz
24 cm Mwk	1998 -2 K	1998 -2 K	1998 -1,5 K
44 cm Mwk	1998 -1,5 K	1998 -1,5 K	1998 -1 K
64 cm Mwk	1998 -2 K	1998 -2 K	1998 -1 K

#### 6.4.4.4 Schlussfolgerungen

Durch die Wahl eines auf die gewählte Konstruktion abgestimmten mittleren Klimadatensatzes für ein Jahr ist gemäß Abschnitt 6.4.4.2 auch bei Variation diverser Parameter wie Konstruktionsabmessungen, Ausrichtung und Innenraumklima eine gute Abbildung des langjährigen Versagensrisikos bei einer Temperaturabminderung von -2 K möglich. Die alternative Ermittlung eines mittleren Datensatzes über die Jahresmitteltemperatur bringt für die untersuchten Standorte ebenfalls brauchbare Ergebnisse, müsste aber über den Umfang bzw. das vorhandene Datenmaterial dieser Arbeit hinaus für weitere Standorte verifiziert werden, damit allgemeingültige Empfehlungen abgegeben werden können.

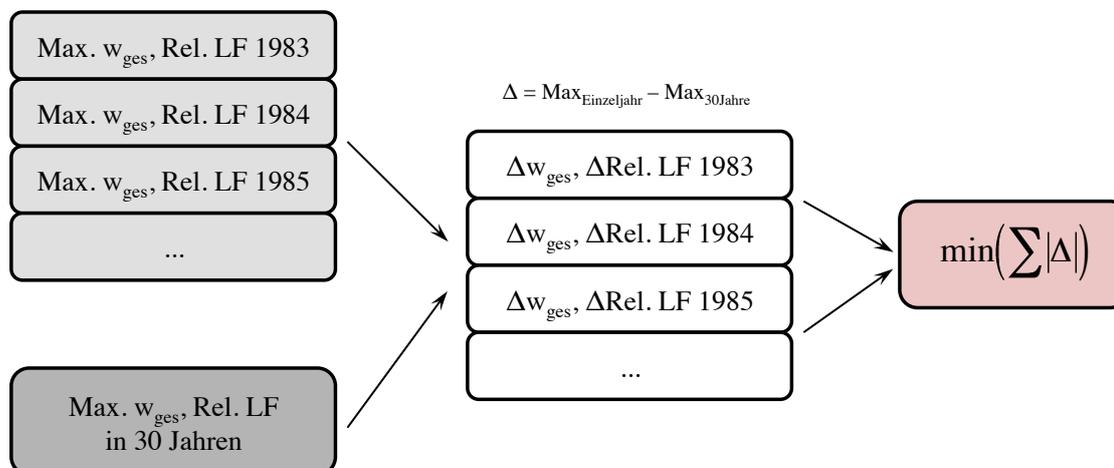
#### 6.4.5 Referenzjahr

##### 6.4.5.1 Methodik

Wie bereits ausgeführt wurde, soll die Simulation mit einem Referenzjahr das langjährige Maximum aller zu ermittelnder Größen gleichmäßig gut wiedergeben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb folgende Methodik zur Ermittlung eines Referenzjahres angewandt:

Die in Abschnitt 6.4.3 ermittelten Maxima für die zu vergleichenden Messwerte ( $w_{ges}$ , Rel. LF Mauerwerk und Bestandsputz) der einzelnen Jahre von 1983 bis 2012 (jeweils ermittelt im zehnten Jahr nach wiederkehrender Belastung mit einem Jahresdatensatz) werden mit den entsprechenden Maxima aus einer Simulation mit 30 zusammenhängenden Jahren verglichen. Gesucht

wird dann, wie schon in Abschnitt 6.4.4.1, jenes Jahr, in dem die Summe der Absolutwerte der Abweichungen minimal wird.



**Abb. 41:** Ermittlung eines Referenzjahres

Im Gegensatz zur Vorgangsweise beim mittleren Jahr ist es nun jedoch von Bedeutung, ob die einzelnen Abweichungen ein positives oder negatives Vorzeichen aufweisen. Ist die Abweichung (Differenz zwischen dem Ergebnis des Einzeljahres und des ermittelten langjährigen Maximums) negativ, bedeutet dies, dass das langjährige Maximum über dem des Einzeljahres liegt. Damit das Verhalten des gesamten Bauteils auf der sicheren Seite wiedergegeben wird, sollten deshalb alle ermittelten Abweichungen eines Jahres positiv sein. Im Regelfall wird es jedoch ausreichend sein, einen geeigneten Klimadatensatz über die minimale Summe der Abweichungen zu bestimmen und darauf zu achten, dass einzelne (negative) Abweichungen dabei nicht überproportional groß sind.

Für den Standort Wien wurden, wiederum unter Verwendung eines eindimensionalen Wandaufbaus mit 8 cm Innendämmung aus CaSi-Platten und 44 cm Mauerwerk bei Westausrichtung Ergebnisse entsprechend Tab. 14 ermittelt. In diesem Fall konnte sogar ein Jahr gefunden werden, bei dem die Abweichungen stets positiv sind und im Vergleich mit den anderen untersuchten Jahren ein Minimum aufweisen.

#### 6.4.5.2 Ergebnisse

Um zu verifizieren, ob das ermittelte Jahr 1985 möglichst universell anwendbar ist, wurden, wie bereits bei den Untersuchungen zum mittleren Jahr, einige Parameter variiert. Im Folgenden soll die Anwendbarkeit des Datensatzes von 1985 für verschiedene Mauerwerksstärken, das Tram-Detail sowie für Nordausrichtung (siehe Tab. 15) nachgewiesen werden.

**Tab. 14:** Ermittlung eines Referenzjahres für Wien

Jahr	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF	Rel. LF	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Summe Abw. absolut [%]
		Mwk [%]	Putz [%]	$w_{ges}$ [%]	Rel.LF Mwk [%]	Rel.LF Putz [%]	
1983	6,02	69,83	82,46	-14,25	-5,54	-2,92	22,71
1984	7,13	74,95	80,26	1,52	1,39	-5,51	8,42
<b>1985</b>	<b>7,04</b>	<b>74,05</b>	<b>85,77</b>	<b>0,23</b>	<b>0,17</b>	<b>0,98</b>	<b>1,39</b>
1986	6,65	71,99	84,61	-5,31	-2,62	-0,39	8,32
1987	7,07	74,38	84,58	0,70	0,62	-0,42	1,73
1988	6,66	72,19	81,09	-5,09	-2,35	-4,54	11,97
1989	6,52	72,66	81,74	-7,07	-1,71	-3,77	12,55
1990	6,08	70,25	81,88	-13,41	-4,98	-3,60	21,98
1991	6,73	73,33	82,80	-4,09	-0,80	-2,52	7,41
1992	5,76	68,15	80,23	-17,96	-7,81	-5,54	31,31
1993	6,78	72,16	84,14	-3,44	-2,39	-0,94	6,77
1994	6,34	71,67	77,86	-9,75	-3,05	-8,33	21,13
1995	6,70	73,02	81,88	-4,53	-1,23	-3,61	9,37
1996	7,86	76,36	85,62	11,92	3,29	0,80	16,01
1997	6,59	72,97	81,72	-6,12	-1,30	-3,79	11,21
1998	6,64	72,53	83,11	-5,44	-1,88	-2,15	9,48
1999	6,91	73,11	80,49	-1,51	-1,11	-5,24	7,87
2000	5,93	69,91	79,23	-15,54	-5,43	-6,72	27,70
2001	6,75	73,58	82,95	-3,88	-0,47	-2,35	6,70
2002	6,38	71,84	81,12	-9,16	-2,82	-4,50	16,48
2003	6,10	69,61	80,68	-13,10	-5,84	-5,02	23,96
2004	7,08	73,87	80,80	0,84	-0,08	-4,88	5,79
2005	6,82	72,65	81,69	-2,90	-1,72	-3,83	8,44
2006	6,55	72,41	82,57	-6,64	-2,05	-2,79	11,48
2007	6,46	71,15	81,68	-7,99	-3,75	-3,84	15,59
2008	6,33	71,58	78,67	-9,83	-3,18	-7,39	20,39
2009	6,93	72,32	81,57	-1,34	-2,18	-3,97	7,49
2010	6,84	73,92	82,98	-2,51	-0,01	-2,31	4,82
2011	6,53	71,73	80,23	-6,95	-2,98	-5,54	15,47
2012	6,43	71,27	83,33	-8,46	-3,60	-1,90	13,96
Max <sub>30J</sub>	<b>7,02</b>	<b>73,93</b>	<b>84,94</b>				

Es sind durchgehend geringe Abweichungen vom Soll-Wert (Max. 30 Jahre) zu beobachten. Auch wenn einzelne Werte mit dem Referenzjahr zu niedrig erfasst werden, handelt es sich dabei um eine Abweichung von lediglich einigen Zehntel-Prozent gegenüber dem langjährigen Maximalwert. Diese Größenordnungen sind für die Beurteilung des Versagensrisikos nicht von Bedeutung, wenn bedacht wird, dass schon in der Festlegung von Modell- und Materialeigenschaften, bei der Messung von Klimaparametern und schließlich bei der Ermittlung von abgeleiteten Größen wie Schimmel- und Verrottungspotential Unsicherheiten und Genauigkeitsgrenzen vorliegen.

**Tab. 15:** Verifizierung 1985

	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Rel. LF Tram [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>24 cm Mwk</b>				
Max. 1985	4,84	77,48	-	90,96
Max. 30 Jahre	5,08	78,27	-	90,84
<b>44 cm Mwk (Tram-Detail)</b>				
Max. 1985	21,31	76,87	73,51	84,25
Max. 30 Jahre	21,32	75,56	72,66	83,46
<b>44 cm Mwk (Nordausr.)</b>				
Max. 1985	7,33	75,92	-	86,57
Max. 30 Jahre	7,73	76,38	-	85,86
<b>64 cm Mwk</b>				
Max. 1985	9,18	72,52	-	80,47
Max. 30 Jahre	9,21	72,58	-	79,71

### 6.4.5.3 Schlussfolgerungen

Es konnte festgestellt werden, dass im Fall eines wasserabweisenden Putzes für den Standort Wien ein geeignetes Referenzjahr über das gewählte Verfahren ermittelt werden kann. Zur Bestätigung der Vorgangsweise wurden, etwa für den Standort Klagenfurt und Nordausrichtung, ebenfalls Referenzjahre ermittelt (siehe Abschnitt 6.6).

## 6.5 Wasserhemmende/wassersaugende Außenhülle

### 6.5.1 Vorbemerkungen

Während in Abschnitt 6.4.3 gezeigt werden konnte, dass für eine Fassade mit wasserabweisender Außenhülle eine deutliche Korrelation zwischen der Jahresmitteltemperatur und dem Feuchtehaushalt einer Konstruktion besteht und die Schlagregenmenge kaum von Bedeutung ist, kann nun erwartet werden, dass bei einer wasserhemmenden oder wassersaugenden Außenhülle jene Jahre kritischer für die Konstruktion sind, die eine hohe Schlagregenbelastung aufweisen. Dies stellt die Motivation dar, die Ermittlung eines Referenzjahres entsprechend der Wasseraufnahmefähigkeit der Konstruktionsaußenhülle zu gliedern, da nun mutmaßlich Jahre mit anderen Eigenschaften gesucht werden.

### 6.5.2 Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade

Die Ermittlung des  $W_w$ -Wertes eines porösen Materials wurde in Abschnitt 5.4 beschrieben. Wie sich zeigen wird, ist die Wahl des Wasseraufnahmekoeffizienten von entscheidender Bedeutung für das Feuchteverhalten eines Bauteils.

Bednar hat in [BED00] umfangreiche Untersuchungen betreffend die für die hygrothermische Simulation notwendigen Stoffkennwerte üblicher Außenputze an Gründerzeithäusern durchgeführt (siehe Abschnitt 5.4.3). Dabei zeigte sich, dass ein solcher Putz im Normalfall einen  $W_w$ -Wert von etwa  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  aufweist. Da damit zu rechnen ist, dass die tatsächliche bzw. effektive Wasseraufnahmefähigkeit einer Gründerzeitfassade durch Verschmutzungen an der Fassadenoberfläche, Sperrschichten bzw. Vorspritzer an der Grenzfläche zum Ziegelmauerwerk, die Schwächung der kapillaren Leitfähigkeit im Putz durch Hohlräume und Inhomogenitäten sowie die bei Gründerzeithäusern üblichen Fassadengliederungselemente wie Pilaster oder Gesimse tendenziell geringer ausfällt als unter Laborbedingungen, kann ein  $W_w$ -Wert von  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  als ein besonders kritischer, aber dennoch realistischer Fall angesehen werden. Insofern wurde diesem  $W_w$ -Wert besonderes Augenmerk gewidmet. Um die durch einen höheren (z.B. Sichtziegel-Fassade aus nicht-gesinterten Steinen) bzw. niedrigeren Wasseraufnahmekoeffizienten verursachten Veränderungen im Bauteilverhalten zu untersuchen, wurden auch diese betrachtet.

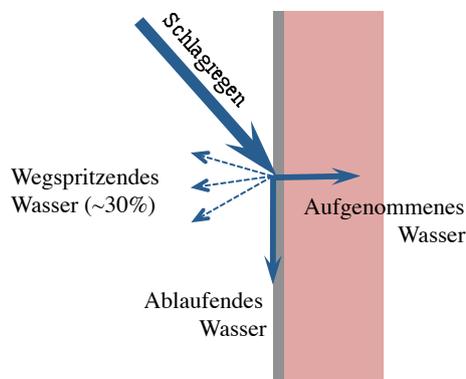
Bei den angestellten Untersuchungen zeigte sich, dass die Erhöhung des  $W_w$ -Wertes des hinter dem Außenputz liegenden Mauerwerks zu keinem merkbar erhöhten Feuchteeintrag in die Konstruktion führt. Es kann somit gesagt werden, dass eine Veränderung des Feuchtehaushaltes der Konstruktion allein von der gewählten Wasseraufnahmefähigkeit des Außenputzes abhängig ist.

### 6.5.3 Schlagregenbelastung

Als ebenso wichtig wie die Wahl des  $W_w$ -Wertes einer Fassade erweist sich eine wirklichkeitsnahe Erfassung der auftretenden Schlagregenmenge. Durch das in Abschnitt 4.3.2 beschriebene Verfahren zur Berechnung eines Schlagregen- bzw. Wandindexes gemäß [ONO09] wird die maximale Menge an Schlagregen erfasst, die auf eine vertikale Fläche unter den gegebenen Randbedingungen auftreten kann. Nicht beachtet werden können dabei allerdings Auswirkungen eines konstruktiven Schlagregenschutzes (Dachüberstände, Fassadengliederung, Gesimse, etc) oder besonderer An- bzw. Umströmungsverhältnisse, die durch die Lage der betrachteten Fassade im Straßenzug bedingt sind. Doch auch wenn diese Effekte gut abgebildet werden oder nicht maßgeblich sind, fällt die tatsächliche Schlagregenbelastung zumeist geringer aus als jene, die aus den Normalregendaten ermittelt wird, wie etwa in [HUM11] gezeigt wurde.

Dies kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden: Zumeist, so auch im Rahmen dieser Arbeit, liegen zur Ermittlung der Schlagregenbelastung stündliche Werte für den Normalniederschlag vor. Dauert ein Regenereignis kürzer als eine Stunde, wird die aufgetretene Schlagregenmenge dennoch auf eine Stunde verteilt. Da „in der Regel die Saugkapazität des Oberflächenmaterials der begrenzende Faktor für die aufgenommene Regenmenge ist, führt eine solche zeitliche Streckung des Angebots zwangsläufig zu einer höheren Wasseraufnahme“ [WTA12]. Weiters ist

von großer Bedeutung, dass beim Aufprall des Regens auf die Fassade ein Teil des Wassers sofort wieder wegspritzt (siehe Abb. 42). Laut [WTA12] beläuft sich der wegspritzende Anteil auf etwa 30%.



**Abb. 42:** Wegspritzendes Wasser

Nach Auskunft der ZAMG, von der die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Daten bezogen wurden, geht in der kalten Jahreszeit auch ein Teil des Schnee-Niederschlages in die Niederschlagsmessung ein, da sich Schnee im Laufe des Tages bzw. über Nacht auf der Messeinrichtung sammeln kann und tagsüber bei Wärmeeinwirkung durch Sonnenstrahlung als Schmelzwasser in die Messung eingeht, obwohl für eine Fassade keine Schlagregenbelastung besteht.

Da die Auswirkungen der zeitlichen Streckung der Schlagregenbelastung sowie die durch Schmelzwasser hervorgerufenen Niederschlagsmengen nicht allgemeingültig quantifiziert werden können, wird im Rahmen dieser Arbeit nur der Anteil des wegspritzenden Wassers mit 30% berücksichtigt und der gemäß [ONO09] ermittelte Wandindex jeweils mit dem Faktor 0,7 multipliziert. Dadurch konnten auch in [HUM11] realitätsnähere Feuchtezustände erzielt werden. Dennoch erscheint es ratsam, bei durchzuführenden Bemessungsaufgaben auf gemessene Werte zurückzugreifen, um einen Eindruck von der Größenordnung des auftretenden Schlagregens bzw. der Relation zum Normalregen zu erhalten.

In den nachfolgenden Untersuchungen wird, wie auch in Abschnitt 6.4, grundsätzlich die Hauptschlagregenseite, für Wien und Klagenfurt ist dies Westen, untersucht. In Verbindung mit dem in Abschnitt 6.5.2 gewählten Wasseraufnahmekoeffizienten wird somit zunächst ein besonders kritischer, aber durchaus noch realistischer Fall überprüft.

#### 6.5.4 Eigenschaften der Jahresdatensätze (Wien)

Analog zur Vorgangsweise in Abschnitt 6.4.3 wurden die Maxima der untersuchten Größen aus Simulationen mit einem Jahresdatensatz nach Erreichen eines eingeschwungenen Zustandes (zehntes simuliertes Jahr) ermittelt. Betrachtet wurde wieder ein Wandaufbau mit 44 cm Mauer-

werk und 8 cm Innendämmung aus CaSi-Platten, die Ausrichtung erfolgte nach Westen, als Wasseraufnahmekoeffizient wurde ein Wert von  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  gewählt. Die Jahresmaxima wurden der jeweiligen Jahresmitteltemperatur sowie der Jahressumme des aufgetretenen Schlagregens gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Testreferenzjahres für Wien Hohe Warte mit Temperaturabminderungen von 0,5 bis 2 K sind ebenfalls dargestellt.

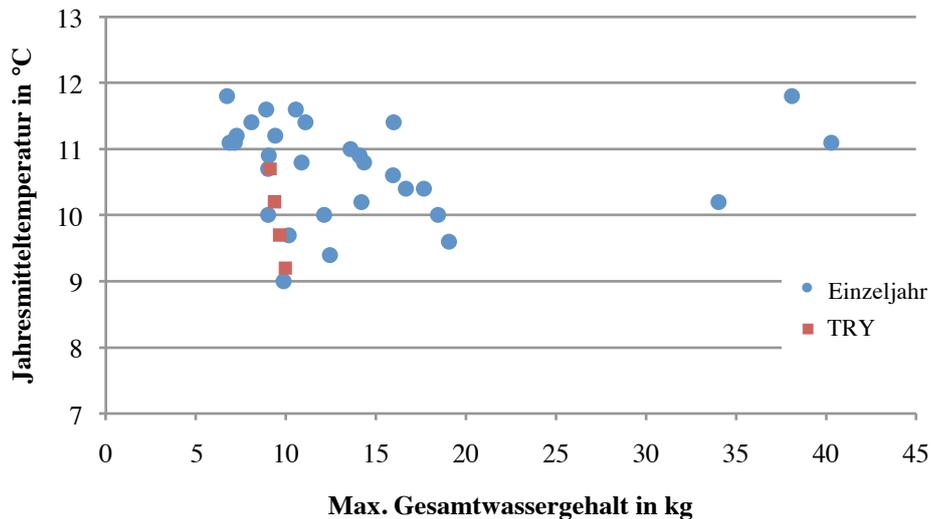


Abb. 43: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. Gesamtwassergehalt

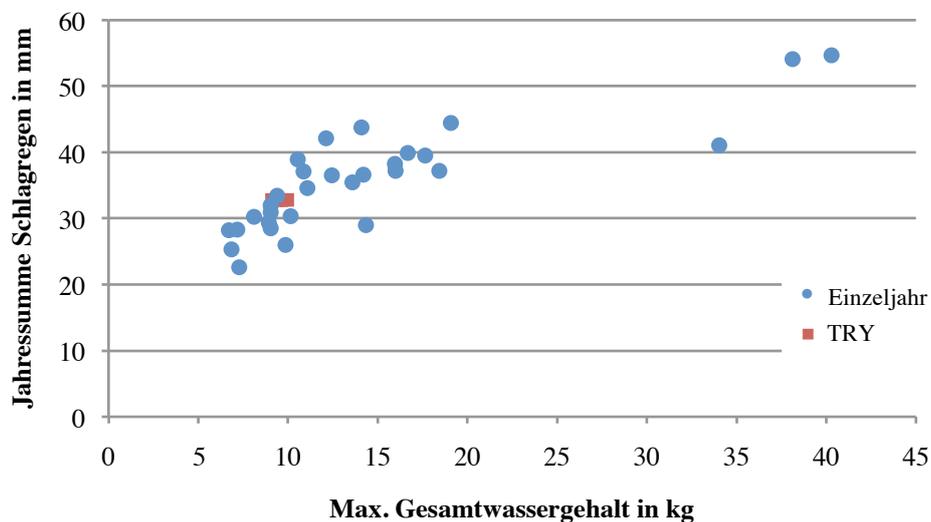
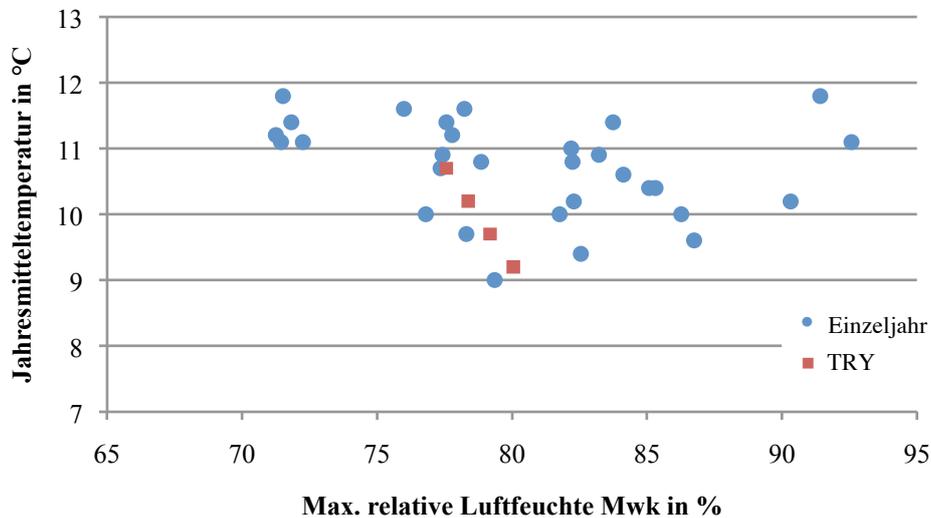


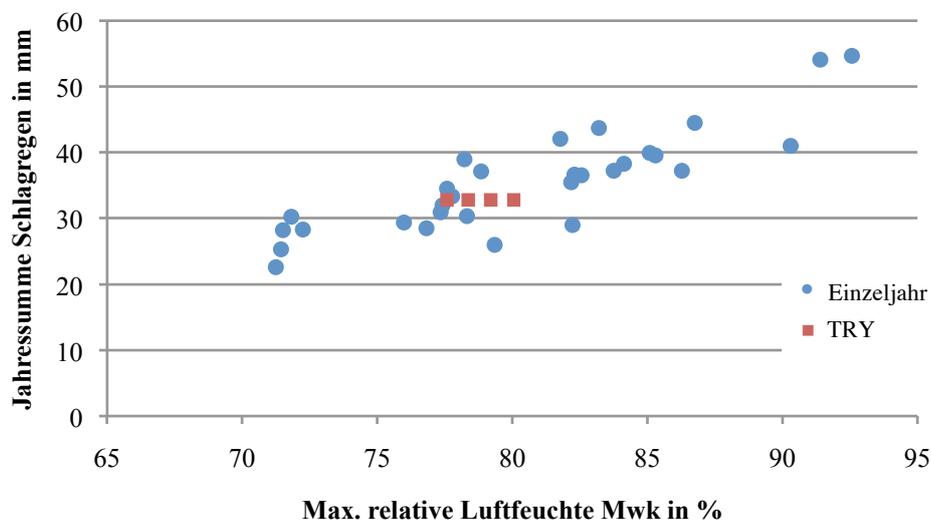
Abb. 44: Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. Gesamtwassergehalt

Am Beispiel des Gesamtwassergehaltes ist bereits die Grundtendenz der durchgeführten Simulationen ersichtlich: Während zwischen dem maximal auftretenden Gesamtwassergehalt und der Jahresmitteltemperatur (siehe Abb. 43) keine Korrelation feststellbar ist, ist diese im Fall der Jahressumme des Schlagregens deutlich ausgeprägt (siehe Abb. 44). Bei jenen drei Jahren, die

einen außergewöhnlich hohen maximalen Gesamtwassergehalt aufweisen, handelt es sich um Jahre mit besonders hoher Schlagregenbeanspruchung. Mit diesen Datensätzen war es nicht möglich, einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen.



**Abb. 45:** Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk

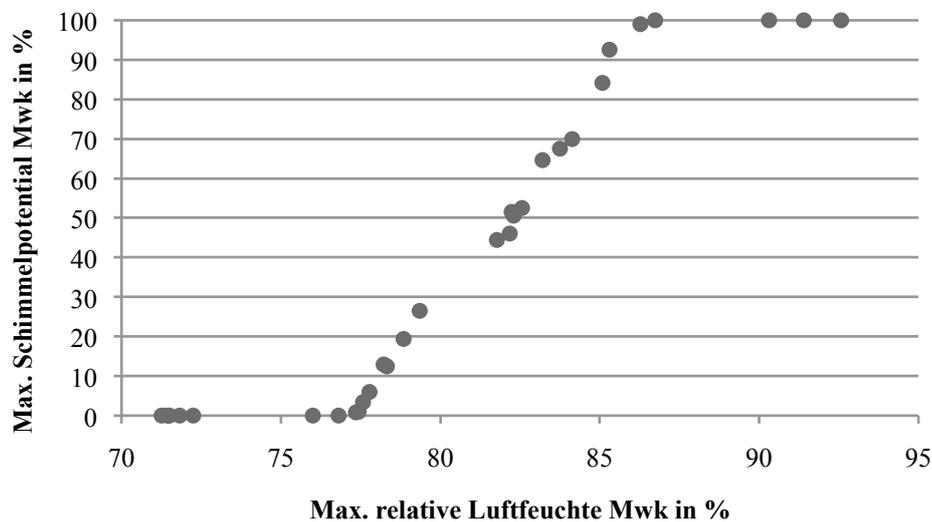


**Abb. 46:** Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk

In Abb. 45 sowie Abb. 46 bestätigt sich der festgestellte Trend besonders deutlich. Während zwischen maximal auftretender relativer Luftfeuchte im Mauerwerk (Mitte) und Jahresmitteltemperatur keine Korrelation feststellbar ist, ist sie zur Jahressumme des Schlagregens deutlich ausgeprägt.

Da im Rahmen der Untersuchungen mit wassersaugendem Außenputz in einigen Fällen maximale relative Luftfeuchten im Mauerwerk von über 80% erreicht wurden und somit ein Schimmelrisiko

besteht, kann auch gezeigt werden, dass der Wert für die maximale relative Luftfeuchte in einer Bauteilschicht für einen Jahresdatensatz auch einen guten Indikator für das zu erwartende maximale Schimmelrisiko darstellt.



**Abb. 47:** Korrelation Max. relative Luftfeuchte – Max. Schimmelpotential (Mwk)

In Abb. 47 zeigt sich, dass im Mauerwerk ab etwa 77 % maximaler relativer Luftfeuchte ein Schimmelrisiko auftreten kann. Danach kann man von einer beinahe linearen Korrelation zwischen maximalem Schimmelpotential und maximaler relativer Luftfeuchte sprechen. Diese Korrelation gilt jedoch immer nur für den entsprechenden Auswertungspunkt bzw. eine Bauteilschicht. Während im Mauerwerk ein Maximalwert von 85% relativer Luftfeuchte ausreicht, um ein maximales Schimmelpotential von etwa 80% zu erzeugen, ist beim Auswertungspunkt Bestandsinnenputz trotz deutlich höherer maximaler relativer Luftfeuchten das Schimmelrisiko viel geringer, da die Maxima sich dort auf kurzzeitig auftretende Spitzen beschränken.

Im Fall des Auswertungspunktes Bestandsinnenputz zeigt sich, dass die Jahresmitteltemperatur wieder an Bedeutung gewinnt und eine deutliche Korrelation zum Maximum der relativen Luftfeuchte besteht. Dies wirkt plausibel, da der Tauwasseranfall am Bestandsinnenputz umso höher sein wird, je niedriger die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Innendämmung und Bestandsinnenputz ist. Die Korrelation zwischen der Jahressumme des Schlagregens und der maximalen relativen Luftfeuchte im Bestandsinnenputz ist ebenfalls noch vorhanden, jedoch relativ schwach ausgeprägt.

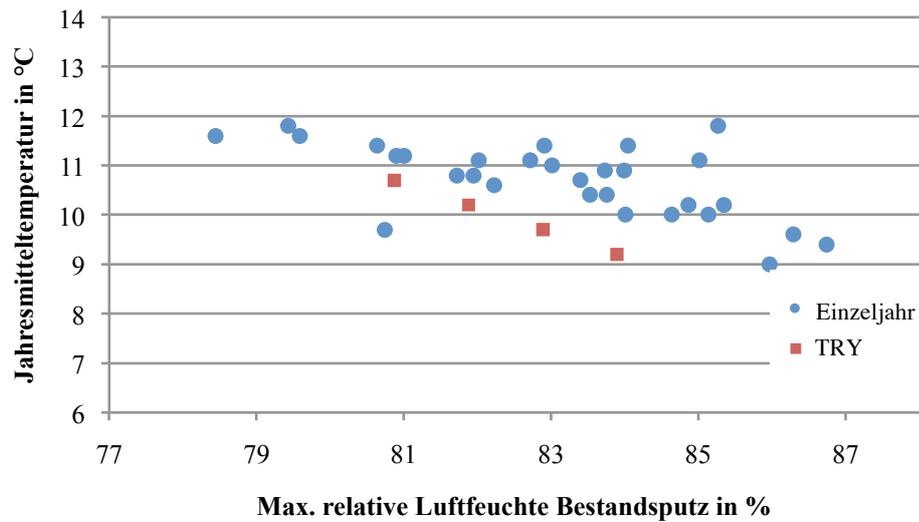


Abb. 48: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Bestandsputz

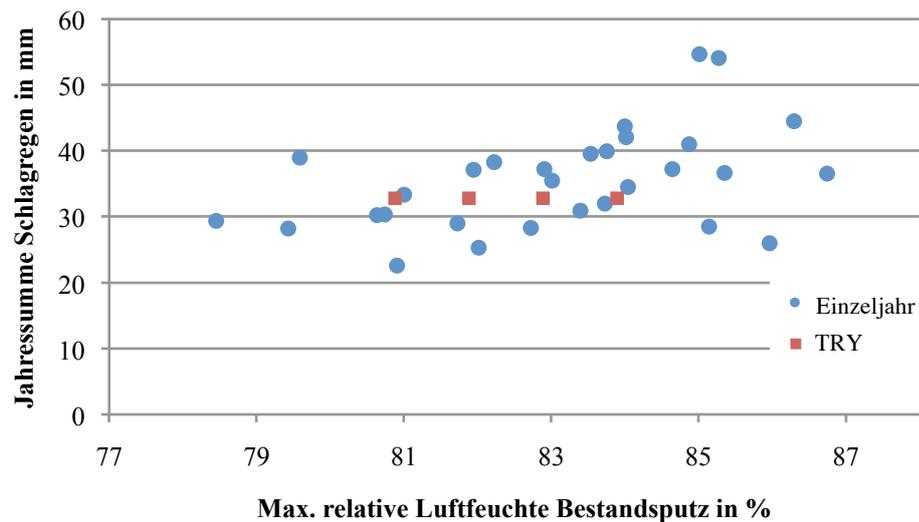


Abb. 49: Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. relative Luftfeuchte Bestandsputz

## 6.5.5 Testreferenzjahr

### 6.5.5.1 Vorbemerkungen

Nachfolgend soll das Testreferenzjahr (TRY) für den Standort Wien auf seine Eignung für die Abbildung des langjährigen hygrothermischen Bauteilverhaltens bei Vorliegen eines saugenden Außenputzes überprüft werden. Zunächst soll versucht werden, das TRY durch eine Temperaturabminderung analog Abschnitt 6.4.2 kritischer zu machen. Da die Fassade bei saugendem Außenputz empfindlicher auf die Menge des Schlagregens reagiert (siehe Abschnitt 6.5.4), soll als zweite Möglichkeit durch die Steigerung der Schlagregenmenge um einen vorgegebenen Faktor (ohne Temperaturabminderung) ein kritischeres Jahr erzeugt werden. Grundlage für beide Varianten

ten ist eine um den Faktor 0,7 abgeminderte Schlagregenbelastung, da dies jene Niederschlagsmenge darstellt, die für die Konstruktion tatsächlich maßgebend ist. Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf eine Wandkonstruktion mit 5 cm CaSi-Platten und 44 cm Mauerwerk. Die Ausrichtung der Konstruktion erfolgt nach Westen, der  $W_w$ -Wert beträgt  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ .

#### 6.5.5.2 Ergebnisse TRY $-\Delta T$ , Regen $\cdot 0,7$

Aus der Simulation mit einer Temperaturabminderung unter Beibehaltung der Schlagregenbelastung ergaben sich Werte gemäß Tab. 16.

**Tab. 16:** Ergebnisse TRY  $-\Delta T$ , Regen  $\cdot 0,7$

	Max 30 Jahre	Max TRY -0,5 K	Max TRY -1 K	Max TRY -1,5 K	Max TRY -2 K
$W_{\text{ges}}$ [kg]	16,34	8,46	8,64	8,84	9,06
Rel. LF Mwk [%]	83,38	75,09	75,79	76,51	77,25
Rel. LF Putz [%]	81,25	74,63	75,51	76,39	77,29

Insbesondere an den Ergebnissen für den Gesamtwassergehalt ist ersichtlich, dass die durch eine Simulation mit dem TRY erhaltenen Werte weit unter den langjährigen Maxima liegen. Aufgrund der geringen Steigerungsraten wären deshalb sehr hohe Temperaturabminderungen notwendig, die sich in ihrer Größenordnung für die einzelnen Simulationenwerte noch dazu beträchtlich unterscheiden würden.

#### 6.5.5.3 Ergebnisse TRY, Regen $\cdot 0,7 \cdot x$

Aus der Simulation ohne Temperaturabminderung bei Erhöhung der tatsächlichen Schlagregenbelastung (Faktor 0,7) um einen Faktor x ergaben sich Werte gemäß Tab. 17.

**Tab. 17:** Ergebnisse TRY, Regen  $\cdot 0,7 \cdot x$

	Max 30 Jahre	Max Regen $\cdot 0,7 \cdot 1,5$	Max Regen $\cdot 0,7 \cdot 1,6$	Max Regen $\cdot 0,7 \cdot 1,65$
$W_{\text{ges}}$ [kg]	16,34	13,25	14,94	17,58
Rel. LF Mwk [%]	83,38	81,95	83,27	84,55
Rel. LF Putz [%]	81,25	74,84	75,10	75,40

Während sich hier, im Gegensatz zu den Ergebnissen in Tab. 16, das Maximum des Gesamtwassergehaltes bei sehr kleinen Veränderungen des Faktors  $x$  schnell vergrößert, sind bei der relativen Luftfeuchte im Innenputz nur sehr geringe Steigerungsraten bei Erhöhung der Schlagregenbelastung festzustellen.

#### 6.5.5.4 Schlussfolgerungen

Der Versuch, durch Variation der beiden für die Ergebnisse maßgeblichen Parameter Temperatur und Schlagregenbelastung ein Referenzjahr über die Verwendung eines TRY zu erhalten, führte zu grundlegenden Erkenntnissen über das Verhalten der betrachteten innengedämmten Wandkonstruktion. Während insbesondere der maximale Gesamtwassergehalt bei Temperaturabminderung unter Beibehaltung der Schlagregenmenge weit vom gewünschten Ergebnis entfernt liegt und auf eine Temperaturabminderung sehr träge reagiert, liegt der Fall beim Bestandsinnenputz genau umgekehrt.

Diese Zusammenhänge lassen sich schon aus den in Abschnitt 6.5.4 durchgeführten Untersuchungen ablesen: Während im Fall der Maxima des Gesamtwassergehaltes und der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk eine Korrelation zur Schlagregenmenge, nicht aber zur Jahresmitteltemperatur zu beobachten ist, ist beim Bestandsinnenputz eine Korrelation zur Jahresmitteltemperatur, kaum jedoch zur Schlagregenmenge festzustellen. Für die Wahl eines Referenzjahres bedeutet dies, dass ein Jahr gewählt werden muss, das sowohl ein bestimmtes Temperaturniveau als auch eine bestimmte Schlagregenmenge aufweist, um das Bauteilverhalten durchgehend richtig abzubilden.

#### 6.5.6 Mittleres Jahr

##### 6.5.6.1 Vorbemerkungen

Grundsätzlich gelten für ein mittleres Jahr, auch wenn es analog Abschnitt 6.4.4.1 und somit optimiert für eine innengedämmte Konstruktion ermittelt wird, bei saugendem Außenputz die selben Einschränkungen wie für das Testreferenzjahr. Eine Temperaturabminderung bei Belastung sämtlicher sonstiger Klimaparameter bringt demnach in der Regel nicht für die gesamte Konstruktion brauchbare Ergebnisse. Dennoch soll der Vollständigkeit halber gezeigt werden, welche Ergebnisse bei Verwendung eines mittleren Datensatzes erzielt werden.

##### 6.5.6.2 Methodik

Ein mittleres Jahr wurde analog Abschnitt 6.4.4.1 unter Verwendung der Daten aus Abschnitt 6.5.4 ermittelt. Minimale Abweichungen wurden dabei im Jahr 1999 gefunden (siehe Tab. 18).

**Tab. 18:** Ermittlung eines mittleres Datensatzes für Wien,  $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ 

Jahr	$w_{\text{ges}}$ [kg]	Rel. LF	Rel. LF	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Summe Abw. absolut [%]
		Mwk [%]	Putz [%]	$w_{\text{ges}}$ [%]	Rel.LF [%]	Mwk [%]	
1983	7,15	72,24	82,71	-50,20	-10,29	-0,46	60,95
1984	10,16	78,31	80,74	-29,25	-2,74	-2,84	34,83
1985	12,45	82,55	86,74	-13,28	2,52	4,38	20,19
1986	9,02	76,81	85,14	-37,16	-4,61	2,45	44,22
1987	19,07	86,74	86,29	32,75	7,73	3,84	44,31
1988	10,86	78,84	81,94	-24,40	-2,09	-1,39	27,87
1989	13,60	82,18	83,01	-5,31	2,06	-0,11	7,49
1990	6,85	71,44	82,01	-52,28	-11,28	-1,31	64,87
1991	18,43	86,27	84,64	28,31	7,14	1,85	37,30
1992	8,09	71,82	80,63	-43,69	-10,81	-2,96	57,46
1993	14,18	82,29	85,34	-1,28	2,20	2,70	6,18
1994	8,91	75,99	78,44	-37,94	-5,63	-5,60	49,17
1995	16,66	85,07	83,75	15,97	5,65	0,79	22,40
1996	9,87	79,34	85,96	-31,25	-1,46	3,45	36,16
1997	34,03	90,31	84,86	136,86	12,16	2,13	151,14
1998	9,03	77,42	83,72	-37,10	-3,85	0,75	41,70
<b>1999</b>	<b>14,33</b>	<b>82,23</b>	<b>81,72</b>	<b>-0,20</b>	<b>2,12</b>	<b>-1,66</b>	<b>3,98</b>
2000	6,72	71,50	79,43	-53,22	-11,20	-4,42	68,84
2001	9,02	77,34	83,39	-37,21	-3,95	0,36	41,51
2002	15,98	83,75	82,90	11,23	4,01	-0,23	15,47
2003	7,27	71,25	80,90	-49,37	-11,51	-2,65	63,53
2004	15,94	84,13	82,22	11,00	4,48	-1,05	16,53
2005	17,65	85,30	83,53	22,88	5,93	0,52	29,33
2006	14,07	83,21	83,99	-2,03	3,34	1,08	6,44
2007	38,10	91,40	85,27	165,22	13,51	2,61	181,34
2008	10,55	78,22	79,58	-26,51	-2,85	-4,23	33,59
2009	40,29	92,57	85,01	180,42	14,96	2,30	197,68
2010	12,13	81,76	84,01	-15,54	1,54	1,09	18,18
2011	9,41	77,77	81,00	-34,48	-3,42	-2,52	40,43
2012	11,07	77,57	84,04	-22,93	-3,67	1,13	27,73
<b>MW</b>	<b>14,37</b>	<b>80,53</b>	<b>83,10</b>				

### 6.5.6.3 Ergebnisse

Durch Simulationen mit variierter Temperaturabminderung (0,5 bis 2 K) ergaben sich bei linearer Extrapolation der erhaltenen Maxima erforderliche Temperaturabminderungen je Dämmstärke gemäß Tab. 19.

In diesem Fall wirken die Ergebnisse relativ einheitlich, was allerdings auch speziell mit dem gewählten mittleren Datensatz zu tun hat. Der Mittelwert des auf eine Temperaturabminderung nur sehr träge reagierenden Gesamtwassergehaltes befindet sich bei Simulation mit dem Jahr 1999 schon recht nahe am 30-Jahre-Maximum, da einzelne Jahre mit besonders hohem Schlagregen-aufkommen (z.B. 2007 und 2009) den Mittelwert erhöhen. Insofern sind hier nicht so hohe Tem-

peraturabminderungen erforderlich wie beim zuvor diskutierten TRY. Der Wert für die maximale relative Luftfeuchte im Bestandsputz liegt hingegen im Jahr 1999 deutlich unter dem Mittelwert und muss deshalb trotz größerer Steigerungsraten je Temperaturabsenkung bis zum Erreichen des langjährigen Maximums überdurchschnittlich erhöht werden.

**Tab. 19:** Ergebnisse Mittleres Jahr  $-\Delta T$ ,  $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$

	$W_{\text{ges}}$	Rel. LF Mwk Mitte	Rel. LF Be- standsputz
3 cm CaSi	1999 -5 K	1999 -3 K	1999 -3 K
5 cm CaSi	1999 -3,5 K	1999 -2,5 K	1999 -3 K
8 cm CaSi	1999 -3 K	1999 -2 K	1999 -2,5 K

#### 6.5.6.4 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung eines mittleren Jahres nicht empfohlen werden kann, da ein mittlerer Datensatz spezielle Eigenschaften aufweisen müsste, damit durch eine einheitliche Temperaturabminderung brauchbare Ergebnisse erzielt werden können.

#### 6.5.7 Referenzjahr

##### 6.5.7.1 Methodik

Die Ermittlung eines Referenzjahres erfolgte analog Abschnitt 6.4.5.1. Die Ergebnisse sind in Tab. 20 abgebildet. In diesem Fall wurde jenes Jahr gewählt, in dem sämtliche Abweichungen der einzelnen Auswertungspunkte vom langjährigen Maximum positiv waren und dabei die Summe der Abweichungen möglichst minimal war. Dadurch ist eine Bemessung auf der sicheren Seite möglich. Eine geringere Summe der Abweichungen liegt bei den Jahren 1991 und 2005 vor. In beiden Fällen wird jedoch das Maximum der relativen Luftfeuchte des Bestandputzes deutlich unterschätzt. Bei Beachtung der Klimastatistik zeigt sich, dass beide Jahre eine höhere Jahresmitteltemperatur als 1987 aufweisen (1991: 10,0°C, 2005: 10,4°C, 1987: 9,6°C), was gut zu den in Abschnitt 6.5.5.4 ermittelten Zusammenhängen passt.

##### 6.5.7.2 Ergebnisse

Es soll gezeigt werden, dass das gewählte Jahr 1987 auch bei Variation verschiedener Simulationsparameter brauchbare Ergebnisse liefert. Der Vergleich des Schimmelpotentials beschränkt sich auf das Mauerwerk, da im Bestandsputz aufgrund der dort nur kurzzeitig aufgetretenen Maxima der relativen Luftfeuchte kein erwähnenswertes Schimmelpotential festgestellt wurde.

**Tab. 20:** Ermittlung eines Referenzjahres für Wien,  $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ 

Jahr	$w_{\text{ges}}$ [kg]	Rel. LF	Rel. LF	Abweichung	Abweichung	Abweichung	Summe Abw. absolut [%]
		Mwk [%]	Putz [%]	$w_{\text{ges}}$ [%]	Rel.LF [%]	Mwk [%]	
1983	7,15	72,24	82,71	-60,52	-15,52	-3,57	79,60
1984	10,16	78,31	80,74	-43,92	-8,41	-5,87	58,20
1985	12,45	82,55	86,74	-31,26	-3,45	1,13	35,84
1986	9,02	76,81	85,14	-50,19	-10,17	-0,74	61,10
<b>1987</b>	<b>19,07</b>	<b>86,74</b>	<b>86,29</b>	<b>5,22</b>	<b>1,45</b>	<b>0,60</b>	<b>7,27</b>
1988	10,86	78,84	81,94	-40,07	-7,79	-4,46	52,33
1989	13,60	82,18	83,01	-24,94	-3,89	-3,22	32,05
1990	6,85	71,44	82,01	-62,17	-16,45	-4,38	83,01
1991	18,43	86,27	84,64	1,71	0,89	-1,32	3,92
1992	8,09	71,82	80,63	-55,37	-16,01	-5,99	77,36
1993	14,18	82,29	85,34	-21,75	-3,76	-0,50	26,01
1994	8,91	75,99	78,44	-50,81	-11,13	-8,54	70,48
1995	16,66	85,07	83,75	-8,08	-0,51	-2,36	10,94
1996	9,87	79,34	85,96	-45,51	-7,21	0,22	52,93
1997	34,03	90,31	84,86	87,75	5,62	-1,06	94,43
1998	9,03	77,42	83,72	-50,14	-9,45	-2,39	61,98
1999	14,33	82,23	81,72	-20,89	-3,84	-4,73	29,45
2000	6,72	71,50	79,43	-62,92	-16,38	-7,40	86,69
2001	9,02	77,34	83,39	-50,23	-9,55	-2,77	62,54
2002	15,98	83,75	82,90	-11,83	-2,06	-3,34	17,23
2003	7,27	71,25	80,90	-59,86	-16,67	-5,68	82,22
2004	15,94	84,13	82,22	-12,02	-1,61	-4,14	17,77
2005	17,65	85,30	83,53	-2,60	-0,24	-2,61	5,45
2006	14,07	83,21	83,99	-22,34	-2,68	-2,08	27,10
2007	38,10	91,40	85,27	110,23	6,89	-0,59	117,72
2008	10,55	78,22	79,58	-41,75	-8,52	-7,21	57,48
2009	40,29	92,57	85,01	122,28	8,26	-0,89	131,43
2010	12,13	81,76	84,01	-33,05	-4,38	-2,06	39,49
2011	9,41	77,77	81,00	-48,07	-9,05	-5,56	62,68
2012	11,07	77,57	84,04	-38,91	-9,28	-2,02	50,21
Max <sub>30J</sub>	<b>18,13</b>	<b>85,51</b>	<b>85,78</b>				

Grundsätzlich wird nachfolgend die Bestandskonstruktion mit 44 cm Mauerwerk, 5 cm CaSi-Platten, Standort Wien, Westausrichtung und einem  $W_w$ -Wert von  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  betrachtet.

a) Variation Dämmstärke

Wie in Tab. 21 ersichtlich ist, werden durch Verwendung des Jahres 1987 bei Variation der Dämmstärke grundsätzlich brauchbare Werte erhalten. Im Falle des Schimmelpotentials zeigt sich, dass die relative Luftfeuchte einen guten Indikator für das maximal auftretende Schimmelwachstum darstellt. Da im verwendeten Modell zur Schimmelbildung jedoch auch die Temperatur einbezogen wird, können die ermittelten Werte für das maximale Schimmelwachstum sich trotz beinahe identischer relativer Luftfeuchten um einige Pro-

zentpunkte unterscheiden. Die Konstruktion mit 8 cm CaSi könnte bei den angenommenen Eingangswerten (Wasseraufnahme, Westausrichtung) nicht ausgeführt werden, da ein maximal auftretendes Schimmelpotential von 100% besteht. Dies kann sowohl durch eine Simulation mit dem Jahr 1987 als auch durch eine langjährige Simulation ersehen werden.

**Tab. 21:** Variation Dämmstärke

	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Schimmelpot. Mwk Mitte [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>3 cm CaSi</b>				
Max. 1987	14,15	81,50	46,65	74,29
Max. 30 Jahre	15,58	81,30	51,43	74,97
<b>5 cm CaSi</b>				
Max. 1987	16,22	84,23	75,13	80,29
Max. 30 Jahre	16,34	83,38	72,04	81,25
<b>8 cm CaSi</b>				
Max. 1987	19,07	86,75	100,00	86,29
Max. 30 Jahre	18,13	85,51	100,00	85,78

b) Variation Mauerwerksstärke

Nachfolgend wurde die Konstruktion mit 5cm CaSi-Platten bei Variation der Mauerwerkstärke untersucht (siehe Tab. 22). Während das Konstruktionsverhalten bei 24 cm Mauerwerk tendenziell und insbesondere im Fall des Gesamtwassergehaltes zu positiv wiedergegeben wird, befinden sich sämtliche anderen Werte in einer passenden Größenordnung bzw. liegen auf der sicheren Seite. Die ermittelte Größenordnung des Schimmelpotentials ist ebenfalls richtig. Entsprechend der vorliegenden Berechnungen kann die Konstruktion mit einer Mauerwerkstärke von 24 cm nicht ausgeführt werden, da bei den gegebenen Bedingungen ein Schimmelpotential von 100% erhalten wird.

**Tab. 22:** Variation Mauerwerksstärke

Mauerwerk	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Schimmelpot. Mwk Mitte [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>24 cm Mwk</b>				
Max. 1987	10,99	86,44	100,00	88,11
Max. 30 Jahre	13,37	86,98	100,00	88,56
<b>44 cm Mwk</b>				
Max. 1987	16,22	84,23	75,13	80,29
Max. 30 Jahre	16,34	83,38	72,04	81,25
<b>64 cm Mwk</b>				
Max. 1987	20,99	81,73	48,73	74,00
Max. 30 Jahre	20,11	80,68	44,89	74,77

## c) Variation Innenraumklima

Um die Eignung des ermittelten Jahres 1987 bei variiertem Innenraumklima zu überprüfen, wurde die Luftfeuchtigkeit im Innenraum angehoben. Während die Konstruktion (44 cm Mauerwerk, 5 cm CaSi-Platten) bislang durch einen sinusförmigen Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte zwischen 40 und 60 % belastet wurde, sollen nun auch Fälle mit 50 bis 70 sowie 60 bis 80 % relativer Luftfeuchte untersucht werden (siehe Tab. 23). Der Temperaturverlauf wird beibehalten und bewegt sich weiterhin zwischen 22 und 26°C.

Tab. 23: Variation Innenraumklima

Relative LF Innenraum	$w_{\text{ges}}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Schimmelpot. Mwk Mitte [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>40 – 60 %</b>				
Max. 1987	16,22	84,23	75,13	80,29
Max. 30 Jahre	16,34	83,38	72,04	81,25
<b>50 – 70 %</b>				
Max. 1987	20,49	89,66	100,00	91,46
Max. 30 Jahre	19,69	88,78	100,00	91,06
<b>60 – 80 %</b>				
Max. 1987	28,30	93,22	100,00	98,17
Max. 30 Jahre	27,96	93,78	100,00	98,10

Es zeigt sich, dass auch bei Steigerung des Niveaus der relativen Luftfeuchte im Innenraum brauchbare Ergebnisse erhalten werden, die sich zumeist auf der sicheren Seite bewegen. Bei den hohen erhaltenen Werten gerade für 60 bis 80% relativer Luftfeuchte ist zu beachten, dass es sich hierbei, sowohl bezüglich des Innen- als auch des Außenklimas (Ausrichtung, Wasseraufnahme) um besonders kritische Randbedingungen handelt.

Die Annahme aus Abschnitt 5.2, dass die Wahl eines Referenzjahres ohne das Einbeziehen von Luftströmungen aus dem Innenraum in die Simulation erfolgen kann, erscheint durch diese Ergebnisse einigermaßen plausibel. Da es durch Luftströmungen zu einer erhöhten Feuchtelast aus dem Innenraum kommt und ein kritischeres Innenklima sich offensichtlich in gleicher Weise auf die Ergebnisse von Langzeit- und Kurzzeitsimulationen auswirkt (siehe Tab. 23), kann davon ausgegangen werden, dass bei gleichem Strömungsweg die Wahl des Referenzjahres durch das Einbeziehen von Luftströmungen nicht beeinflusst wird.

## d) Tram-Detail

Zuletzt soll noch verifiziert werden, dass das erhaltene Jahr 1987 im Falle eines saugenden Außenputzes auch bei der Simulation des Tram-Details geeignet ist.

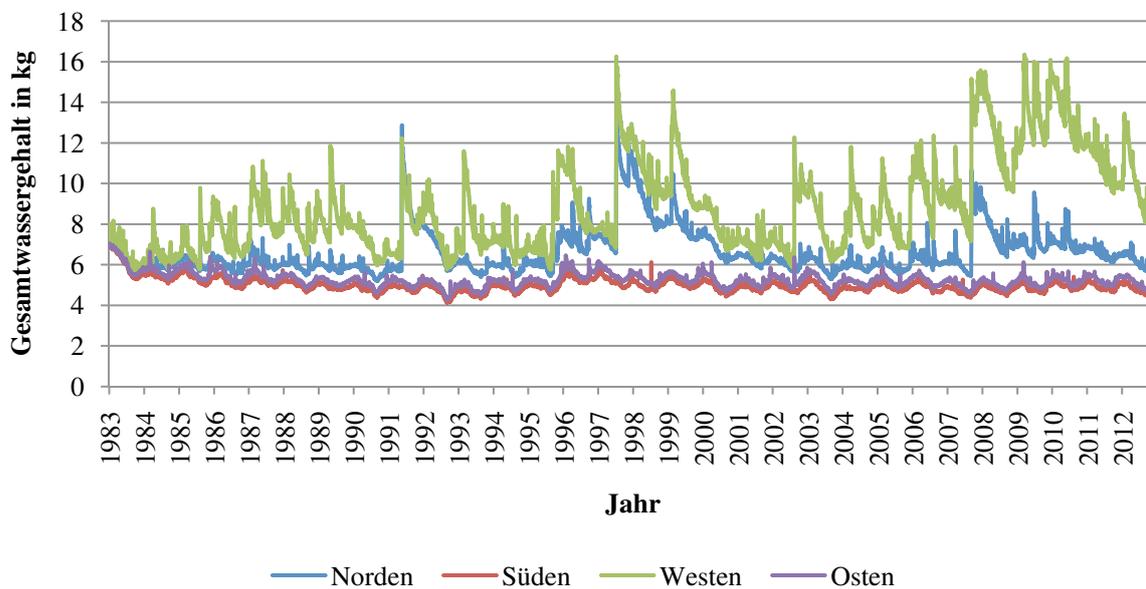
**Tab. 24:** Verifikation Tram-Detail

	$w_{ges}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Rel. LF Tramkopf [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>Tram-Detail</b>				
Max. 1987	35,13	89,22	82,53	80,92
Max. 30 Jahre	34,79	88,07	81,76	80,62

Durch die Ergebnisse in Tab. 24 kann gezeigt werden, dass auch für das komplexere Tram-Detail passende Ergebnisse erzielt werden.

### 6.5.7.3 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass mit der angewandten Methodik ein Referenzjahr für einen wasser-saugenden Putz gefunden werden konnte, mit dem auch bei Variation der Mauerwerksstärke, der Dämmstärke und des Innenraumklimas sehr brauchbare Ergebnisse für Bemessungsaufgaben erzielt werden. Im Gegensatz zum wasserabweisenden Putz ist jedoch die Ausrichtung der betrachteten Fassade für die Ermittlung eines Referenzjahres bedeutsam, da von ihrer Wahl die Schlagregenbelastung abhängt. Ein Vergleich der sich ergebenden Gesamtwassergehalte bei unterschiedlichen Ausrichtungen am Standort Wien für einen Putz mit  $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  zeigt Abb. 50.

**Abb. 50:** Verlauf des Gesamtwassergehaltes bei unterschiedlicher Ausrichtung

## 6.6 Eigenschaften der ermittelten Jahre

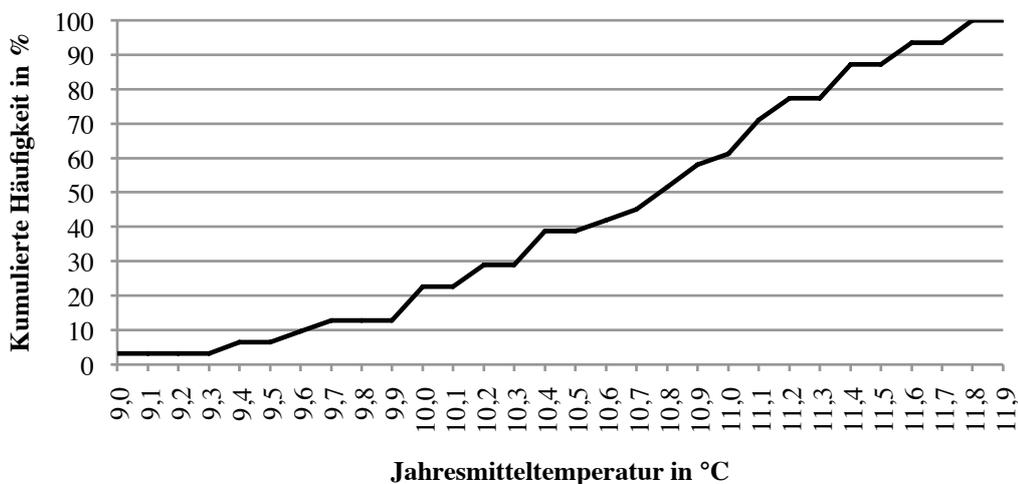
### 6.6.1 Vorbemerkungen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Eignung verschiedener Jahres-Klimadatensätze als Referenzjahr anhand ihrer Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt der untersuchten Konstruktion ermittelt wurde, soll nun in einem nächsten Schritt gezeigt werden, welche Eigenschaften die gewählten Datensätze in Bezug auf die enthaltenen Klimaparameter aufweisen.

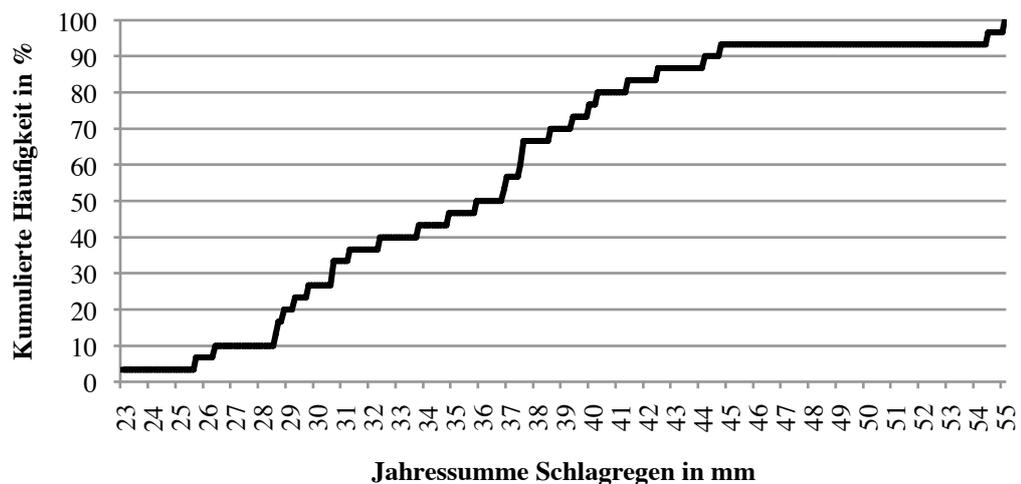
### 6.6.2 Standort Wien, Westausrichtung

Das Jahr 1987 weist im Vergleich mit anderen Jahren eine relativ geringe Jahresmitteltemperatur ( $9,6^{\circ}\text{C}$ , min: 1996 mit  $9,0^{\circ}\text{C}$ ) und eine relativ hohe Schlagregenbelastung (44,4 mm Jahressumme, max: 2007 mit 54,1 mm) auf. In beiden Kategorien stellt 1987 jedoch nicht den kritischsten Wert dar.

Ermittelt man für die Größen Jahresmitteltemperatur und Jahressumme Schlagregen die kumulierten Häufigkeiten für die untersuchten Jahre 1983 bis 2012 (siehe Abb. 51 und Abb. 52), zeigt sich, dass in beiden Fällen genau 10% der Jahre bezüglich der genannten Kenngrößen kritischer sind als das Jahr 1987 ( $9,6^{\circ}\text{C}$ , 44.4 mm). Da in Abschnitt 6.5.4 gezeigt werden konnte, dass die untersuchte innengedämmte Konstruktion bezüglich des Gesamtwassergehaltes und der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk besonders auf die Schlagregenmenge, im Falle des Bestandsinnenputzes jedoch hauptsächlich auf die Außentemperatur reagiert, erscheint es sinnvoll, dass ein Jahr für beide Parameter kritische Werte aufweisen muss, um das gesamte Bauteilverhalten richtig wiederzugeben.



**Abb. 51:** Kumulierte Häufigkeit Jahresmitteltemperatur (Standort Wien, Westausrichtung)



**Abb. 52:** Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagregen (Standort Wien, Westausrichtung)

Nachfolgend soll untersucht werden, ob die ermittelten kumulativen Häufigkeiten auch bei anderen Standorten bzw. Ausrichtungen der Konstruktion zu beobachten sind und ob daraus Empfehlungen für eine vereinfachte Ermittlung eines Referenzjahres abgeleitet werden können. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass ein Referenzjahr, das die Maxima einer langjährigen Simulation aus 30 zusammenhängenden Jahren für alle Bauteilschichten richtig wiedergibt, ein Jahr ist, in dem die Werte für die Jahressumme der Schlagregenbelastung und die Jahresmitteltemperatur jene Werte darstellen, die in maximal 10% der untersuchten Jahre überschritten werden.

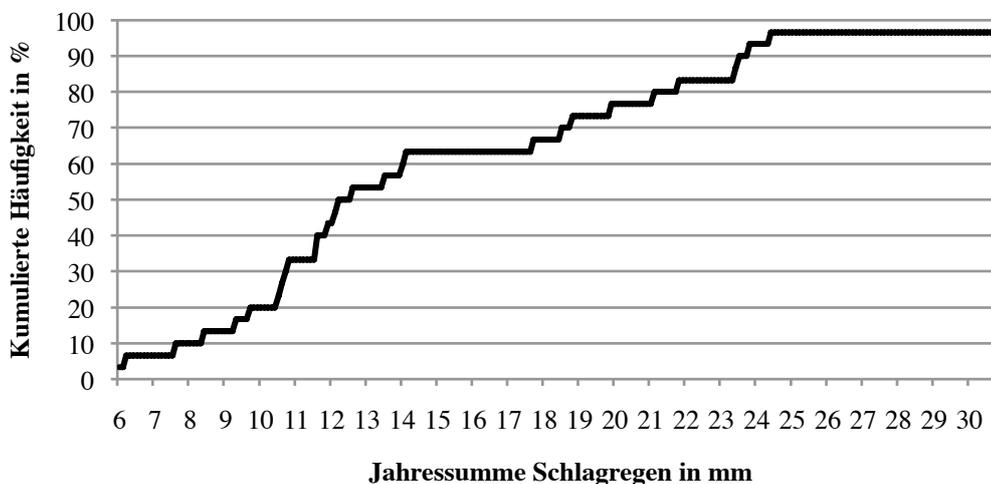
### 6.6.3 Standort Wien, Nord-Ausrichtung

Bei Nordausrichtung sind am Standort Wien deutlich geringere Schlagregenmengen als bei Westausrichtung zu beobachten, gleichzeitig verringert sich im Norden aber auch die auf die Fassade auftreffende solare Strahlung.

Als Referenzjahr wurde durch ein Verfahren gemäß Abschnitt 6.4.5.1 das Jahr 1996 ermittelt. Die relative Luftfeuchte am Bestandsinnenputz wird durch die Simulation mit einem Jahresdatensatz zwischen 1983 und 2012 beinahe durchwegs unterschätzt. Bei Verwendung des Jahres 1996 (9,0°C, 23,2 mm) befinden sich die erhaltenen Werte für das Mauerwerk und den Innenputz auf der sicheren Seite, während der Gesamtwassergehalt unterschätzt wird.

In Abb. 53 ist die ermittelte kumulierte Häufigkeit der Jahressumme des Schlagregens für die Jahre 1983 bis 2012, Standort Wien und Ausrichtung nach Norden dargestellt. Wieder stellen die im Jahr 1996 vorhandenen 23,2 mm Jahressumme Schlagregen jenen Wert dar, der in genau 10% der Jahre überschritten wird. Die kumulierte Häufigkeit der Jahresmitteltemperaturen ist ident mit jener in Abb. 51. Hier stellt die im Jahr 1996 vorhandene Jahresmitteltemperatur von 9,0°C den minimalen Wert aller untersuchten Jahren dar (kumulative Häufigkeit von 3,33%). Würde ein Jahr

entsprechend der aufgestellten Hypothese ermittelt, so wäre dennoch 1996 zu wählen, da nur hier der Vorgabe, dass für beide Parameter nur in 10% der Jahre kritischere Werte erhalten werden, entsprochen werden kann.



**Abb. 53:** Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagregen (Standort Wien, Nordausrichtung)

#### 6.6.4 Standort Klagenfurt, Westausrichtung

Am Standort Klagenfurt sind für alle Ausrichtungen deutlich geringere Schlagregenmengen als in Wien zu beobachten, während das Temperaturniveau niedriger ist. Die Wahl eines Referenzjahres nach den erarbeiteten Kriterien fällt schwer, da etwa kein Jahr gefunden werden kann, bei dem die Maxima der relativen Luftfeuchte im Bestandsinnenputz auf der sicheren Seite dargestellt werden können. Zudem sind die Unterschiede zwischen den infrage kommenden Jahren teilweise sehr gering. Aus diesem Grund wurde jenes Jahr als Referenzjahr gewählt, das die geringste Summe der Abweichungen aufwies (2005, Jahresmitteltemperatur 8,4°C, Jahressumme Schlagregen 8,8 mm).

Beim gewählten Jahr konnte wiederum festgestellt werden, dass sowohl die Schlagregenmenge als auch die vorhandene Jahresmitteltemperatur in jeweils genau 10% der Fälle über- bzw. unterschritten werden. An dieser Stelle muss jedoch noch einmal betont werden, dass im Fall von Klagenfurt die Ergebnisse teilweise sehr nahe beieinander liegen. Das Jahr mit 10% kumulierter Häufigkeit und jenes mit 30% kumulierter Häufigkeit bezüglich der Jahresmitteltemperatur weisen etwa eine Differenz von 0,2 K auf. Dennoch bewährt sich auch in diesem Fall die Wahl eines Jahres entsprechend der zuvor angestellten Hypothese.

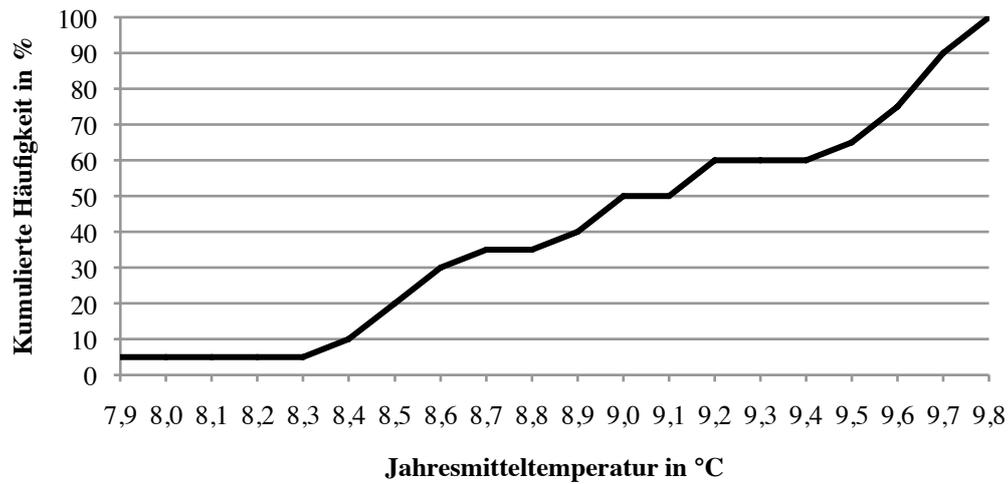


Abb. 54: Kumulierte Häufigkeit Jahresmitteltemperatur (Standort Klagenfurt)

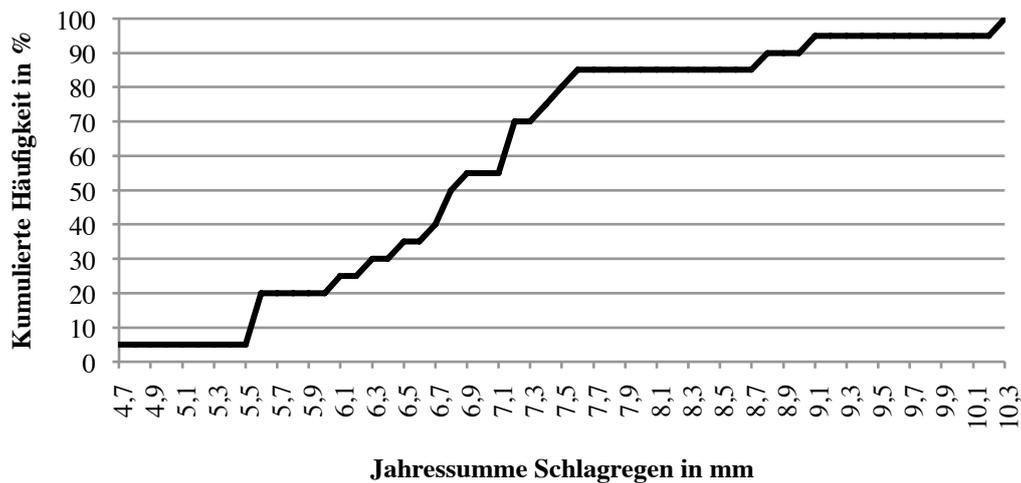


Abb. 55: Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagregen (Standort Klagenfurt, Westausrichtung)

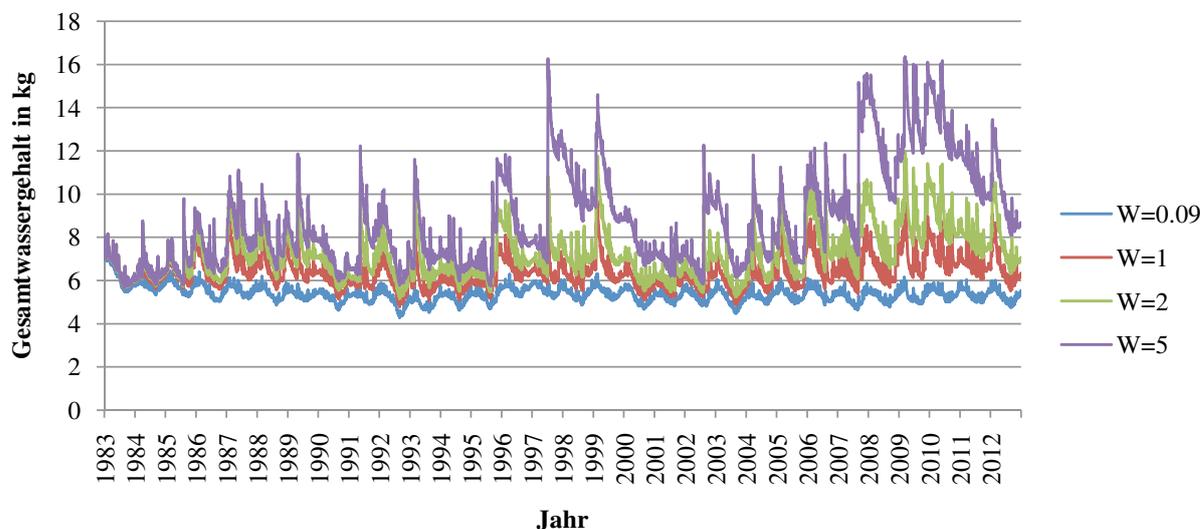
### 6.6.5 Standort Wien, Westausrichtung, Variation $W_w$ -Wert

Nachfolgend soll gezeigt werden, dass das entsprechend der eingangs aufgestellten Hypothese ermittelte Jahr 1987 auch bei einer Variation des  $W_w$ -Wertes geeignet ist, das hygrische Langzeitverhalten eines Bauteils wiederzugeben. Einen Vergleich der erhaltenen Maxima aus einer Simulation mit dem Jahr 1987 und einer Simulation unter Verwendung der Jahre 1983 bis 2012 zeigt Tab. 25 (Konstruktion mit 44 cm Mauerwerk und 8 cm CaSi).

**Tab. 25:** Variation  $W_w$ -Wert

$W_w$	$W_{ges}$ [kg]	Rel. LF Mwk Mitte [%]	Rel. LF Be- standsputz [%]
<b>0,09 kg/m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup></b>			
Max. 1987	7,07	74,38	84,58
Max. 30 Jahre	7,02	73,93	84,94
<b>1 kg/m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup></b>			
Max. 1987	11,20	79,98	85,24
Max. 30 Jahre	10,45	77,75	85,22
<b>2 kg/m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup></b>			
Max. 1987	15,41	84,74	85,89
Max. 30 Jahre	12,93	81,43	85,45
<b>5 kg/m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup></b>			
Max. 1987	19,07	86,75	86,29
Max. 30 Jahre	18,12	85,51	85,78

Es zeigt sich, dass im Falle des wasserabweisenden Putzes das Jahr 1987 beinahe genauso gut geeignet ist wie das Jahr 1985 (siehe Tab. 14). Für einen wasserhemmenden Putz ( $W_w = 1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ) werden ebenfalls mit dem Jahr 1987 brauchbare Werte auf der sicheren Seite für alle betrachteten Auswertungspunkte erhalten. Im Falle eines Außenputzes mit  $W_w = 2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ , der gemäß der Definition in der DIN 4108-3 im Grenzbereich zwischen wasserhemmendem und wassersaugendem Putz einzuordnen ist, werden für den Gesamtwassergehalt und die relative Luftfeuchte im Mauerwerk sehr hohe Maxima erhalten, dennoch werden hier Ergebnisse auf der sicheren Seite erzielt. Für einen  $W_w$ -Wert von  $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  ist das Jahr 1987, wie schon gezeigt wurde, bei geringen positiven Abweichungen sehr gut geeignet. Einen Vergleich der erhaltenen Gesamtwassergehalte für den Standort Wien (Westausrichtung, 5 cm CaSi, 44 cm Mauerwerk) bei variiertem  $W_w$ -Wert zeigt Abb. 56.



**Abb. 56:** Gesamtwassergehalt bei Variation des  $W_w$ -Wertes

### 6.6.6 Schlussfolgerungen

Bei Verwendung jenes Jahres, das sowohl in Bezug auf die Jahresmitteltemperatur als auch die Jahressumme des Schlagregens in  $\leq 10\%$  der untersuchten Jahre kritischer ausfällt, konnten für den Standort Wien und Klagenfurt Ergebnisse erzielt werden, durch die eine sichere Bemessung der vorliegenden Konstruktion möglich ist, ohne auf ein Verfahren gemäß Abschnitt 6.4.5.1 zurückgreifen zu müssen.

Es muss an dieser Stelle jedoch betont werden, dass die angestellte Hypothese noch an weiteren Standorten verifiziert werden müsste, um allgemeingültige Empfehlungen abgeben zu können. Dennoch konnte gezeigt werden, dass ein Jahres-Datensatz, der für die Bemessung einer innenge-dämmten Wandkonstruktion herangezogen werden soll, sowohl bezüglich der Jahresmitteltemperatur als auch des Schlagregenaufkommens im langjährigen Vergleich kritische Werte aufweisen sollte, damit das gesamte Bauteilverhalten und somit das langjährige Versagensrisiko richtig abgebildet wird. In allen untersuchten Fällen handelte es sich dabei jedoch nicht um das im lang-jährigen Vergleich kritischste Jahr.

Die aus den bislang angestellten Untersuchungen abgeleiteten Empfehlungen decken sich mit jenen in ÖNORM EN 15026 [ONO07] zur Wahl eines Feuchtereferenzjahres. So soll bei „der Untersuchung von Problemen bei niedrigen Temperaturen“ jenes Jahr für eine hygrothermische Simulation herangezogen werden, „in dem die mittlere Temperatur am dichtesten am 10. Perzentilwert der Verteilung der Jahresmitteltemperaturen aller verfügbaren Daten“ liegt. Bei der Untersuchung von „Problemen, die mit dem Eindringen von Regen zusammenhängen, sollte das Jahr mit dem 90. Perzentilwert des Niederschlags angewendet“ werden. In [ONO07] wird jedoch davon ausgegangen, dass bei Wahl der entsprechenden Jahre eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10% akzeptiert wird. In der vorliegenden Arbeit konnte hingegen gezeigt werden, dass durch die Wahl eines Jahres gemäß den Empfehlungen der Norm, zumindest im Fall der bislang untersuchten Standorte, das Versagensrisiko realistisch abgebildet wird.

## 7 Zusammenfassung

Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer innengedämmten Außenwand werden über eine hygrothermische Simulation die maximal auftretenden Feuchtegehalte in der Konstruktion ermittelt. Diese sind besonders von den außenklimatischen Verhältnissen abhängig, weshalb die Wahl des der Simulation zugrundeliegenden Klimadatensatzes wesentlichen Einfluss auf die erhaltenen Ergebnisse hat.

Eine Langzeit-Simulation auf Grundlage zusammenhängender Klimadaten über mehrere Jahrzehnte ist grundsätzlich am besten geeignet, die auftretenden Feuchtegehalte realistisch abzubilden, da damit automatisch das ganze Spektrum an zu erwartenden klimatischen Belastungsszenarien in die Berechnung eingeht. Einzelne, in Bezug auf die entstehende Feuchtebelastung besonders kritische Jahre werden dabei im Kontext der vorangehenden und nachfolgenden Jahre betrachtet. Sie sind in ihren Auswirkungen somit weniger kritisch, als würde die Konstruktion periodisch mit einem besonders kritischen Jahr belastet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit standen umfangreiche Aufzeichnungen aller für eine hygrothermische Simulation benötigten Außenklimaparameter in stündlicher Auflösung für zwei repräsentative österreichische Standorte (Wien und Klagenfurt) zur Verfügung. Dadurch war es möglich, die Ergebnisse von Langzeitsimulationen über den Zeitraum mehrerer Jahrzehnte mit den Ergebnissen von Simulationen auf Grundlage von Jahres-Klimadatensätzen systematisch zu vergleichen und daraus Schlüsse für eine sinnvolle Wahl eines Referenz-Klimadatensatzes zu ziehen. Es wurde der Ansatz gewählt, dass jenes Jahr als Referenzjahr geeignet ist, durch das in einer Simulation die selben oder etwas höhere Feuchtegehalte (relative Luftfeuchte) an bestimmten Auswertungspunkten der Konstruktion erhalten werden wie durch eine Simulation über den Zeitraum von 30 Jahren. Dieser Zeitraum scheint geeignet, das Langzeit-Versagensrisiko der Konstruktion zu bestimmen, da damit auch Klimaschwankungen im Laufe der Jahrzehnte berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen wurden nach der Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade gegliedert, da bei einer hydrophobierten bzw. wasserabweisenden Fassade die in einem Jahres-Datensatz auftretende Schlagregenbelastung eine geringere Rolle spielt als bei einer wassersaugenden Fassade. Somit werden für die beiden genannten Fälle Jahre mit verschiedenen Eigenschaften gesucht.

Im Falle eines wasserabweisenden Außenputzes zeigte sich, dass eine eindeutige Korrelation zwischen der Jahresmitteltemperatur eines Klimadatensatzes und den auftretenden maximalen Feuchtegehalten in der Konstruktion besteht. In den angestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung eines für die Konstruktion mittelmäßig kritischen Jahres bei einer Abminderung der Temperatur um etwa 2 K unter Beibehaltung sämtlicher anderer Klimapa-

parameter realitätsnahe Ergebnisse erhalten werden. Testreferenzjahre (TRY) sind hingegen nicht immer geeignet, das hygrothermische Langzeit-Verhalten der Konstruktion wiederzugeben. Für die untersuchten Standorte Wien und Klagenfurt konnte gezeigt werden, dass ein mittleres Jahr auch nach der Jahresmitteltemperatur bestimmt werden kann. Weiters wurde ein Schema zur Ermittlung eines Referenzjahres angegeben. Mit dem damit ermittelten Klimadatensatz kann auch bei Variation von Konstruktionsdimensionen (Mauerwerk, Dämmung), der Ausrichtung oder des Innenraumklimas das Langzeitverhalten sehr gut abgebildet werden.

Ist der Außenputz wassersaugend, kommt der Schlagregenbelastung eine höhere Bedeutung zu. Es ist deshalb besonders auf eine sorgfältige Ermittlung der Wasseraufnahmefähigkeit der betrachteten Fassade, eine richtige Modellierung sowie eine möglichst genaue Ermittlung der tatsächlich auftretenden Schlagregenbelastung zu achten. Bezüglich des Gesamtwassergehaltes sowie der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk besteht eine deutliche Korrelation zur Jahressumme des Schlagregens eines Klimadatensatzes, während die Außentemperatur kaum von Bedeutung für das Ergebnis ist. Im Bereich des Bestandsinnenputzes ist jedoch eine Korrelation der relativen Luftfeuchte zur Außentemperatur zu beobachten, während die Schlagregenbelastung das Ergebnis kaum beeinflusst. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist es im Falle eines wassersaugenden Putzes grundsätzlich nicht möglich, das Bauteilverhalten unter Verwendung eines mittleren Jahres oder eines TRY sowie Abminderung der Temperatur bzw. Erhöhung der Schlagregenbelastung durchgehend richtig abzubilden. Bei der Ermittlung eines Referenzjahres anhand des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzeptes zeigte sich, dass ein Klimadatensatz sowohl ein kritisches Maß an Schlagregenbelastung als auch eine relativ geringe Jahresmitteltemperatur aufweisen muss, um die Langzeit-Maxima der Feuchtegehalte realistisch wiederzugeben.

Eine Analyse der erhaltenen Referenzjahre ergab, dass ein Jahr, welches das Langzeit-Verhalten der innengedämmten Konstruktion realistisch wiedergibt, Werte für die Jahresmitteltemperatur sowie die Jahressumme des Schlagregens aufweisen muss, die in lediglich  $\leq 10\%$  der untersuchten Jahre kritischer ausfallen.

Es ist zu betonen, dass die im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse und Erkenntnisse noch an weiteren Standorten verifiziert werden müssen, damit allgemeingültige Empfehlungen abgegeben werden können. Dennoch konnten einige grundlegende Erkenntnisse bezüglich der Wahl eines Referenz-Klimadatensatzes für die Bemessung eines Innendämmsystems erhalten werden.

## 8 Anhang

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beispiel einer Feuchtespeicherfunktion [KRU96] .....	4
Abb. 2: Feuchtetransport-Prozesse in porösen Baustoffen [HOL01].....	5
Abb. 3: Simulation mit HAM4D_VIE .....	6
Abb. 4: Eintrag Materialdatenbank .....	7
Abb. 5: Beispiel Klimadatei .....	8
Abb. 6: Veränderung des thermischen Verhaltens durch Applikation einer Innendämmung [KIE92] .	11
Abb. 7: Tauwasseranfall an der Grenzfläche zur Bestandskonstruktion [PLA13] .....	11
Abb. 8: Dampfbremsende Ausführung einer Innendämmung [PLA13] .....	12
Abb. 9: Veränderung des Trocknungsverhaltens durch eine Innendämmung mit Dampfbremse [KÜN02].....	13
Abb. 10: Prinzip der kapillaraktiven Innendämmung [PLA13] .....	13
Abb. 11: Klimatische Einflussfaktoren für die Bemessung einer kapillaraktiven Innendämmung .....	14
Abb. 12: Beispiel eines eingeschwungenen Zustands nach etwa 7 Jahren .....	16
Abb. 13: Vergleich Jahresmitteltemperatur Wien/Klagenfurt.....	17
Abb. 14: Vergleich von Messwerten und Berechnungen mit Stunden- und Tagesmittelwerten [KÜN94a] .....	19
Abb. 15: Häufigkeit Windrichtung Wien .....	23
Abb. 16: Häufigkeit Windrichtung Klagenfurt .....	23
Abb. 17: Errechnetes Schlagregenaufkommen je Ausrichtung (Standort Wien).....	24
Abb. 18: Gewählter Verlauf der Innenklima-Parameter .....	25
Abb. 19: Untersuchtetes Balkenkopf-Detail .....	28
Abb. 20: Wasseraufnahme bei unterschiedlicher Gitterstruktur .....	29
Abb. 21: Diskretisierung des betrachteten Details in HAM4D_VIE .....	31
Abb. 22: Relative Luftfeuchte in der CaSi-Platte bei verschiedenen Zellbreiten .....	32
Abb. 23: Versuchsanordnung Wasseraufnahmekoeffizient [ONO03] .....	32
Abb. 24: Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten .....	33
Abb. 25: Relative Luftfeuchte am Tramkopf (Wien, 1983 – 2012).....	41
Abb. 26: Vergleich relative Luftfeuchte am Tramkopf bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen ...	42

---

Abb. 27: Differenzen der Simulationsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Anfangsbedingungen ....	42
Abb. 28: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Bereich des Tram-Auflagers .....	44
Abb. 29: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Bestandsmauerwerk .....	45
Abb. 30: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Auswertungspunkten im Innendämmungssystem ...	45
Abb. 31: Gewählte Auswertungspunkte .....	46
Abb. 32: Schema zur Ermittlung der notwendigen Temperaturabminderung .....	48
Abb. 33: Simulationen mit TRY $-\Delta T$ .....	48
Abb. 34: Vergleich TRY -1K und langjähriger Verlauf 1983 - 2012 .....	49
Abb. 35: 1D - Wandquerschnitt.....	51
Abb. 36: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. Gesamtwassergehalt .....	52
Abb. 37: Korrelation Jahressumme Schlagregen Westen – Max. Gesamtwassergehalt .....	53
Abb. 38: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk.....	53
Abb. 39: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Bestandsputz.....	54
Abb. 40: Ermittlung eines mittleren Datensatzes .....	55
Abb. 41: Ermittlung eines Referenzjahres.....	59
Abb. 42: Wegspritzendes Wasser.....	63
Abb. 43: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. Gesamtwassergehalt .....	64
Abb. 44: Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. Gesamtwassergehalt .....	64
Abb. 45: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk.....	65
Abb. 46: Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. relative Luftfeuchte Mauerwerk .....	65
Abb. 47: Korrelation Max. relative Luftfeuchte – Max. Schimmelpotential (Mwk) .....	66
Abb. 48: Korrelation Jahresmitteltemperatur – Max. relative Luftfeuchte Bestandsputz.....	67
Abb. 49: Korrelation Jahressumme Schlagregen – Max. relative Luftfeuchte Bestandsputz .....	67
Abb. 50: Verlauf des Gesamtwassergehaltes bei unterschiedlicher Ausrichtung .....	75
Abb. 51: Kumulierte Häufigkeit Jahresmitteltemperatur (Standort Wien, Westausrichtung) .....	76
Abb. 52: Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagregen (Standort Wien, Westausrichtung).....	77
Abb. 53: Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagregen (Standort Wien, Nordausrichtung).....	78
Abb. 54: Kumulierte Häufigkeit Jahresmitteltemperatur (Standort Klagenfurt).....	79
Abb. 55: Kumulierte Häufigkeit Jahressumme Schlagragen (Standort Klagenfurt, Westausrichtung) .	79
Abb. 56: Gesamtwassergehalt bei Variation des $W_w$ -Wertes .....	80

## 8.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Gewählte Parameter der Klimadateien.....	26
Tab. 2: Übliche $W_w$ -Werte bei Außenputzen an Gründerzeithäusern (eigene Darst. nach [BED00]) ...	34
Tab. 3: Erforderliche $K_s$ -Werte .....	35
Tab. 4: Anfangs-Feuchtegehalte Referenzkonstruktion .....	36
Tab. 5: Ergebnisse Simulationen 5cm CaSi .....	49
Tab. 6: Ergebnisse TRY- $\Delta T$ Wien .....	50
Tab. 7: Ergebnisse TRY- $\Delta T$ Klagenfurt.....	50
Tab. 8: Variation Mauerwerks-Stärke .....	51
Tab. 9: Ermittlung eines mittleres Datensatzes für Wien .....	56
Tab. 10: Ergebnisse 1997 - $\Delta T$ .....	56
Tab. 11: Verifizierung des mittleren Jahres .....	57
Tab. 12: Ergebnisse Wien 2001 - $\Delta T$ .....	57
Tab. 13: Ergebnisse Klagenfurt 1998 - $\Delta T$ .....	58
Tab. 14: Ermittlung eines Referenzjahres für Wien .....	60
Tab. 15: Verifizierung 1985 .....	61
Tab. 16: Ergebnisse TRY - $\Delta T$ , Regen $\cdot 0,7$ .....	68
Tab. 17: Ergebnisse TRY, Regen $\cdot 0,7 \cdot x$ .....	68
Tab. 18: Ermittlung eines mittleres Datensatzes für Wien, $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ .....	70
Tab. 19: Ergebnisse Mittleres Jahr - $\Delta T$ , $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ .....	71
Tab. 20: Ermittlung eines Referenzjahres für Wien, $W_w = 5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ .....	72
Tab. 21: Variation Dämmstärke .....	73
Tab. 22: Variation Mauerwerksstärke .....	73
Tab. 23: Variation Innenraumklima .....	74
Tab. 24: Verifikation Tram-Detail .....	75
Tab. 25: Variation $W_w$ -Wert .....	80

## 9 Literatur

- [BED00] Bednar, Thomas: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden – Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation – Technische Universität Wien – Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Wien 2000
- [BED13] Bednar, Thomas; Riccabona Christof: Baukonstruktionslehre 4 – Bauphysik. Manz Verlag Schulbuch GmbH, Wien 2013
- [DIN01] DIN 4108-3. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klima-bedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung, Berlin 2001
- [HOL01] Holm, Andreas: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation – Uni-versität Stuttgart – Lehrstuhl für Bauphysik, 2001
- [HUM11] Humer, Catrin: Einfluss von Schlagregen auf das Risiko des Konstruktions-versagens und der Schimmelpilzbildung an Oberflächen. Diplomarbeit – Techni-sche Universität Wien – Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, Wien 2011
- [IBP13] Fraunhofer IBP: Wetterdaten für Auslegungszwecke.  
<http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/wetterdaten.html>, Stand: 07.12.2013
- [IBP13a] Fraunhofer IBP: Masea – Materialdatensammlung für die energetische Altbausa-nierung. <http://www.masea-ensan.de>, Stand: 07.12.2013
- [KIE92] Kießl, Kurt: Wärmeschutzmaßnahmen durch Innendämmung – Beurteilung und Anwendungsgrenzen aus feuchtetechnischer Sicht, In: wksb 31/1992
- [KRE10] Kreč, Klaus: Halbsynthetische Klimadaten für Gebäudestandorte in Österreich – Kurzbericht. Schönberg am Kamp 2010
- [KRU96] Krus, Martin: Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion. IBP-Mitteilung 292, Holzkirchen 1996
- [KÜN94] Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwer-ten. Dissertation – Universität Stuttgart – Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik, 1994
- [KÜN94a] Künzel, Hartwig: Regendaten für die Berechnung des Feuchtetransports, IBP-Mitteilung 265, Holzkirchen 1994
- [KÜN99] Künzel, Hartwig: Auswahl und Aufbereitung von meteorologischen Datensätzen für Feuchtetransportberechnungen. Vortrag 10. Bauklimatisches Symposium TU Dresden, Dresden 1999

- [KÜN00] Künzel, Hartwig; Schmidt, Thomas: Wetterdaten für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen, IBP-Mitteilung 364, Holzkirchen 2000
- [KÜN02] Künzel, Hartwig: Probleme mit Innendämmungen bei der Altbausanierung – Lösungsmöglichkeiten. Beitrag zu den 10. Wiener Sanierungstagen des ofi-Instituts, Wien 2002
- [OIB11] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 3 – Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz. Ausgabe: Oktober 2011, Wien 2011
- [ONO01] ÖNORM EN ISO 13788. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2001). Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2001
- [ONO03] ÖNORM EN ISO 15148. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002). Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2003
- [ONO07] ÖNORM EN 15026. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2007
- [ONO08] ÖNORM EN ISO 13790: Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008). Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2008
- [ONO09] ÖNORM EN ISO 15927-3: Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 3: Berechnung des Schlagregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten (ISO 15927-3:2009). Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2009
- [PLA13] Plagge, Rudolf: „Glaser war gestern“ – Neue Denkweisen und Methoden der Bauphysik bei kapillaraktiven Innendämmsystemen.  
  
[http://www.innendaemmung.de/Neumarkt/Plagge\\_Neue\\_Denkweisen\\_Innendaemmung.pdf](http://www.innendaemmung.de/Neumarkt/Plagge_Neue_Denkweisen_Innendaemmung.pdf), Stand: 07.12.2013
- [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
- [RIC98] Riccabona, Christof: Baukonstruktionslehre 1 – Rohbauarbeiten. Manz Verlag Schulbuch, Wien 1998
- [SAN96] Sanders, C.: Environmental Conditions. IEA Annex 24 – Part 2, K.U. Leuven 1996

- [VII97] Viitanen, Hannu A.: Modelling the Time Factor in the Development of Brown Rot Decay in Pine and Spruce Sapwood – The Effect of Critical Humidity and Temperature Conditions. In: *Holzforschung* 51 (1997), S. 99 – 106
- [WEG10] Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen – Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten, Diplomarbeit – Technische Universität Wien – Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, Wien 2010
- [WEG12] Wegerer, Paul; Neusser, Maximilian; Bednar, Thomas: Auswirkungen der Luft(un)dichtheit auf die Feuchtebelastung von Konstruktionen mit Innendämmsystemen. Beitrag zum 7<sup>th</sup> International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness in Practice, Stuttgart 2012
- [WTA01] Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege: Merkblatt 6-2-01/D – Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2001
- [WTA09] Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege: Merkblatt 6-4-09/D – Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2009
- [WTA12] Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege: Merkblatt E 6-5-12/D. Entwurf – Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2012
- [ZEL12] Zelger, Thomas; Waltjen, Tobias et. al.: PH Sanierungsbauteilkatalog: Zweite Ausbaustufe PH-SanPlus. Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 48/2012, Wien 2012