

Ralf Kilian

## Klimastabilität historischer Gebäude

Bewertung hygrothermischer Simulationen  
im Kontext der Präventiven Konservierung

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 15

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser



**Universität Stuttgart**

Lehrstuhl für Bauphysik



Technische Universität München

Lehrstuhl für Bauphysik

**FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK**

**BAND 15**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Ralf Kilian

## **Klimastabilität historischer Gebäude**

**Bewertung hygrothermischer Simulationen  
im Kontext der Präventiven Konservierung**



**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-00  
Telefax 07 11 9 70-33 95  
E-Mail [info@ibp.fraunhofer.de](mailto:info@ibp.fraunhofer.de)  
URL [www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de)

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 1869-5124

ISBN: 978-3-8396-0615-5

**D 93**

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2013

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

# **Klimastabilität historischer Gebäude**

Bewertung hygrothermischer Simulationen  
im Kontext der Präventiven Konservierung

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität  
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Ralf Kilian**  
aus München

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer
1. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Tor Broström
2. Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Mai 2013

Lehrstuhl für Bauphysik

2013



„Kunst ist schön, macht aber viel Arbeit“

*Karl Valentin, Münchener Kabarettist und Komödiant*

„So I'll remove the cause, but not the symptom“

*Dr. Frank N. Furter, 1973*



---

## Vorwort

Diese interdisziplinäre Dissertation basiert auf Ergebnissen, die in dem von mir konzipierten und geleiteten Forschungsvorhaben „Klimastabilität historischer Gebäude“ am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in den Jahren 2007 bis 2011 erarbeitet wurden. Mit meinem Hintergrund als Diplom-Restaurator liegt einer meiner Schwerpunkte in dieser ingenieurwissenschaftlichen Arbeit in der Vermittlung zwischen beiden Denkweisen und beiden Terminologien.

Dank geht an die Förderer des Projektes „Klimastabilität historischer Gebäude - Prävention von umweltbedingten Schäden an Kunstwerken und wertvoller Ausstattung gebauten Kulturerbes durch Simulation und Evaluation raumklimatischer Veränderungen infolge interner und externer Einflüsse“, namentlich das Bayerische Staatsministerium der Finanzen, die Bayerische Sparkassenstiftung sowie die Firma Krah&Grote Messtechnik aus Otterfing sowie das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen.

Die Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, insbesondere die Restaurierungsabteilung, Dr. Katrin Janis, Tina Naumovic und Klaus Häfner wie auch die Bauabteilung Herrn Bosch und Herrn Oehme sowie die Schlossverwaltung von Linderhof unterstützte die Untersuchungen an den bayerischen Königsschlössern. Dem Botanischen Garten München, Dr. Andreas Gröger und Prof. Dr. Annette Menzel, Fachgebiet für Ökoklimatologie der Technische Universität München danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Realisierung der Wetterstation im Alpengarten am Schachen.

An der Gotland University, Visby, danke ich Prof. Dr. Tor Broström, Dr. Maria Brunskog und allen anderen Kollegen für die Gastfreundschaft und die guten Diskussionen während meines Forschungsaufenthalts im Sommer 2011, sowie Nadine Huth und Henry Ewert, vom Kollektiv für Konstkonservering für die Schilderung des Falls in Lye, Prof. Dr. Ullrich Wellisch von der Hochschule Rosenheim und Jonathan Ashley-Smith für die anwendungsorientierten Hinweise zur statistischen Bewertung. Dr. Johanna Leissner, der Koordinatorin des EU Projekts „Climate for Culture“, danke ich für ihre persönliche Unterstützung.

Im Rahmen der Dissertation liefen die von mir initiierten und betreuten Diplom- und Masterarbeiten von Kristina Holl und Barbara Wehle zum Königshaus am Schachen sowie von Stefan Bichlmair zu Schloss Linderhof, die als Datengrundlage in diese Arbeit mit einfließen.

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Klaus Sedlbauer und meinen Kollegen aus Holzkirchen Florian Antretter, Dr. Gunnar Grün, Prof. Dr. Jan Radon, Prof. Dr. Andreas Holm und insbesondere Dr. Martin Krus, Kristina Holl, Stefan Bichlmair und Sarah Kosmann sowie Melanie Eibl danke ich für ihre inhaltliche und moralische Unterstützung und die wertvollen und zahlreichen Diskussionen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau und meiner Familie, die mir in dieser Zeit immer zur Seite standen.



---

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>9</b>
<b>Summary</b>	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation	18
1.2 Zielsetzung	19
1.3 Methodische Vorgehensweise	20
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>24</b>
2.1 Präventive Konservierung und Raumklima in historischen Gebäuden und Museen	24
2.1.1 Klimabedingte Schäden in historischen Räumen	24
2.1.2 Schadensprozesse und Risiken	29
2.1.3 Die Klimadiskussion	32
2.2 Hygrothermische Gebäudesimulation	45
2.2.1 Ablauf	46
2.2.2 Randbedingungen	48
2.2.3 Ermittlung von Kennwerten historischer Materialien	48
2.2.4 Bauphysikalische Grundlagen	49
2.2.5 Funktionsweise des Raummodells	57
2.2.6 Bestehende Bewertungskriterien für die Güte hygrothermischer Simulationen	59
2.3 Statistische Methoden	59
2.3.1 Verteilung von Datensätzen	60

2.3.2	Vergleich von Datensätzen	64
<b>3</b>	<b>Hygrothermische Simulation historischer Gebäude</b>	<b>69</b>
3.1	Vorgehensweise für historische Gebäude	69
3.1.1	Definition der Ziele der Simulation	70
3.1.2	Ermittlung der relevanten Schadensprozesse	71
3.1.3	Festlegung und Ermittlung der relevanten Eingangsgrößen	71
3.1.4	Durchführung, Bewertung und Kalibrierung der Simulation mittels Sensitivitätsanalysen und Validierung	76
3.1.5	Variantenrechnungen	77
3.1.6	Dokumentation des Modells und der Varianten	77
3.2	Grenzen und Unsicherheiten	77
3.2.1	Eingabeparameter	77
3.2.2	Wetterdaten	78
3.2.3	Klimamessung	78
3.2.4	Zeitliche Nutzungsprofile	79
3.2.5	Bedeutung für die Simulation historischer Gebäude	79
<b>4</b>	<b>Bewertungskriterien</b>	<b>80</b>
4.1	Anforderungen	81
4.2	Bewertungskriterien im Kontext der Präventiven Konservierung	82
4.2.1	Kriterien zur Bewertung der Güte der Abbildung der Realität	83
4.2.2	Bewertung der Abbildung der relevanten Schadensfunktionen	86
<b>5</b>	<b>Individuelle Festlegung von Bewertungskriterien</b>	<b>89</b>
5.1	Auswahl der statistischen Kenngrößen	89
5.2	Festlegung von Kriterien zur Bewertung der Güte der Abbildung der Realität	90
5.3	Festlegung von Kriterien zur Bewertung der Abbildung von Schadensfunktionen	93

---

<b>6</b>	<b>Ableitung von individuellen Bewertungskriterien an Fallstudien</b>	<b>98</b>
6.1	Königshaus auf dem Schachen	98
6.1.1	Hintergrund und Baugeschichte	100
6.1.2	Grundlagenermittlung	101
6.1.3	Konservatorische Untersuchungen	103
6.1.4	Klima	107
6.1.5	Hygrothermische Gebäudesimulation	110
6.1.6	Statistische Bewertung	113
6.1.7	Test auf Schadensfunktionen	115
6.1.8	Zusammenfassung	118
6.2	Schloss Linderhof	120
6.2.1	Hintergrund und Baugeschichte	120
6.2.2	Grundlagenermittlung	121
6.2.3	Klima	124
6.2.4	Hygrothermische Gebäudesimulation	129
6.2.5	Kalibrierung des Modells	131
6.2.6	Statistische Bewertung	132
6.2.7	Test auf Schadensfunktionen	135
6.2.8	Variantenrechnung mit dem Simulationsmodell	137
6.2.9	Maßnahmeempfehlungen und Zusammenfassung	139
6.3	Torhalle Lorsch	141
6.3.1	Baugeschichte	142
6.3.2	Grundlagenermittlung	144
6.3.3	Klima	144
6.3.4	Hygrothermische Gebäudesimulation	145
6.3.5	Statistische Bewertung	150
6.3.6	Test auf Schadensfunktionen	153
6.3.7	Variantenberechnung	156
6.3.8	Zusammenfassung	157

<b>7</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Klimastabilität</b>	<b>159</b>
7.1	Feuchtepufferung	159
7.2	Luftwechsel	161
7.3	Außenklima, Besucher und andere Einflüsse	165
<b>8</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>Beurteilung der Ergebnisse</b>	<b>172</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>175</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick</b>	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>
	<b>Anhang A Erläuterung zu den Statistik Datenblättern</b>	<b>195</b>
	<b>Anhang B Statistik Schachen</b>	<b>199</b>
	<b>Anhang C Statistik Linderhof</b>	<b>209</b>
	<b>Anhang D Statistik Lorsch</b>	<b>231</b>
	<b>Anhang E Hygrothermische Kennwerte historischer Materialien</b>	<b>234</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>238</b>

---

# Abkürzungsverzeichnis

BSV	Bayerische Schlösserverwaltung
CFD	Computational Fluid Dynamics, Strömungssimulation
TGA	Technische Gebäudeausrüstung, Haustechnik
WUFI®	Wärme Und Feuchte Instationär, hygrothermische Simulationssoftware, Fraunhofer-Institut für Bauphysik

## Lateinische Zeichen

A [-]	Frequenzfaktor
$A_j$ [m <sup>2</sup> ]	Raumumschließungsflächen
$c_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Absolute Feuchte der Außenluft
$c_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Absolute Feuchte der Raumluft
$c$ [J/kgK]	Spezifische Wärmekapazität der Luft
DRF	Temperaturabhängige Deliqueszenzfeuchte eines Salzes
$E_A$ [J/mol]	Aktivierungsenergie
$\dot{g}_{w,j}^*$ [kg/(s·m <sup>2</sup> )]	Feuchtestrom von der Wandinnenoberfläche zur Raumluft
$k$ [-]	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
$n$ [h <sup>-1</sup> ]	Luftwechsel
$N$ [-]	Anzahl
$p$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
$Q_v$	Vorhersagequote
$\dot{Q}_{Sol}$ [W]	Wärmestrom durch kurzwellige Sonneneinstrahlung
$\dot{Q}_{i wQ}$ [W]	Wärmestrom aus internen Wärmequellen

$\dot{Q}_{RLT}$ [W]	Wärmestrom in Folge raumluftechnische Anlagen (RLT)
r.F., $\varphi$ [%]	Relative Luftfeuchte
r	Korrelationskoeffizient
$r_{xy}$	Korrelationskoeffizient nach Bravis - Pearson
$r_{sp}$	Korrelationskoeffizient nach Spearman
R [J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]	Allgemeine Gaskonstante
$s_d$ [m]	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
s [-]	Standardabweichung
t [s]	Zeit
T, $\vartheta$ [°C]	Temperatur
V [m <sup>3</sup> ]	Raumvolumen
$\dot{W}_{IPQ}$ [kg/h]	Feuchteproduktion im Raum
$\dot{W}_{RLT}$ [kg/h]	Feuchtestrom durch raumluftechnische Anlagen
$x_{Sim}$	Wert aus Risikoabschätzung nach der Simulation
$x_{MW}$	Wert aus Risikoabschätzung nach der Messung

### Griechische Zeichen

$\alpha$ [-]	Signifikanzlevel bei statistischen Tests
$\alpha_j$ [W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\mu$ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Raumluf
$\vartheta_a$ [°C]	Außenlufttemperatur
$\vartheta_j$ [°C]	Raumumschließungsflächentemperatur
$\vartheta_i$ [°C]	Innenlufttemperatur

## Kurzfassung

Ziel dieser interdisziplinären Arbeit ist die Definition und Entwicklung neuer Konzepte zur Bewertung von hygrothermischen Simulationsmodellen historischer Gebäude im Kontext der Präventiven Konservierung. Die Präventive Konservierung zielt auf die dauerhafte Erhaltung von Kunst- und Kulturgut durch Verbesserung der Umgebungsbedingungen und Minimierung oder Reduzierung der relevanten Risiken. Die Güte von Simulationen hat für die Bewertung von Risiken in historischen Gebäuden mit wertvoller Ausstattung und Kunstwerken eine besonders große Bedeutung, da Fehleinschätzungen geplanter Maßnahmen irreversible Schäden zur Folge haben können. Zudem bieten hygrothermische Simulation in der Betrachtung von Variantenrechnungen neue Möglichkeiten zur Analyse des Raumklimas. Daher ist es wichtig Kriterien für eine Bewertung der Ergebnisse von Simulationen im Hinblick auf die Präventive Konservierung zu erarbeiten und an Hand von Fallstudien zu überprüfen. Die Raumklimata im Königshaus auf dem Schachen, in Schloss Linderhof und in der Torhalle Lorsch werden anhand von Messdaten detailliert charakterisiert und anhand von Simulationsmodellen nachvollzogen.

Darauf aufbauend wird eine Vorgehensweise für die Durchführung und Kalibrierung der Simulationen historischer Gebäude sowie neue Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren des Raumklimas und zur klimatischen Funktionsweise historischer Räume vorgestellt.



## Summary

This work is a contribution to the further development of a preventive preservation strategy based on numerical simulation. Investigations to determine and assess the potential of this relatively modern method of hygrothermal building simulation in the field of historical buildings show that simulations are principally applicable in the field of preserving cultural assets and can advance preventive preservation decisively. Due to the global challenges like climate change, shortage of resources, population growth and destabilization of the financial system the requirements are growing to implement the criteria of sustainability also for the preservation of our cultural heritage. We must derive options for action, how to preserve the cultural heritage, more and more from simulations, since they allow to break new ground with regard to risk assessment, and it is no longer financially justifiable to generate this kind of data records from in-situ investigations of real objects. Introducing the numerical simulation in the field of preventive conservation also means the initiation of a paradigm shift already established in the fields of climate research or health care.

This paper was based on the following questions: How do historical buildings function with regard to climate? What are the relevant parameters and how does the indoor climate affect the preservation of works of art? The chosen way to investigate these problems is the analysis of measured climate data in combination with the simulations of real historical buildings. A new method was developed to verify the necessary reliability of the simulation models for risk assessment and for the development of a concept of innovative measures for systematic quality assessment.

### **Hygrothermal simulation of historical buildings**

Simulations of historical buildings are in general concrete case studies. The causes of damage shall be clarified for an individual building or constructional changes shall be assessed, which have an influence on the indoor climate. This kind of simulation makes high demands on the precision of input data and the definition of boundary conditions.

Within the framework of this paper was developed the following approach to hygrothermal simulation of a historical building:

1. Definition of the objectives of simulation (Analysis of the causes of damages, prospects of constructional changes and changes of use, influence of technical building equipment, possible effects of climate change, etc.)
2. Determination of the relevant processes of damage and risks / definition of assessment criteria with regard to damage functions
3. Definition and determination of relevant input parameters for simulation (thermal and hygric material characteristics, building construction, utilization profiles, HVAC, etc.), measurement of indoor and outdoor climate
4. Realization, assessment and iterative calibration of the model by means of sensitivity analyses and modification of the relevant parameters and follow-up validation
5. simulative work on the problem by means of calibrated / validated model / variable consideration
6. documentation of the model and variables

Solving this complex task requires great interdisciplinary cooperation. The question to be investigated is generally asked by the user, who is planning changes of a building or its utilization and therefore involves conservators and building physicists to make decisions. The objectives of simulation, the relevant damage processes to be considered, and the assessment criteria must be defined by all partners involved in the beginning. Principally, this can or must be done a long time before the simulation, since necessary data for calibration and validation of the model must be determined already then.

For later calibration of the model the indoor and outdoor climate but also other relevant boundary conditions of the usage of the building should be measured and documented in detail such as window and door ventilation, shading systems, operation of heating or air-conditioning systems, numbers of visitors etc. for a period of one year at least. Specific micro-climates, e.g. close to works of art or on the surfaces of building components to be considered by simulation, must be determined.

Relevant input parameters for simulation are derived from the objectives and damage functions defined in the beginning, which must be determined by building documentation, especially the thermal and hygric parameters as well as the surface shares of interior materials. These parameters must be taken into consideration with the calibration of the simulation later, and be within a realistic range. Sensitivity analyses help to assess the importance of unknown or insecure parameters for the calibration of the model.

Since the buildings are frequently not airtight and do not have any air-conditioning system, the indoor climate is predominantly determined by the outdoor climate within the course of a year in general. Temperature and absolute humidity adjust to the outdoor conditions in moderated form. If internal sources and sinks of temperature and humidity such as visitor, construction material moisture or HVAC systems remain unconsidered, the two factors that have the greatest impact on moderation and thus on climate stability will be the air change rate and the thermal and hygric inertia of the building.

This means the requirement for a high standard on the measurement of the outdoor climate for simulation. Weather data should be directly determined in-situ by measuring technique as precise as possible and under standardized conditions. To use weather data from distant locations results in considerable insecurities in the model. Indoor climate data as well as data of the building construction and the interior materials should be measured with a high standard of precision for correct calibration concerning the quantity of surface shares and the hygric and thermal parameters. This latter kind of material characteristics is hardly available in the field of historical buildings, since hardly any measurements of the building material physical properties and their variation were carried out so far. Moreover, detailed data recording requires exact knowledge of the materials of the works of art and the historical techniques. All in all, the building simulation model is a system of different parameters with varying impact on the result of the simulation. In dependence of conditions and of the most important influencing factors on the indoor climate these relevant parameters must be identified and adapted in the most realistic way.

For the calibration of the calculated model especially the air change rate and the parameters of the moisture accumulating function as well as of the vapor diffusion resistance are varied besides the thermal mass, since they have the greatest impact on the development of relative humidity in a room. The impact of visitors as source of humidity and air change rate for example in case of Linderhof Palace is predominant in comparison to the humidity buffering of internal surfaces, whereas it has a considerably higher impact on the indoor climate and thus on the results of the simulation in case of the King's House on the Schachen. It is necessary to consider the relevant influences on the respective building. It must be avoided to generate artificial effects for example by unrealistic exaggeration of the number of visitors when calibrating the model. The validation of the model must be carried out by means of a second independent data set, which is recorded separately. Only the validation will show whether the calibration was successful and realistic. Finally there is the opportunity to carry out variable calculations by means of the calibrated and ideally validated model to find answers to the questions asked in the beginning.

## **Assessment of the quality of hygrothermal simulations within the context of preventive conservation**

Due to necessary restrictions of the model all simulations always represent only an approximate reproduction of reality. Thus, hygrothermal building simulation will never completely reproduce reality, but delivers a result showing the tendencies of possible measures. The comparison of simulation and measurement shows that it is impossible to reproduce every day correctly in detail. But it is important to understand, simulate and compare the characteristics of a specific indoor environment. To achieve reliable results from indoor climate simulation it is necessary to define criteria of precision. In this context, case-related the relevant comparative parameters for the data sets of measurement and simulation with regard to the statistic parameters and damage functions must be defined as well as the respective quantitative criteria for these comparative parameters.

From the point of view of preventive conservation the quality and thus the benefit of hygrothermal simulations is highly dependent of the precision in the reproduction of the real building. Since especially extreme weather events may cause damages – high humidity over a long period of time, extremely low values, frost and high material moisture or strong fluctuations of relative humidity – the correct reproduction is necessary. A second aspect are short- and medium-term climate fluctuations and their location in the data field, since they are a precondition for the advance of damages due to thermal cycling such as freeze-thaw cycling, moisture expansion and shrinkage or crystallization.

The process of assessment is principally conducted in two stages:

1. Statistical quality assessment of the reproduction of reality by simulation / check of conformity between measured and simulated data
  - a. Assessment of location parameters
  - b. Assessment of the dynamics of indoor climate
2. Assessment of the correct reproduction of the relevant damage functions or of other problems by the model

The assessment of location parameters and of the dynamics of the indoor climate is conducted on the basis of criteria orientating on the present opportunities of hygrothermal building simulation and subject to individual adaptation, if necessary in the respective case.

The assessment refers to the general statistical location parameters such as median, range of data as well as maxima and minima showing if the simulation

represents the reality well enough. Furthermore a case-related individual consideration is necessary orientating on the actual damage and damage processes. Damages functions must be reproduced in dependence of the effects of damage and frequency of occurrence. As a clear and simple assessment of the quality of the forecasts of results, a forecast-quota was selected, describing the frequency of events in simulation and measurement in percentage.

By means of case studies, concrete assessment criteria are developed and the applicability of this new method is demonstrated to assess simulations in the context of preventive conservation. In addition, the case studies provide new findings on the climate stability of historical buildings.

### **King's House on the Schachen**

Investigations in the King's House on the Schachen show that a stable indoor climate decisively contributes to the preservation of works of art and furnishings of historical buildings. Despite the extreme mountain climate the building possesses a relatively stable indoor climate within certain limits and there is only very little damage caused by the climate. The reason is the low air change rate due to an airtight building envelope because of the house-in-house construction as well as the humidity storage capacity of the materials of the interior furnishings. The simulations showed that the moisture-buffering materials have a significant impact on the stability of the indoor climate. The determination of original material characteristics that has been conducted is another step to better assess the hygrothermal behavior of historical building materials. Mainly textiles and wooden surfaces of the furnishings have a buffering effect on humidity peaks and minimum humidity.

The precise recording of all input parameters is the precondition for a sufficient compliance of simulation results and measured values. The general location parameters and the daily fluctuation range were applied as indicators for mechanical loads of the furnishings for the damage risk assessment of the Turk Hall in the Schachenhaus. The calibration and validation of different simulations of the King's House on the Schachen showed how important it is to conduct exact measurements of the boundary conditions for the construction of a realistic model. The application of weather data of distant locations resulted in considerable insecurities in the model. This is particularly important for the simulation and forecasts of the effects of changes in weather conditions, for example as a consequence of the global climate change. Only the calibrated and validated model with precisely collected weather and indoor climate data can provide good results for projections of climate change.

## **Linderhof Palace**

As the assessment show the parade sleeping room of Linderhof Palace was successfully simulated as a complex historical room with numerous boundary conditions. Moreover, the determination of the building construction, of the climate data and of the user profiles as sources of humidity and heat was carried out as well as investigations of the air change rate. The actual air change is determined by the building as well as the usage of the building, i.e. the ventilation behavior of the users. To determine the air change rate two measurements by passive trace gas method were conducted. The result shows a relatively low air change rate for a historical building between 0.1 and 0.5 h<sup>-1</sup> despite intensive ventilation in summer. In addition, further investigations were carried out by means of simulation showing that visitors have a considerable impact on the indoor climate as direct source of temperature and humidity as well as indirectly due to an increased demand for ventilation. A climate concept was established out for Linderhof Palace by means of the calibrated model, improving conditions for the precious furnishings and also for visitors by controlled ventilation and dehumidification.

## **Torhalle Lorsch**

The example of Torhalle Lorsch shows the possibilities of a calibrated simulation model for the planning of measures with regard to the preventive conservation as well as of other aspects like the energy demand. Concerning the general reproduction of reality the model comes up to limiting factors due to various insecurities mainly in relation to utilization and ventilation, but fulfills the defined criteria with the exception of the average range of relative humidity by good to very good rating. The reproduction of the relevant damage function is sufficiently precise to allow appropriate statements in the variable calculations.

## **Conclusions**

It was possible to generally show that simulations can be used to make forecasts on the effect of various measures and to gain new findings on the different influences on the indoor climate. The calibrated model allows the calculation of variables, i.e. air-conditioning, streams of visitors or potential consequences of global climate change.

The indoor climate of historical buildings is determined by numerous factors, whereby the air change rate is of the most significant importance. Measurements showed that historical buildings have a lower air change rate as generally assumed. To improve air tightness as a passive measure results in the reduction of the impact of the outdoor climate and also in the reduction of short-

term fluctuations. This is, however, only acceptable, if no greater internal humidity loads occur. The simulation of the sealing of the windows in Linderhof shows that a drastic increase in humidity caused by the visitors would be the consequence. In such cases air-conditioning technology must be applied for remedial action.

The second important aspect for the stability of the indoor climate is the properties of interior materials, to buffer humidity peaks. By absorbing or transferring moisture (sorption) they considerably contribute to the reduction of short-term fluctuations as the investigations in the Schachenhaus clearly showed. Textiles and woods in the Turk Hall primarily store moisture there. These findings can be used for the future construction of museums but also for residential buildings, where the topic of a healthy and comfortable indoor climate is constantly gaining in importance.

All measures to achieve an improvement of the environmental conditions of works of art can be summarized by the term of preventive conservation. Concerning the indoor climate it is necessary for preventive conservation to avoid extreme values and to reduce fluctuations first of all. It is a generally accepted statement that works of art can be optimally preserved in their surroundings, if the climate is as constant as possible. The decisive question, however, is how much climate fluctuations must be really reduced and where the limit is exactly to allow the damage-free and permanent preservation by a justifiable investment of financial means. Our knowledge of the impacts on the climate is still very limited. Therefore, further profound investigations on the interaction of indoor climate and damages at works of art seem to be necessary. The extremely narrow climatic corridors required for museums so far are being discussed throughout the world at present. Even if they cannot be generally applied for historical buildings, a solid scientific basis to define the correct targets is urgently needed.

The restoration of the parade rooms in Linderhof Palace is planned to be performed within the next years. The improvement of the indoor climate is the decisive basis to preserve the precious interior furnishings sustainably. Resource-conserving measures and solutions like moisture-controlled conservation heating, decentralized dehumidification or controlled ventilation are nowadays preferred for climatization in contrast to large scale air-conditioning systems, which are frequently not applicable in historical buildings and monuments due to the extreme impacts on the original building substance, and also for financial reasons due to the high energy demand. Measurements in combination with numerical simulations significantly aid to avoid damages and to assess the climate-relevant effects concerning measures in historic buildings.



# 1 Einleitung

Die Erhaltung der Zeugnisse unserer Vergangenheit stellt eine wichtige und zentrale gesellschaftliche Aufgabe dar. Denkmäler, historische Gebäude, Kunstwerke und Artefakte aus vergangener Zeit sind die einzigen materiellen Überlieferungen, die uns ein plastisches Bild von unseren Vorfahren und deren Lebensweisen vermitteln. Gerade in unserer Zeit der Globalisierung, der steten Beschleunigung und der zunehmenden Ausrichtung auf moderne Technologien stellen diese dauerhaften Werte einen Gegenpol dar. Dabei ist es wichtig, zu erkennen, dass diese materiellen Zeugnisse nicht einfach ersetzt, kopiert oder rekonstruiert werden können. Sie sind unwiederbringlich verloren, wenn sie einmal zerstört sind. Daher müssen sie, soweit möglich, in ihrem überlieferten Bestand weiterhin bewahrt werden, um auch in Zukunft eine Rückbesinnung auf die Vergangenheit und ein Reflektieren der eigenen Zeit und des eigenen Handelns möglich zu machen.

Unser kulturelles Erbe ist dem steten globalen Wandel ausgesetzt. Dieser Wandel bringt Chancen, aber auch Gefahren mit sich. Zum einen erfahren Denkmäler durch die Globalisierung und die damit zusammenhängende Mobilität eine zunehmende touristische Nutzung. Dies bedeutet aber auch eine steigende klimatische Belastung für historische Räume und Sammlungen. Darüber hinaus ist vollkommen unklar, welche Folgen der globale Klimawandel haben wird. Vor dem Hintergrund der aktuellen Debatte um CO<sub>2</sub>-Einsparung werden auch für historische Gebäude Fragen der Energieeffizienz immer wichtiger, die sich jedoch nicht immer einfach mit der Erhaltung des Bestands vereinbaren lassen. Daher ist es wichtig, neue und nachhaltige Wege für die Bewahrung des Kulturerbes zu finden und die dafür notwendigen Technologien und Methoden zu entwickeln, die die überlieferten, authentischen Materialien und Oberflächen respektieren und schützen.

Eine zentrale Rolle kommt dabei dem Forschungsfeld der Präventiven Konservierung zu, die wesentliche Beiträge zur dauerhaften Erhaltung von Kunst- und Kulturgut liefern kann. Sie versucht, in einem ganzheitlichen Ansatz alle Gefahren zu betrachten und die relevanten Risiken durch Verbesserung der Umgebungsbedingungen möglichst zu vermeiden oder wenigstens zu minimieren und langfristig zu reduzieren.

Innerhalb der wissenschaftlich ausgerichteten Präventiven Konservierung besteht der Bedarf von der qualitativen Beschreibung der Degradationsphänomene hin zu einer quantitativen, numerischen Erfassung von Schäden und Schadensprozessen zu kommen, die für eine Vielzahl von Kulturobjekten und Artefakten anwendbar ist. Ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Entwicklung von Strategien für die Präventive Konservierung stellt dabei die Einführung von numerischen Simulationsmodellen dar. Die Bewertung der Vorhersagengüte ist dabei von essentieller Bedeutung, da nur mit gut kalibrierten Modellen sinnvolle und richtige Aussagen getroffen werden können. Die vorliegende Arbeit liefert dazu den ersten Ansatz und beschreibt das noch völlig unerforschte Potenzial der hygrothermischen Gebäudesimulation für Denkmäler und historische Gebäude, zur Analyse von raumklimatischen Prozessen und zur rechnerischen Beurteilung von Maßnahmekonzepten, die vor allem unter dem Nachhaltigkeitsaspekt eine immer stärkere Bedeutung erlangt.

## 1.1 Motivation

Das Raumklima in historischen Gebäuden ist für die Erhaltung von Ausstattung und Sammlungsgut von zentraler Bedeutung, denn durch ein ungünstiges Klima – beispielsweise durch zu hohe Feuchte oder durch starke Schwankungen – werden Kunstwerke Schritt für Schritt zerstört. Für die Klimatisierung historischer Räume gibt es unterschiedliche Ansätze. Während im 20. Jahrhundert in den Zeiten voller Kassen und freier Nutzung energetischer Ressourcen historische Gebäude teilweise mit gigantischen klimatechnischen Anlagen ausgerüstet wurden, sind heute kostengünstigere, dezentrale oder gar passive Lösungen notwendig, die zudem einen geringeren Eingriff in die wertvolle Bausubstanz bedeuten. Für die Auslegung solcher Klimatisierungskonzepte ist jedoch eine genaue Kenntnis des klimatischen Verhaltens der historischen Räume erforderlich.

Die Motivation für diese Arbeit liegt darin, dass raumklimatische Prozesse in historischen Gebäuden bis heute wenig erforscht und verstanden sind. Die moderne Bauphysik bietet auf diesem Feld für die Konservierungswissenschaft völlig neue Lösungsansätze. In den letzten Jahrzehnten wurden grundlegende Erkenntnisse über den Transport von Wärme und Feuchte in Materialien gewonnen, die zur Entwicklung von Gebäudesimulationsmodellen geführt haben, die nun auch zur Untersuchung historischer Materialien und Räume eingesetzt werden können.

Die hygrothermische Gebäudesimulation erlaubt es, klimatische Bedingungen in Bauteilen sowie in ganzen Gebäuden zu beurteilen und Vorhersagen zu treffen. So können Maßnahmen, die das Klima im Innenraum betreffen, oder die Veränderung von Bauteilen oder der Konstruktion, bereits im Vorfeld auf ihre Auswirkungen hin überprüft und beurteilt werden. Ein zentraler Punkt im Rahmen der Risikoabschätzung in der Präventiven Konservierung ist dabei die Frage nach der Güte und damit nach der Aussagekraft dieser Vorhersagen, da Entscheidungen, die auf deren Basis getroffen werden, weitreichende Auswirkungen auf die Erhaltung wertvoller Artefakte haben.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser interdisziplinären Arbeit ist es, das Potenzial der hygrothermischen Gebäudesimulation für die Entwicklung von Strategien der Präventiven Konservierung näher zu betrachten und Gütekriterien für die Bewertung von hygrothermischen Simulationen des Raumklimas in historischen Gebäuden im Kontext der Präventiven Konservierung zu entwickeln. Dieses Bewertungskonzept kann nicht universell sein. Die Kriterien müssen vielmehr individuell für ein Gebäude, eine Sammlung, bestimmte Schadensprozesse oder weitere Fragestellungen erarbeitet und angepasst werden.

Historische Räume stellen eine besondere Herausforderung bei der Simulation dar, da sie sehr heterogen und komplex sind und daher ganz andere Anforderungen an die Simulationsmodelle stellen als moderne Bauten. Das liegt zum einen daran, dass es sich meist um mit einer Vielzahl von Materialien und Kunsttechniken geschaffene Räume und Ausstattungen handelt und dass die Kenndaten einer Vielzahl der verwendeten Materialien und die Konstruktionen meist nicht hinreichend bekannt sind (Bild 1), zum anderen daran, dass es sich um gealterte Bauteile handelt, deren Eigenschaften sich im Laufe der Zeit geändert haben können.

Viele Kunstwerke bestehen nicht nur aus einem Material, d. h. sie sind fast immer Kompositmaterialien mit mehreren Schichten unbekannter Dicke und Zusammensetzung, die zudem durch Alterung eine Veränderung ihrer Eigenschaften erfahren haben. In den meisten Fällen ist es nicht möglich und auch nicht zielführend, Proben von den verschiedenen Materialien zu nehmen, um deren Eigenschaften zu bestimmen. Auch historische Baukonstruktionen stellen ein Problem dar, da in denkmalgeschützten, wertvollen Gebäuden nicht ohne weiteres Öffnungen angelegt werden können, um alle Maße und Materialdicken

zu ermitteln, die für die Erstellung eines Simulationsmodells ggf. notwendig sind.



Bild 1: Der Türkische Saal im Königshaus am Schachen vereint eine Vielzahl historischer Kunsttechnologien und Materialien in sich, die die Stabilität des Raumklimas maßgeblich beeinflussen. (Foto: Kristina Holl, Fraunhofer IBP / Bayerische Schlösserverwaltung )

Vor diesem Hintergrund ist festzustellen, dass die reine Anwendung von Softwaretools allein wegen der komplexen Randbedingungen nicht zielführend sein kann und zwangsläufig zu Fehlinterpretationen führen muss. Es ist daher wichtig, die notwendige Güte von hygrothermischen Simulationen von historischen Gebäuden für die Präventiven Konservierung in interdisziplinärer Zusammenarbeit zu definieren.

### **1.3 Methodische Vorgehensweise**

Zur Festlegung von Bewertungskriterien müssen zunächst die Fragestellungen der Präventiven Konservierung in Bezug auf Schadensprozesse und Risiken (Kapitel 2.1), die relevanten Parameter für hygrothermische Gebäudesimulation (Kapitel 2.2) bestimmt und sowie statistische Ansätze zur Analyse von Klimadaten betrachtet werden (Kapitel 2.3).

Das Raumklima historischer Gebäude (Kapitel 3) mittels Simulationsmodellen zu beschreiben, stellt, wie bereits ausgeführt, eine besondere Herausforderungen

dar, da die Modelle die reale Klimasituation mit hoher Übereinstimmung abbilden sollen. Die physikalischen Eingabeparameter sind meist nur schwer und aufwändig zu bestimmen, da die verwendeten Materialien oftmals stark gealtert und viele Bauteilaufbauten gänzlich unbekannt sind. In Kapitel 3.1 wird die Vorgehensweise und die Anforderungen an Simulationsmodelle historischer Gebäude beschrieben (siehe Bild 2) und die Relevanz der Eingabeparameter auf das Simulationsergebnis bewertet.

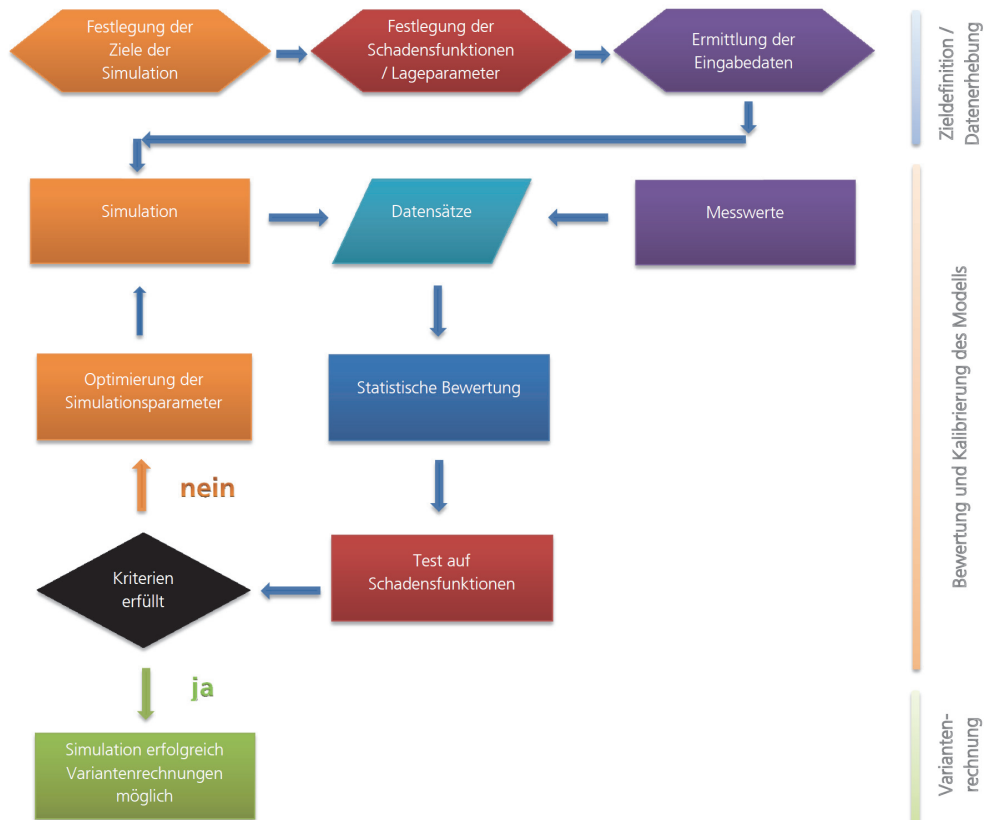


Bild 2: Ablauf einer hygrothermischen Gebäudesimulation im Kontext der Präventiven Konservierung, Definition der Ziele, Erhebung der Eingabedaten, iterative Kalibrierung des Modells und Bewertung der Genauigkeit der Simulation durch statistischen Vergleich der Datensätze von Messung und Simulation sowie Test auf die relevanten Schadensfunktionen.

Für die Kalibrierung des Modells werden die gemessenen Innenraumklimadaten mit den Simulationsergebnissen verglichen, bewertet und so der Grad der Übereinstimmung erfasst. In Sensitivitätsanalysen werden verschiedene Eingabeparameter von Materialkennwerten über Baukonstruktion, Luftwechsel bis hin zu sonstigen inneren Quellen und Senken von Feuchte und Temperatur solange mit dem Ziel einer kontinuierlichen Anpassung und Verbesserung des Modells iterativ variiert, bis die festgelegten, individuellen Bewertungskriterien erfüllt sind. Der iterative Prozess beginnt mit der Bestimmung des Grads der Genauigkeit der erhobenen Eingabedaten. Je höher der Grad der Genauigkeit

desto höher in der Regel auch der Aufwand zur Ermittlung der Daten. Ist das Modell erfolgreich kalibriert, sind schließlich Variantenrechnungen möglich. In Kapitel 3.2 werden sowohl die Grenzen der Methodik als auch die Unsicherheiten betrachtet.

Auf der Basis des Stands des Wissens zu Schadensprozessen an historischen Materialien, zur hygrothermischen Gebäudesimulation und zu statistischen Methoden werden Anforderungen an Kriterien für die Bewertung der Güte der Abbildung der Realität durch die Simulation aufgestellt (Kapitel 4.1). Dabei wird unterschieden in die Wiedergabe allgemeiner statistischer Lageparameter und die Wiedergabe relevanter Schadensfunktionen und weiterer Fragestellungen (Kapitel 4.2).

Schließlich werden die systematische Vorgehensweise zur fallweisen Festlegung von individuellen Bewertungskriterien beschrieben und quantitative Kriterien zur Bewertung der Genauigkeit hygrothermischer Simulationen für das Feld der Präventiven Konservierung aufgestellt (Kapitel 5). Dafür werden zum einen statistische Kenngrößen zum Vergleich von gemessenen und simulierten Datensätzen auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft. Zum anderen werden auch spezifische Kriterien bezüglich Schadensfunktionen benannt, die in der Simulation richtig abgebildet werden müssen, beispielsweise für die Bewertung von kurz- und mittelfristigen Schwankungen des Raumklimas, die für die Präventive Konservierung von großer Bedeutung sind.

An Hand von drei Fallstudien zur Simulation nicht klimatisierter historischer Gebäude werden individuelle Bewertungskriterien abgeleitet und auf ihre Anwendbarkeit überprüft (Kapitel 6). Die Grundlage dafür bilden umfangreiche Raumklima-Messungen, restauratorische Untersuchungen und Simulationen zum Königshaus am Schachen, zu Schloss Linderhof und zur Torhalle in Lorsch. Das Raumklima in den Gebäuden und das Wetter vor Ort wurde dazu über einen Zeitraum von mehreren Jahren erfasst. Diese Daten dienen der Kalibrierung und Validierung der Simulations-Modelle.

Für das Königshaus am Schachen (Kapitel 6.1), eine Holzkonstruktion mit einem hohen Anteil an feuchtepuffernden Materialien im Innenraum, werden eine erste vereinfachte Simulation und eine zweite erweiterte, für die die Eingangsparametern mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmt wurde, gegenübergestellt und vergleichend bewertet. Das erste und zweite erweiterte Modell, basierend auf einem Datensatz aus den Jahren 2006/2007, werden mit einem weiteren Datensatz aus den Jahren 2010/2011 in einer dritten Simulation validiert.

Am Beispiel von Schloss Linderhof (Kapitel 6.2) wird der Prozess der Kalibrierung eines hochkomplexen Modells anhand von Sensitivitätsanalysen mit den Bewertungskriterien überprüft und nachvollzogen. In Linderhof sind insbesondere die kurz- und mittelfristigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte und deren allgemein hohes Niveau als Ursache für klimatisch bedingte Schadensprozesse relevant. Variantenrechnungen mit dem kalibrierten Modell führen zu Maßnahme-Empfehlungen für eine Verbesserung des Raumklimas im Sinne der Präventiven Konservierung.

Die Torhalle Lorsch (Kapitel 6.3) weist mit der wiederkehrenden Kristallisation bauschädlicher Salze einen besonderen Schadensprozess auf. Neben der Überprüfung der allgemeinen Abbildung der Realität durch das Modell wird die Abbildung dieses Schadensprozesses bewertet. Auch für die Torhalle Lorsch wird ein neues Klimakzept auf der Basis von Variantenrechnungen mit dem kalibrierten Modell vorgestellt, das sowohl die Kriterien der Präventiven Konservierung erfüllt als auch die der Energieeffizienz.

Die hygrothermische Gebäudesimulation lässt gerade in der Betrachtung von Varianten neuartige, quantitative Rückschlüsse auf die Funktionsweise historischer Gebäude und auf die Einflussfaktoren auf die Klimastabilität zu (Kapitel 7). Für die Torhalle Lorsch werden mit dem hygrothermischen Raummodell WUFI® Plus Variationen verschiedener Parameter durchgeführt. Insbesondere die Feuchtepufferung, die das Klima im Raum stabilisiert und der Luftwechsel, der den Einfluss des Außenklimas bestimmt, werden betrachtet. Am Beispiel von Schloss Linderhof werden die Auswirkungen von Besucherströmen aufgezeigt.

Die Bewertung der Erkenntnisse und der neuen Methode (Kapitel 8) bildet die Grundlage für die kritische Beurteilung der Arbeit vor dem Stand des Wissens (Kapitel 9). Die Zusammenfassung (Kapitel 10) gibt einen Überblick über die zentralen Ergebnisse und der Ausblick (Kapitel 11) veranschaulicht den weiteren Forschungsbedarf.



## 2 Stand des Wissens

National und international wird derzeit untersucht, wie sich das Raumklima auf die Erhaltung von Kunstwerken auswirkt. Dabei werden die sehr engen, verallgemeinernden Vorgaben für das Raumklima in Museen und historischen Gebäuden mehr und mehr hinterfragt, um letztendlich zu einer detaillierteren Betrachtungsweise und zu einer Risikoabschätzung für individuelle Sammlungen zu gelangen. Die hygrothermische Gebäudesimulation ist dabei Teil einer Strategie, um durch numerische Simulation von der qualitativen Erfassung von Schäden zu einer quantitativen Betrachtung und Einschätzung der Schadensprozesse zu kommen.

### 2.1 Präventive Konservierung und Raumklima in historischen Gebäuden und Museen

Der Zahn der Zeit nagt fortdauernd an allen Dingen. Auch die Kunstwerke und alle anderen historischen Zeugnisse, die wir erhalten wollen, werden wir nur für eine begrenzte Periode über die Zeit retten können. Ziel der Präventiven Konservierung ist es, diese Periode möglichst lang und nachhaltig zu gestalten [Padfield 2005]. Die Risiken für Kunst- und Kulturgut sind dabei vielfältig, beginnend bei katastrophalen Ereignissen wie Feuer oder Erdbeben über Gefahren wie Diebstahl oder Vandalismus bis hin zu kontinuierlichen Schadensprozessen durch Licht, Schadstoffe oder durch ungünstige Temperatur und Feuchte. Das Raumklima ist dabei in der Regel von seiner schädigenden Wirkung im Vergleich zu den genannten katastrophalen Ereignissen in der Betrachtung kurzer Zeiträume eher als gering einzustufen, für die Dauerhaftigkeit der Erhaltung ist es jedoch von zentraler Bedeutung, da seine Langzeitwirkungen großen Einfluss haben. Schadensprozesse können im Bereich der Konservierung nicht mittel- oder kurzfristig betrachtet werden, es muss immer auch in Zeiträumen von mehreren Jahrhunderten mitgedacht und gehandelt werden.

#### 2.1.1 Klimabedingte Schäden in historischen Räumen

Klimatisch bedingte Schäden laufen in der Regel langsam und kumulativ ab. Dies zeigt das Beispiel der gotischen Kirche St. Margaretha in Roggersdorf bei

Holzkirchen. Die neugotische Ausstattung und die Raumschale waren 2004 restauriert worden, ohne grundlegende Veränderungen am Klima der Kirche, das seit jeher feucht war (siehe im Detail S. 41 ff. und Bild 9). Seit dem Ende der Maßnahmen vor fünf Jahren haben sich am vollständig neu gefassten Altar bereits erste neue klimatisch bedingte Schäden eingestellt (siehe Bild 3), die langsam fortschreiten und die derzeit im Rahmen des EU Projektes „Climate for Culture“ [Leissner 2011] kontinuierlich dokumentiert werden.



Bild 3: Klimatisch bedingte Ablösung der blauen Fassung und Vergoldung am Altar der Kirche St. Margaretha in Roggersdorf im Jahr 2009, fünf Jahre nach der Restaurierung und Neufassung des Altars. (Fotos: Kristina Holl, Fraunhofer IBP)

Manchmal sind es aber Extremereignisse, die zu einer verheerenden Reaktion und einer massiven, spontanen Schädigung führen können. Folgende drei Ereignisse geben einen Einblick, wie fatal und zerstörerisch Klimawirkungen auf Kunstwerke auch in relativ kurzer Zeit sein können.

### **Eine Ballveranstaltung in Schloss Schönbrunn**

Die Nutzung von historischen Gebäuden für Veranstaltungen ist allgegenwärtig. Historische Räume schaffen einen Rahmen, der zu Inszenierung von Staatsakten, Konzerten oder Festveranstaltungen perfekt geeignet ist. Eine äußerst anschauliche Schilderung der möglichen negativen Auswirkungen gibt [Exner, Matthias (Hrsg.) 2005] am Beispiel der legendären Winterbälle in Schloss Schönbrunn:

*„In den 70er- und 80er-Jahren setzten auf internationaler Ebene verstärkt naturwissenschaftliche Untersuchungen zum Raumklima in Museen, Archiven und historischen Gebäuden ein, die – auch wenn zunächst kontrovers geführt – zu einer Sensibilisierung der Verantwortlichen diesem Thema gegenüber führten.*

*In 1990 zeigte die Forschung Früchte: Das Bundesdenkmalamt veranlasste für dieses und das Folgejahr eine für Schloss Schönbrunn erstmals längerfristige Messkampagne in den sensiblen Prunkräumen des Schlosses, darunter auch in jenen Räumen, in denen die alljährlichen Winterbälle stattfanden. So konnte der raumklimatische „Super Gau“ der Ballveranstaltungen am 3. und am 10. Februar 1991 dokumentiert werden. Der Verlauf: Am Vorabend der ersten Veranstaltung wurde die Große und die Kleine Galerie samt den angrenzenden Räumen – inklusive ovalem chinesischem Kabinett – binnen acht Stunden von 8 °C auf 24 °C aufgeheizt, der ohnehin niedrige Wert von 30 % relativer Feuchte fiel auf den abenteuerlichen von 12 %, um dann ab dem Beginn des Ballbetriebs bis um Mitternacht auf zirka 50 % hochzuschnellen; im chinesischen Kabinett mit seiner hochsensiblen Ausstattung stieg der Wert von zuvor relativ stabilen 30 % relative Luftfeuchte binnen 5 Stunden auf 65 %. Noch dramatischer war der Verlauf während der zweiten Veranstaltung wenige Tage später: Nun stieg der Wert im chinesischem Kabinett analog von 45 % auf über 80 % relative Luftfeuchte. Mündlichen Berichten von Ballbesuchern zufolge soll damals Kondensat in kleinen Rinnsalen an der Lackvertäfelung erkennbar gewesen sein.“ [Exner, Matthias Hg. 2005], S. 109.*

### **Lye Kyrka**

In der mittelalterlichen Kirche von Lye auf Gotland, Schweden, wurde über mehrere Jahre die Ausstattung aufwändig restauriert. Dazu zählen insbesondere das gotische Triumphkreuz und der Altar von 1496. Im Herbst 2010 wurden dann einerseits Teile der Wände neu verputzt, es wurden aber auch andererseits neue Konvektoren-Heizkörper in der Kirche eingebaut, die sich vor allem auf den Chorraum konzentrieren und vor und hinter dem Altar angebracht sind. Im extrem kalten Winter 2010/2011 wurde trotz vehementer Warnung durch die für die Ausstattung verantwortlichen Restauratoren die Heizung auf Hochtouren betrieben, während der baulichen Arbeiten und mehrere Wochen danach. Eine permanente Beheizung der Kirche mit Heizlüftern hatte bereits während der Restaurierungsarbeiten im Winter 2009/2010 zu erheblichen Schädigungen am Triumphkruzifix geführt. Diese Beheizung wurde in der "Notwendigkeit" begründet, ein angenehmes Arbeitsklima für die Handwerker und Restauratoren zu schaffen. Eine monatelange Klimadiskussion im Anschluss und neue restauratorische Empfehlungen trafen nur teilweise auf Verständnis. Klimalogger wurden ausgelegt und Richtlinien zum Umgang mit Klima und Kircheninventar während baulicher und restauratorischer Maßnahmen aufgestellt. Die Auswertungen der Klimamessungen zeigten, dass der Mittelwert der relativen Luftfeuchte im unbeheizten Kirchenraum bei ca. 70 % r.F. verhältnismäßig hoch liegt. Durch die unkontrollierte Beheizung der Kirche im

extrem kalten Winter 2010 / 2011 sank die relative Luftfeuchtigkeit wieder enorm ab. Der Grund für die erneute Beheizung blieb ungeklärt.



Bild 4: Schäden am Altarretabel der Lye Kyrka auf Gotland mit Notsicherungen durch Japanpapier, nach rücksichtslosem Beheizen der Kirche über den Winter in Folge einer Innenraumsanierung der Wände.

Die Schäden an den Kunstwerken waren so enorm, dass die Ergebnisse der Restaurierung komplett obsolet waren. Das vorher sehr gut erhaltene gotische Flügelretabel erfuhr aufgrund der Trockenheit starke Schädigungen – Ablösungen und Verluste der Malschicht sowie offene Fugen und Risse im Holzträger waren die Folge (siehe Bild 4). Zahlreiche neue Schäden waren auch am Triumphkreuz zu verzeichnen.

Das Beispiel zeigt deutlich, dass gerade auch bei Renovierungsarbeiten im Umfeld wertvoller Kunstwerke ein hohes Maß an Rücksichtnahme auf das Raumklima notwendig ist, um Schäden infolge Unachtsamkeit zu vermeiden. Für den Zeitraum solcher Maßnahmen muss die Ausstattung entweder ausgelagert werden oder sichergestellt sein, dass sie nicht extremer Feuchte oder Trockenheit wie im Fall von Lye ausgesetzt ist. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Schäden in Lye vor allem durch die noch immer weit verbreitete Unkenntnis bezüglich der schädigenden Wirkung des Klimas verschuldet sind und dass hier weiterhin großer Aufklärungsbedarf besteht.

### **Nordiska Museet – Schimmel in einem Depot**

Zu hohe Feuchte über längere Zeit ist kritisch für Kunstwerke. Hygroskopische Materialien nehmen sorptiv Feuchte auf und quellen in einem verstärktem Maß, die Festigkeit organischer Bindemittel lässt nach. Auch die Aktivität von Mikroorganismen nimmt in Abhängigkeit von Temperatur und Material stark zu.

Im Nordiska Museet in Stockholm, Schweden, ereignete sich in den 1970er Jahren laut Dr. Maria Brunskog von der Gotland University folgender Vorfall: *„Aus Mangel an Lagerflächen zur Aufbewahrung der Sammlung wie auch wegen fehlender finanzieller Mittel wurde eine ungenutzte Bunkeranlage aus dem 2. Weltkrieg in einem Felsstollen als Depot für verschiedene Artefakte umgenutzt – hauptsächlich Möbel, aber auch Textilien, Pelze und Metall. Da die Feuchte im Stollen zu hoch war, wurde ein Entfeuchter installiert, der die relative Feuchte konstant und auf einem stabilen Level unterhalb von 70 - 75 % r.F. hielt. Eines Freitag Nachmittags gab es einen Ausfall in der Stromversorgung und die Anlage hörte auf zu Arbeiten. Die Folge war, dass die relative Feuchte sehr schnell auf 90 - 95 % r.F. anstieg.*

*Zu dieser Zeit fanden keine regelmäßigen Inspektionen oder Abstaub- oder Reinigungsaktionen in diesem und allen anderen Depots statt. Im Konservierungsdepartement des Museums floss damals alle Arbeitszeit in Ausstellungen und Notfallmaßnahmen, Präventionsmaßnahmen wurden komplett außer Acht gelassen, obwohl die Restauratoren gegen diese Routine waren. Dieses spezielle Depot wurde nur unregelmäßig von Mitarbeitern des Museums oder den Hausmeistern aufgesucht, um ein Auge auf die Sicherheit zu haben oder um Objekte zu bewegen oder zu transportieren, etc. Als sie wahrscheinlich nur wenige Tage / Wochen später zurück kamen, war bereits eine dünne Lage Schimmel auf der Mehrzahl der Materialien sichtbar. Die Museumskonservatoren wurden alarmiert und starteten eine Reinigungskampagne, die in etwa ein Jahr dauerte – jeden Mittwoch nahmen alle Konservatoren und die Assistenten am Absaugen aller gepolsterten Objekte und der Reinigung von Holzobjekten mit Lösungsmitteln teil. Dabei wurden in etwa 2500 Arbeitsstunden verbraucht.*

*Dieses Beispiel zeigt [als eines von vielen], dass in der Konservierung präventives Arbeiten und Denken besser ist als wiederkehrende Schadensbehebung, auch aus ökonomischer Sicht! Verstaubte Artefakte sind ein hervorragender Nährboden für Schimmelpilzwachstum, auch wachsen diese Schimmelpilze gut im Dunkeln. Aktive Systeme zur Klimakontrolle können ausfallen, so dass reguläre Inspektionen sinnvoll sind.“*

Im Folgenden werden Grundlagen zu Schadensprozessen und die wichtigsten und aktuelle Ansätze zur Risikoabschätzung vorgestellt.

### **2.1.2 Schadensprozesse und Risiken**

Zahlreiche Schäden an Kunstwerken können, einmal abgesehen von menschlicher Einwirkung, auf klimatische Einflüsse zurückgeführt werden.

#### **Relative Luftfeuchte**

Geringe relative Luftfeuchte führt dazu, dass Materialien schrumpfen und verspröden, eine hohe relative Luftfeuchte zur Aufnahme von Wasser und damit zu einem Quellen und letztendlich zu irreversiblen, plastischen Deformationen. Auch Holz kann auf diese Weise bei hoher Feuchte strukturell geschädigt werden. Dieses Verhalten ist insbesondere im Materialverbund als kritisch zu betrachten, denn die meisten Kunstwerke sind inhomogen und vereinen die verschiedensten Materialien in sich. Bei Tafelgemälden beispielsweise haben die tragende Holztafel, der Kreidegrund und die Malschichten unterschiedliche thermische und hygrische Dehnungskoeffizienten. Dies verstärkt auftretende Spannungen und das damit verbundene Schädigungspotential. Holz hat zudem in Abhängigkeit der Schnittrichtung unterschiedliche Eigenschaften. Bei einer Erhöhung der Feuchte dehnt sich das Holz kaum in Faserrichtung, der Kreidegrund jedoch schon. Dadurch dass die Dehnung aber durch das Trägermaterial Holz in eine Richtung gehindert (*restrained*) ist, entstehen Spannungen im Materialverbund. Hohe relative Luftfeuchte führt gleichzeitig zu einem Festigkeitsverlust bei organischen Bindemitteln, wie beispielsweise leimgebundener Kreidegrund bei Tafelgemälden oder Vergoldung. Leinwandgemälde entwickeln bei hoher Feuchte Spannungen im textilen Trägermaterial (Bild 5). Trocknen diese bei hoher Feuchte plastisch verformten Materialien wieder aus, so entstehen Risse. Bei wiederholten Wechseln zwischen beiden Zuständen entstehen also Spannungen, die zur Schädigung und zur fortschreitenden Zerstörung von Kunstwerken führen. Die Konsequenz daraus ist, dass zur Schadensvermeidung Schwankungen von Feuchte und Temperatur minimiert werden müssen. Für die dauerhafte Erhaltung von historischem Kulturgut ist es also notwendig, das Klima möglichst konstant zu halten.

Auch die chemischen Eigenschaften der Stoffe können sich durch hohe Feuchte nachteilig verändern (Bsp. Oxidation von Metallen, Glaskorrosion). Die Verfügbarkeit von Feuchte ist zudem die wesentlichste Voraussetzung für das Wachstum von Schimmelpilzen und anderen Mikroorganismen. Die Risikoabschätzung in Hinsicht auf Mikroorganismen erfordert grundsätzlich die Betrachtung des

Klimas in Oberflächennähe und die Berücksichtigung von Wärmebrücken als thermisch schwächste Punkte der Gebäudekonstruktion, da die relative Luftfeuchte an der Oberfläche von kalten Bauteilen erheblich höher ist als in der Raummitte.

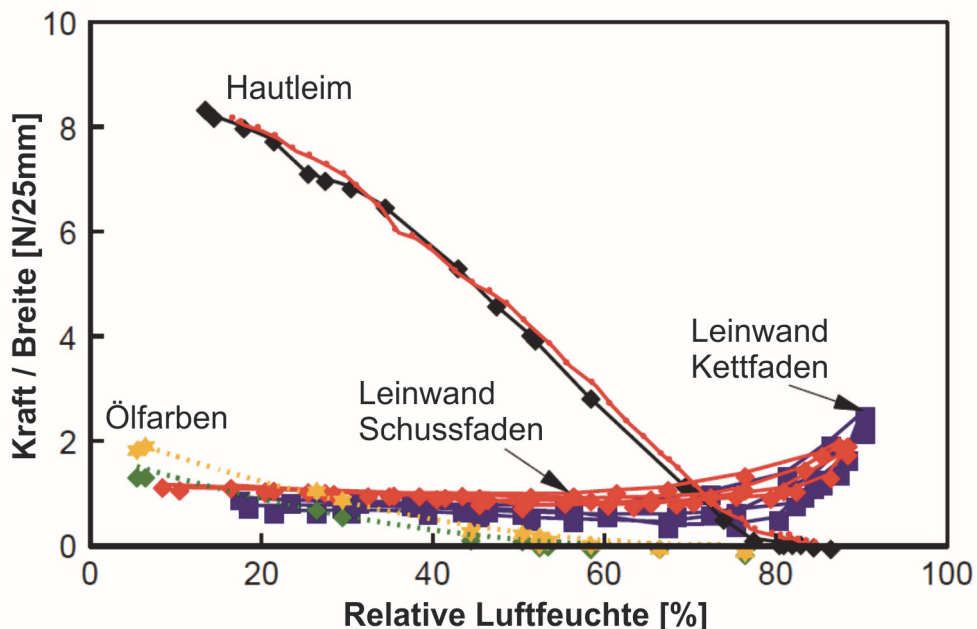


Bild 5: Kraft pro Breite (1 Inch = 25,4 mm) einer in ihrer Dehnung gehinderten streifenförmigen Probe Leinwand (Richtung Kettfaden / Schussfaden), eines Hautleims sowie der Ölfarben Bleiweiß (gelbe Sterne) und Neapelgelb (grüne Karos). Die Dicke der Filme ist gleich und orientiert sich an realen Gemälden. Mit dieser Grafik ist es möglich, verschiedene Spannungen in einem Leinwandgemälde bei verschiedener relativer Feuchte zu bestimmen. Die Leinwand entwickelt in Kett- und Schussrichtung bei hoher relativer Feuchte hohe Spannungen, während der Hautleim sich dagegen genau umgekehrt verhält und dieser bei geringer Feuchte hohe Spannungen entwickelt. Die Festigkeit der Ölfarben nimmt mit höherer relativer Luftfeuchte ab. Quelle: [Mecklenburg 2010a].

Grundsätzlich gelten alle Bewertungsansätze für klimatisch bedingte Risiken immer nur für den jeweiligen Ort eines Kunstwerks und nicht für ganze Räume. Da das Mikroklima in Räumen starke Variationen aufweisen kann (siehe u.a. [Camuffo 2002]), sind vergleichende, kontinuierliche Messungen zur Verteilung von Temperatur und Feuchte im Raum notwendig, um die Risikobewertung für ein Objekt klar einordnen zu können.

## Temperatur

Temperatur ist in zweierlei Hinsicht ein wichtiger Faktor für die Erhaltung von Kunst- und Kulturgut. Die Temperatur bestimmt einerseits die Geschwindigkeit chemischer und biologischer Degradationsprozesse, andererseits führen auch Temperaturveränderungen zu Dimensionsänderungen. Diese sind meist deut-



lich geringer als die durch Änderung der relativen Luftfeuchte induzierten. Daher werden Temperaturveränderungen im allgemeinen als weniger kritisch angesehen als Änderungen der relativen Luftfeuchte. Tiefe Temperaturen können jedoch zu Schäden führen.

Niedrige Temperaturen sind für die Erhaltung von Materialien an sich günstiger, da chemische und biologische Prozesse erheblich langsamer ablaufen [Ashley-Smith 1999, S. 182 ff.]. So bedeutet die Erhöhung der mittleren Temperatur um 5 K eine Halbierung der erwarteten Lebenszeit von Papieren und anderen organischen Materialien.



Bild 6: Kreuzwegstation in der Pfarrkirche St. Nikolaus in Vöran, Südtirol. An dem Leinwandgemälde ist das charakteristische, konzentrische Bild eines Frostschadens an Malschicht und Firniss zu beobachten, der durch Spannungen im Materialverbund infolge unterschiedlicher thermische Dehnungskoeffizienten bei tiefen Temperaturen entstanden ist.

Allerdings verspröden verschiedene organische Materialien bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur, die den Übergang von plastischem in den gummi-elastischen bis elastischem Bereich markiert, also von einer allgemeinen plastisch Verformbarkeit hin zu elastisch sprödem Verhalten, bei dem die Gefahr mechanischer Schädigung durch Bruch zunimmt. Leinwandgemälde können daher allein durch die unterschiedlichen thermischen Dehnungskoeffizienten durch den Aufbau von Spannungen im Materialverbund bei tiefen Temperaturen Schaden nehmen (Bild 6). Das gleiche gilt für verschiedene Kunststoffe, Acryl-, Öl- und Alkydfarben [Mecklenburg 2010b]. Die Kombination mit starken Veränderungen der relativen Feuchte oder Erschütterungen



durch Transport stellt daher bei tiefen Temperaturen ein erhebliches Schadenspotential dar. Für poröse Materialien wie Naturstein ist bei Vorhandensein von flüssigem Wasser im Porengefüge unterhalb von 0 °C ist zudem die Gefahr von Frostsprengungen gegeben.

### **Komplexere Risiken**

Andere Schadensprozesse sind aber Multi-Parameter Prozesse, die nicht nur von einem einzelnen Parameter bestimmt werden. Die Deliquescenzfeuchte, bei der die Kristallisation oder das in Lösung gehen von Salzen stattfindet, weist beispielsweise eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf. Das Wachstum von Schimmelpilzen wird nicht nur von Temperatur und Feuchte bestimmt sondern auch von der Güte des Substrats und der Zeit, in der die drei zuvor genannten Parameter vorliegen [Sedlbauer 2001, Krus et al 2010].

Zusammenfassend betrachtet, ist die maßgebliche Regelgröße in Museen und historischen Gebäuden die relative Luftfeuchte, wenn tiefe Temperaturen ausgeschlossen werden können. Der obere kritische Bereich wird einerseits durch die Gefährdung durch mikrobiologisches Wachstum vorgegeben, andererseits durch Bereiche, in denen plastische Verformung organischer Materialien vorkommen kann. Diese geben auch den unteren kritischen Bereich für die relative Feuchte vor. Sind bauschädliche Salze vorhanden, muss die zulässige relative Luftfeuchte unter Berücksichtigung der Kristallisationsübergänge gesondert ermittelt werden.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ansätze zur Festlegung dieser Grenzen bzw. Zielwerte für das Raumklima betrachtet.

### **2.1.3 Die Klimadiskussion**

International ist derzeit vor dem Hintergrund von Klimawandel und steigenden Energiekosten eine neue und vehement geführte Diskussion um die richtigen Klimawerte für die Erhaltung von Kunst- und Kulturgut in Gange. Dabei besteht ein erheblicher Unterschied im Umgang mit dem Raumklima zwischen Museen und Denkmalpflege [Kilian 2007b].

### **Museen vs. Denkmalschutz**

Während auf Europäischer Ebene in Hinblick auf den Erhalt des kulturellen Erbes eine Untergliederung in *moveable* und *immoveable heritage* üblich ist, wird in Deutschland meist zwischen dem musealen Bereich und der Denkmalpflege

unterschieden. Diese traditionelle Aufteilung der kulturellen Landschaft äußert sich unter anderem in der Verwaltungsstruktur innerhalb der Bundesländer. Die Denkmalschutzbehörden und Landesdenkmalämter sind gesetzlich verankert durch die Denkmalschutzgesetze der einzelnen Bundesländer. Die Aufgaben der baulichen Denkmalpflege werden beispielsweise laut dem bayerischen Denkmalschutzgesetz wie folgt definiert: „Die Eigentümer und die sonst dinglich Verfügungsberechtigten von Baudenkmalern haben ihre Baudenkmäler instandzuhalten, instandzusetzen, sachgemäß zu behandeln und vor Gefährdung zu schützen, soweit ihnen das zuzumuten ist“ (BayDSchG Art. 4 Abs. 1). Verantwortlich sind also zunächst die Eigentümer der Denkmäler selbst. Die Überprüfung, dass diese Aufgaben eingehalten werden, sowie Beratung und fachliche Betreuung übernehmen die Denkmalschutzbehörden und das Landesamt für Denkmalpflege. So heißt es weiter: „Die Aufgaben der Denkmalschutzbehörden sind Staatsaufgaben“ (BayDSchG Art. 11 Abs. 5), [BayDSchG 2003].

Museen sind dagegen sowohl staatlich als auch nichtstaatlich organisiert und verfügen daher in Deutschland nicht über einen derartigen generellen, behördlichen Überbau. Sie sind weitgehend autonom in ihren Entscheidungen.

„Der Museumsbegriff ist in Deutschland nicht geschützt, Auftrag und Aufgaben der Museen sind nicht gesetzlich verankert. Rahmenbedingungen für die Museumsarbeit geben die vom Internationalen Museumsrat ICOM verfassten und weltweit anerkannten ethischen Richtlinien (*ICOM Code of Ethics for Museums*). Ein Museum wird nach ICOM definiert als eine „gemeinnützige, ständige, der Öffentlichkeit zugängliche Einrichtung, im Dienste der Gesellschaft und ihrer Entwicklung, die zu Studien-, Bildungs- und Unterhaltungszwecken materielle Zeugnisse von Menschen und ihrer Umwelt beschafft, bewahrt, erforscht, bekannt macht und ausstellt.“ [Deutscher Museumsbund e.V. / ICOM-Deutschland 2006] Der Deutsche Museumsbund e.V. übernimmt daher zusammen mit ICOM-Deutschland die Formulierung von Standards, die allerdings mehr die Funktion von Richtlinien haben, denn als Normen. Die konkrete Entscheidung, welches Raumklima das richtige ist und wie streng es kontrolliert wird, übernehmen also die Museen selbst.

Die zentrale Aufgabe ist sicherlich sowohl für den Denkmalschutz als auch die Museen die Erhaltung und Bewahrung des kulturellen Erbes. Im Umgang und in den praktischen Ansätzen herrschen jedoch fundamentale Unterschiede. Während Museen je nach Wert und Rang der ausgestellten Kunstwerke zum Teil einen sehr hohen anlagentechnischen und oft auch finanziellen Aufwand betreiben, um optimale raumklimatische Bedingungen für ihre Exponate zu erzielen, ist man in der Denkmalpflege häufig an stark einschränkende, bauliche Vorgaben gebunden. Viel häufiger sind hier Kompromisse notwendig. In der

Denkmalpflege ist zudem die Reparatur oder die regelmäßige Restaurierung im Rahmen der Nutzung eines Gebäudes ein ganz übliches Vorgehen. Die Instandhaltung von Kirchen, Schlössern, Bürgerhäusern, etc. verlangt es, dass nach einer bestimmten Zeit Renovierungen und Restaurierungen erfolgen; die in den Gebäuden aufbewahrten Kunstgegenstände werden im Rahmen einer größeren Maßnahme dann oft entsprechend gleichzeitig mit bearbeitet.

Fundamentale Unterschiede zeigen sich auch im Umgang mit dem Raumklima. Während in den Museen seit der Mitte des 20. Jahrhunderts sehr strikte Klimawerte für die Erhaltung der Kunstwerke gefordert werden, wird in der Denkmalpflege ein deutlich pragmatischer und oftmals mehr an der baulichen Realität orientierter Ansatz verfolgt. Von allgemeinen Standards für das Raumklima ist man sowohl bei den Museen als auch in der Denkmalpflege weit entfernt. Es existieren jedoch zahlreiche Empfehlungen zum Raumklima, die zum größten Teil auf empirischen Erfahrungen basieren. [Holmberg 1995] hat mehr als 300 Quellen ausgewertet und verschiedene dieser Empfehlungen zusammengefasst.

### **Klima in Museen**

In Museen galten lange Zeit die aus einer Umfrage unter mehreren Häusern entstandenen, so genannten ICOM-Richtlinien, siehe auch [Michalski 1993], als maßgeblich, von denen als die generell empfohlenen Werte für das Raumklima 50 % r.F. und 20 °C abgeleitet wurden, je nach Museum meist mit nur geringen Abweichungen, von beispielsweise  $\pm 3$  % r.F. und  $\pm 1$  K. Ein grundlegendes Werk, das den Umgang mit Klimawerten bis heute noch beeinflusst, ist 'The Museum Environment' von Garry Thomson [Thomson 1986].

Thomson beschreibt darin, dass die Wahl des Raumklimas von den geographischen Gegebenheiten des Standorts abhängen sollte. In kalten Gegenden, wo die Luft im Winter sehr trocken ist, kann Befeuchtung zu Kondensatproblemen an Gebäuden führen. Daher sollte dort eine geringere relative Luftfeuchte als Zielwert angestrebt werden, als beispielsweise in den Tropen.

Für Museen von hohem Rang oder nationaler Wichtigkeit (Klasse 1) schlägt Thomson einen entsprechend hohen Standard vor, hier finden sich wieder die 50 bzw. 55 %  $\pm 5$  % r.F. und 20 °C (siehe Tabelle 1). Die relative Feuchte wurde dabei mit Blick auf die Kunstwerke gewählt, die Temperatur orientiert sich alleine am Komfort der Besucher und des Personals.

*„Choice of RH level depends in several factors but cannot go too far from 50 or 55 % RH. An exception may be found in the very low winter temperatures of Canada and north-eastern Europe where attempts at humidification to this lev-*

*el may endanger the building. The tolerance usually quoted of  $\pm 4$  or  $5\%$  RH is based more on what can be expected of an air-conditioning plant than on what exhibits can actually stand without deterioration which is not known in any detail.* [Thomson 1986]

Thomson hat sich also letztendlich an dem orientiert, was die Ingenieure zu seiner Zeit als machbar beschrieben, da wissenschaftliche Grundlagen für eine Beurteilung sicherer Klimabereiche fehlten. Jan Holmberg, der mit Thompson einmal darüber sprach, sagt, dass jener erst später feststellte, wie schwer und unter welchen Kosten diese Werte wirklich zu erreichen waren. Thomson gibt auch einen Zielbereich für Museen der „Klasse 2“ an (siehe Tabelle 1), der aber wenig Berücksichtigung fand. Die Temperatur soll dort lediglich „ausreichend konstant“ sein und es sollen Werte zwischen 40 und 70 % r.F. eingehalten und besonders empfindliche Materialien gesondert in Vitrinen aufbewahrt werden.

Tabelle 1: Zielwerte für das Raumklima nach [Thomson 1986].

Museum oder Sammlung	Klasse 1	Klasse 2
Temperatur	Winter $19 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ Sommer bis $24 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$	Ausreichend konstant, um r.F. zu stabilisieren
r.F.	50 oder $55 \pm 5\%$ r.F.	40 – 70 % r.F.
r.F., gemischte Sammlungen	45 – 60 % r.F.	40 – 70 % r.F.

### Geforderte Klimabedingungen für den Leihverkehr

Nicht zuletzt sind es die Bedingungen für den Leihverkehr, die zu einer weiten Verbreitung von sehr eng gefassten Klimastandards in Museen beigetragen haben und die nun aber auch einer der Gründe sind für die aktuelle Diskussion um eine Aufweitung der strengen Vorgaben, da große Sonderschauen bedeutender Kunstwerke ein globaler Trend und daher bei den Entscheidungsträgern in den Museen ein nicht zu vernachlässigender Aspekt sind. Bei einer Ausleihe wird vom Leihgeber in den meisten Fällen im Leihvertrag ein Facility Report gefordert, der immer auch die Klimatisierung der Ausstellungsräume mit beinhaltet. Garry Thomson vermerkte dazu *„International exhibits and loans require international agreement on RH levels, and introduce a bias towards the median levels 50 – 55 % RH.*“ ([Thomson 1986], S. 88) Üblich sind heute Anforderun-

gen von 50 % bzw. 55 % oder auch 60 % r.F.  $\pm$  5 % r.F. und 21 °C. Kann ein Haus diese Bedingungen nicht erfüllen, erhält es keine Leihgaben. In der Realität sieht es jedoch meist anders aus, da kaum ein Museum diese Bedingungen überall und permanent erfüllen kann. Die Facility Reports geben zwar das Raumklima wieder, können jedoch nicht das Mikroklima bei den Kunstwerken berücksichtigen. Diese strengen Vorgaben sind im Moment international in der Diskussion, auch um den Leihverkehr letztendlich zu vereinfachen, was jedoch von vielen Konservatoren extrem kritisch betrachtet wird, da Kunsttransporte immer eine Belastung und zusätzliche Gefährdung für die Werke bedeuten.

### **Empfehlungen in der Denkmalpflege**

Im Bereich der Baudenkmalpflege bietet sich meist ein komplett anderes Bild. Die Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege [Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2002] nennen als optimales Raumklima einen Bereich für die relative Luftfeuchte zwischen 50 - 65 % r.F. mit möglichst hoher Konstanz. Die geforderte Mindestfeuchte von 50 % r.F. ist ein Grenzwert, der sich von den negativen Erfahrungen mit der Beheizung von Kirchen und historischen Gebäude herleitet. Zu hohe Feuchte soll vor allem wegen des Risikos mikrobiologischen Wachstums vermieden werden. Eine Temperierung oder Beheizung soll grundsätzlich nur zurückhaltend und wo notwendig in Hinblick auf Komfort und Konservierung erfolgen. Als Grundtemperatur werden 6 – 8 °C angegeben. Das Aufheizen und Abkühlen eines Raumes, beispielsweise für Gottesdienste soll mit 1 K pro Stunde und insgesamt max. 12 K nur langsam durchgeführt werden. Diese Anleitung zum langsamen Aufheizen steht konträr zu den Empfehlungen von [Künzel 1991]. Dort wird exakt das Gegenteil empfohlen, da bei einem schnellen Aufheizen durch die thermische Trägheit der Kunstwerke an den Oberflächen kaum Veränderungen der relativen Feuchte passieren und eine verstärkte Desorption der oberflächennahen Schichten zu einer letztendlich geringeren Änderung der relativen Feuchte im Raum führt. Ungeklärt ist auch, wie sich beispielsweise filigrane Dekorelemente oder Skulpturen im Raum im Vergleich zu Wandnischen, massiven Objekten verhalten. Hier ist noch Forschungsbedarf gegeben.

Schließlich wird in [Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege Oktober 2002] ein Erfahrungswert aus restauratorischer Sicht angeführt, der sehr nah an der aktuellen Diskussion liegt: „Ein bestehendes Raumklima gleich welcher Werte, das an der Ausstattung keine Schäden hervorruft, bedarf keiner Veränderung.“

## Aktuelle Ansätze

Der oben genannte Ansatz aus der Denkmalpflege, dass ein Raumklima, das keine Schäden verursacht keiner Veränderung bedarf, liegt letztendlich auch dem aktuellen europäischen Standard CEN TC 346 „Conservation of Cultural Property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced damage in organic hygroscopic materials“ [DIN EN 15757, 2010-12] zu Grunde. Dort werden keine festen Zielvorgaben gesetzt. Der Standard besagt vielmehr, dass bei einer geplanten Nutzungsänderung das bestehende „historische“ Raumklima als Ausgangspunkt dienen soll, sofern keine Schäden vorliegen. Genau hier liegt aber auch die Kernfrage: Wie werden Schäden definiert und wer stellt sie fest? Diese Frage bleibt die Norm schuldig. Für eine Verbesserung des Klimas im Zuge einer Nutzungsänderung wird eine Einengung der Bandbreite zur Stabilisierung des Raumklimas empfohlen. Bezogen auf ein gleitendes Mittel werden die größten Schwankungen abgeschnitten. Dazu wird das 1,5-fache der Standardabweichung bei normal verteilten Klimadaten herangezogen bzw. das 7. und das 93. Quantil. Die zweite Frage die sich stellt, ist, warum sollte das Klima überhaupt verändert werden, wenn keine Schäden vorliegen? Der reale Nutzen in der vorgeschlagenen Methode liegt vielmehr darin, bei kritischen Fällen die Bereiche zu identifizieren, die einer Verbesserung bedürfen, siehe auch [Broström 2010], und einen neuen Zielkorridor festzulegen, der keinen massiven Eingriff in das bestehende Raumklima bedeutet. Dabei ist jedoch trotz allem eine Risikoabschätzung notwendig, ob es wirklich sinnvoll ist, das Klimaband im „historischen“ Bereich zu belassen, wenn beispielsweise die Gefahr von Schimmelpilzwachstum herrscht, oder ob der neue Korridor dann nicht eher im unteren Bereich des historischen Klimas liegen sollte.

Die Entwicklung der Klimavorgaben für Sammlungen und Museen geht heute generell in Richtung einer differenzierteren Betrachtung, bei der zum einen zwischen den Materialien unterschieden wird, und die zum anderen ein über das Jahr gleitendes Klima zulässt (siehe auch [Burmester 2000], [Hilbert 2002], [Holmberg 1995] und [Kotterer März 2004]). Eine Anpassung der Klimavorgaben über den Jahresverlauf zu akzeptieren erscheint sinnvoll, da die zum Erreichen von 50 oder 60 % r.F. bei einer Temperatur von 20 °C notwendige Befeuchtung vor allem im Winter zu erheblichen Feuchteproblemen und Schäden an historischer Bausubstanz, z. B. durch Tauwasser- und Schimmelpilzbildung, führen kann. Zudem ist der Energieeinsatz für eine derartige Klimatisierung vor allem bei undichten, alten Gebäuden mit einem geringem Wärmeschutzniveau extrem hoch.

Ähnliche Bedeutung wie Thomsons Werk international hat für den deutschsprachigen Raum „Sammlungsgut in Sicherheit“ von [Hilbert 2002]. Für die

relative Feuchte wird ein allgemeiner Sicherheitsbereich zwischen 35 % r.F. und 65 % r.F. angegeben. Die optimalen Bedingungen unterscheiden sich jedoch für verschiedene Materialien. Aus Erfahrung ist bekannt, dass Metall und Papier trockener gelagert werden sollten, während Holz und Leinwand optimal in einem Bereich zwischen 45 - 55 % r.F. erhalten werden. Bei Kombination verschiedener Materialien läuft die Wahl für den Zielbereich zwangsläufig auf einen Kompromiss hinaus. Die Temperatur sollte laut [Hilbert 2002] in Museen wegen des Komforts der Besucher zwischen 18 und 25 °C betragen; Temperaturen um 16 °C werden für einige Materialien als sinnvoll betrachtet aber nicht realisierbar eingestuft. Der Hintergrund dazu ist der Konflikt zwischen Erhaltung und Präsentation – während niedrige Temperaturen die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Abbauprozesse und natürlich auch den Energieverbrauch für Klimatisierung reduzieren, sollen auf der anderen Seite auch komfortable Bedingungen für die Besucher geschaffen werden.

Von [Hilbert 2002] wird ein jahreszeitliches Gleiten von Temperatur (20 bis 24 °C) und relativer Feuchte (45 % bis 55 % r.F.) empfohlen. Insgesamt sind es aber weniger die absoluten Werte der relativen Luftfeuchte, die ausschlaggebend sind, sondern vielmehr die Häufigkeit, in der Schwankungen durchlaufen werden. Kurzzeitschwankungen durch regelungsbedingtes Pendeln von klimatechnischen Anlagen sollten laut Hilbert daher möglichst gering gehalten werden, für die Raumlufttemperatur mit max.  $\pm 2$  K und die relative Luftfeuchte mit max.  $\pm 2$  % r.F.

[Burmester 2000] greift diese Diskussion auf und setzt sie in den Kontext mit der Frage der Nutzung der Museen. Auch hier wird vor allem die Reduzierung von Kurzzeitschwankungen gefordert (maximale Änderung von 5 % r.F. pro Tag, 2,5 % r.F. pro Stunde), da eine Ermüdung des Materials bei höheren Schwankungen vermutet wurde. Dieser vermutete Schadensprozess durch Akkumulation von kleineren Kurzzeitschwankungen konnte allerdings nie nachgewiesen werden und wurde von [Mecklenburg 1998] und [Bratasz 2011] widerlegt. [Burmester 2000] beschreibt auch einen Ansatz, der die Bedeutung von Extremwerten nach ihrer statistischen Häufigkeit zu beurteilen versucht und z. B. zulässt, dass die Grenzwerte in 5 % der Zeit überschritten werden. Diese Herangehensweise stammt ursprünglich von [Ashley-Smith 1994], der sich mit Leihverträgen und realen Klimabedingungen in Museen auseinandersetzt. [ASHRAE 2007] beschreitet im Kapitel Museums, Libraries, and Archives einen Weg, der sich mehr an Risiken für Sammlungen orientiert und der federführend von Stefan Michalski vom Canadian Conservation Institute CCI entwickelt wurde. Dabei wird, ähnlich wie bei Thomson, von einem Zielwert ausgegangen, der bei 50 % r.F. und zwischen 15 und 25 °C liegt oder für Sammlungen beim langjährigen Mittel des „historischen“ Klimas. Abhängig von der angestrebten

Qualität der Klimatisierung wird in die Klassen AA und A bis D unterschieden, denen verschiedene zulässige Breiten für kurzzeitige Schwankungen, eine saisonale Anpassung des Raumklimas und verschiedene Risikostufen zugeordnet sind.

Diese Richtlinien stehen in einem Gegensatz zu neueren Forschungen von Mecklenburg [Mecklenburg 1998] sowie Bratasz und Kozlowski [Bratasz 2011], die kurzzeitige Schwankungen als weniger relevant betrachten, sondern vielmehr die jährliche Varianz des Klimas.

### Experimentelle Forschungen

Der amerikanische Forscher Marion Mecklenburg von der Smithsonian Institution in Washington hat in den letzten Jahrzehnten grundlegende Arbeiten zu experimentellen Versuchen an Kunstmaterialien durchgeführt.

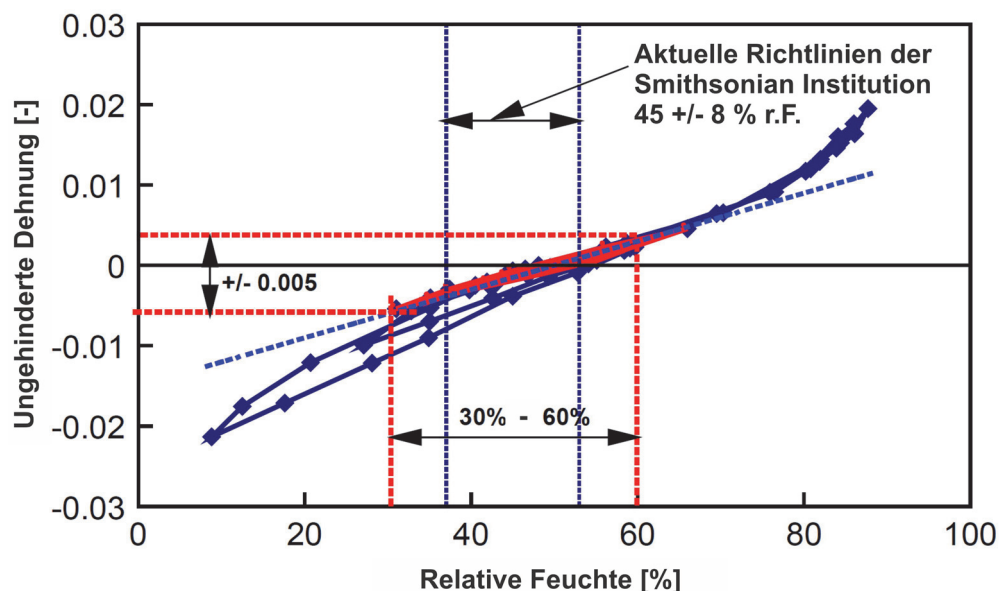


Bild 7: Zulässige Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte für Hautleim, der für Grundierungen von Gemälden benutzt wird, wenn die Dehnungsgrenze (Yield Point) 0,005 als Grundlage für die Einschränkung des Raumklimas in Bezug auf die relative Luftfeuchte verwendet wird. Diese Schwankungen dürfen im Bereich zwischen  $45 \pm 15$  % r.F. liegen, im Vergleich zu den Richtlinien der Smithsonian Institution, die  $45 \pm 8$  % r.F. nennen. Quelle: [Mecklenburg 2010a].

Ziel dieser Untersuchungen war die Betrachtung der komplexen Wechselwirkungen der mechanischen und hygrothermischen Prozesse, die zur Schädigung von Kunstwerken führen. Die einzelnen Versuche an Hölzern, Kreidegrund und diversen Bindemittel- und Pigmentfilmen wurden zu einem rechnerischen Finite-Elemente-Modell zur Vorhersage von Schädigungen an Leinwandgemälden und Tafelbildern zusammengeführt [Mecklenburg 1998]. Als Schaden definiert



Mecklenburg eine irreversible Verformung eines Materials, sei es Holz Kreidgrund oder Fassung. Mecklenburg führte darüber hinaus umfassende Untersuchungen zu Konservierungsmaterialien durch.

Die Konsequenz aus den Forschungen der Gruppe um Mecklenburg, Erhardt und Tumosa an der Smithsonian Institution war eine Anpassung der Klimagrenzwerte (Bild 7) für deren umfangreiche Sammlungen auf  $45 \pm 8$  % r.F. [Erhardt 2007]. Mecklenburg stellt diesen Richtlinien einen auf seinen Untersuchungen basierenden, einen von ihm als „noch sicher“ bewerteten Bereich mit erhöhter Aufmerksamkeit von  $45 \pm 15$  % r.F. gegenüber [Mecklenburg 2010a, S. 54].

Die Forschergruppe um Roman Kozlowski und Lukasz Bratasz am Institute of Catalysis and Surface Chemistry der Polnischen Akademie der Wissenschaften, Krakau, verfolgt Ansätze, die sich an denen Marion Mecklenburgs orientieren, diese aufnehmen und weiter führen.

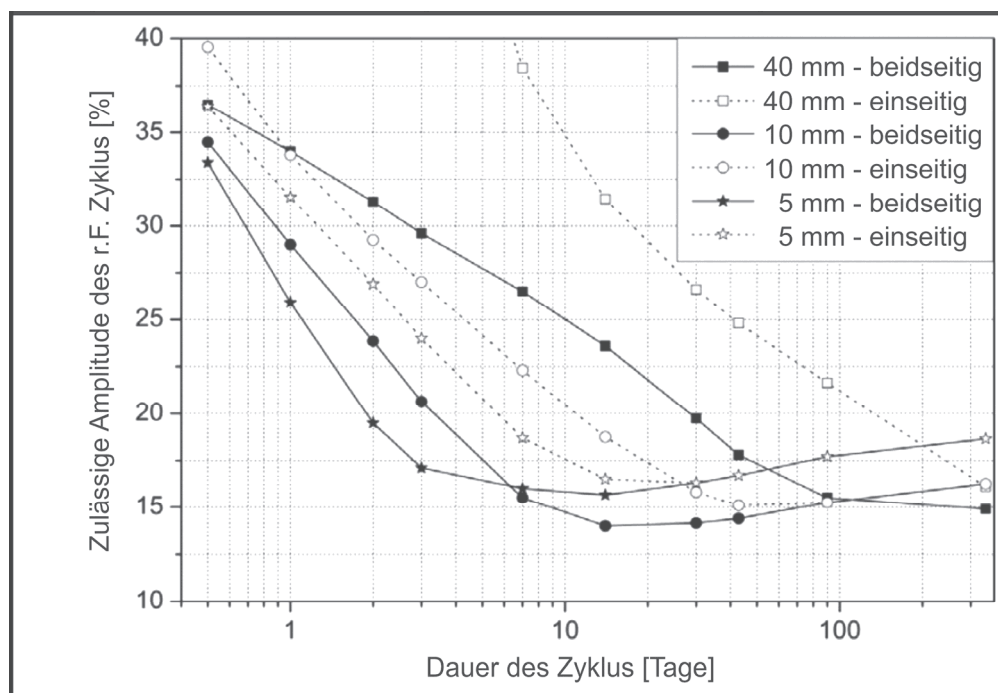


Bild 8: Zulässige Amplitude von Sinus Schwankungen der relativen Feuchte nach [Bratasz 2011] für frei bewegliche Tafelgemälde in der Stärke zwischen 5 und 40 mm bezogen auf die Dauer der Änderung bei 20 °C bei tangentialer Faserrichtung des Holzes. Feuchteaustausch über eine oder beide Seiten der Tafel.

An nachgestellten Tafelbildern wurden einerseits dynamische Belastungsversuche durchgeführt, die die Dimensionsänderung infolge einer Schwankung der relativen Feuchte simulieren. Dabei wurde festgestellt, dass auch eine extrem hohe Anzahl von Kurzzeitschwankungen unterhalb der plastischen Defor-

mationsgrenze im elastischen Bereich nicht zu einer Schädigung des Gefüges aus Holz und Kreidegrund führt.

Parallel dazu wurden Simulationen eines Tafelbildes mit einer 3-dimensionalen Finite Elemente Methode durchgeführt, bei der Feuchtetransport, Temperatur, Verformung, Spannung und Dehnung kombiniert wurden. Diese Untersuchungen legen nahe, dass für Tafelbilder kurzzeitige Schwankungen gegenüber Langfristigen nur eine untergeordnete Rolle spielen und dass, über das Jahr betrachtet, Schwankungen bis zu 14 % r.F. in der Amplitude und darüber hinaus zu keinen Schäden führen (siehe Bild 8).

Diese Simulationen beziehen sich bisher jedoch allein auf ungeschädigte, ungealterte Materialverbände. Jahrhunderte alte Gemälde haben aber oft bereits Vorschädigungen durch Klimaänderungen oder Eingriffe wie frühere Restaurierungen erfahren. Risse an vorgeschädigten Gemälden werden bisher als Entlastungszonen betrachtet. Es stellt sich aber die Frage, ob sie nicht eher Wege für das Eindiffundieren von Feuchte darstellen, sodass an den Rissgrenzen neue und fortschreitende Schädigungen entstehen können.

### **Vergleich von Museumsklima und Realität in der Baudenkmalpflege: Das Raumklima einer unbeheizten Kirche**

Die Diskrepanz zwischen musealen Idealbedingungen und denkmalpflegerischer Realität zeigt das folgende Beispiel:

Nach Abschluss der Gesamtanierung und Restaurierung der Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf im September 2004 stellte der Kirchenpfleger bald erneute Feuchteschäden an den Wänden fest. Die Kirche, ein gotischer Massivbau aus Feldsteinen mit neogotischer Ausstattung mit Gemälden, Skulpturen und Hochaltar, ist nicht beheizt oder anderweitig klimatisiert. Sie wird lediglich vom Kirchenpfleger nach Gutdünken gelüftet. Eine daraufhin durchgeführte Klimamessung zeigte, dass es sich bei den Feuchteschäden um Kondensationsprobleme handelt, die vor allem in der Übergangszeit im Frühjahr auftreten. Zu dieser Zeit ist der Kirchenbau noch vom Winter ausgekühlt und warme, feuchtere Luft gelangt durch den natürlichen Luftwechsel oder unkontrolliertes Lüften ins Innere und kondensiert an den kalten Wandoberflächen. Aber auch im Sommer und im Herbst können bei warmfeuchten Wetterlagen Probleme durch Kondensationsfeuchte entstehen. Zudem sind auch hygroskopische Salze in den Wänden vorhanden, die unregelmäßig aber immer wieder zu Feuchtflecken an den Wänden führen. Durch das regelmäßige Lüften entstanden verstärkt Feuchteschwankungen, die wiederum zu Schäden am neogotischen, 2004 neu gefassten und vergoldeten Altar führten.

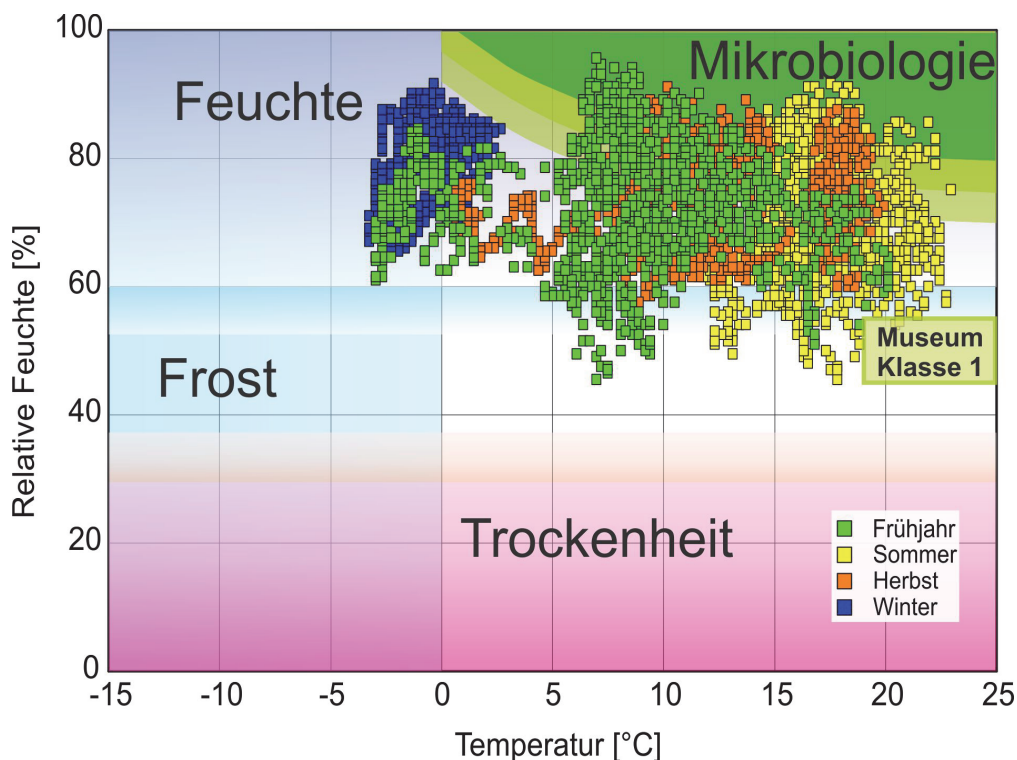


Bild 9: Streudiagramm des Raumklimas in der unbeheizten Kirche St. Margaretha nach den meteorologischen Jahreszeiten, Stundenwerte T, r.F. von März 2005 bis Februar 2006. Kritische Bereiche für Frost, Mikrobiologie nach [Sedlbauer 2001], Feuchtigkeit und Trockenheit mit den Empfehlungen für relative Feuchte für die Museen der Smithsonian Institution  $45 \pm 8$  % r.F. und dem sicheren Bereich für hygroskopische, organische Bindemittel  $45 \pm 15$  % r.F. nach [Mecklenburg 2010a]. Im Vergleich dazu die noch immer verwendeten Raumklimaempfehlung für herausragende Museen und Sammlungen (Museum Klasse 1) nach [Thomson 1986].

Die Auswertung der Klimadaten aus der Kirche St. Margaretha in Roggersdorf [Kilian 2007] zeigt ein über das Jahr betrachtet insgesamt sehr hohes Feuchteniveau. Vergleicht man die realen Klimadaten der Kirche mit den Vorgaben für Museen, stellt man fest, dass diese in keinster Weise erfüllt sind (Bild 9). Das Raumklima liegt nach der erst abgeschlossenen Sanierung und Restaurierung noch immer in einem kritischen Bereich, mit langen Frostperioden im Winter und hoher Feuchte während des gesamten Jahres. Mehr als die Hälfte der Werte der Raumluftfeuchte befindet in einem Bereich hoher Feuchte, der Median liegt für das Jahr 2005 bei 76 % r.F., für die Temperatur bei 10 °C. Die Feuchte befindet sich damit in einem Bereich, in dem, neben potentieller mechanischer Schädigung der Gemälde und Ausstattung, Wachstum von Mikroorganismen wahrscheinlich wird. Risiko für Schimmelpilzwachstum besteht in der unbeheizten Kapelle vor allem in den wärmeren Jahreszeiten, im Winter ist es trotz hoher relativer Luftfeuchte zu kalt in der Kirche. Für ca. 6 Wochen liegen die Temperaturen innen unter 0 °C. Vor allem sind jedoch die durch das Lüften der

Kirche hervorgerufenen Schwankungen als kritisch anzusehen, die häufig in einem Bereich oberhalb von 15 % r.F. innerhalb von 24 Stunden liegen.

Wird der Ansatz von [ASHRAE 2007] herangezogen, erreicht die Kirche nicht einmal die geringste Klasse D für das Raumklima, bei dem gefordert ist, dass die relative Luftfeuchte dauerhaft unter 75 % r.F. liegen soll, um das Wachstum von Schimmelpilzen zu vermeiden. Dabei steht Roggersdorf doch exemplarisch für eine Vielzahl unbeheizter Kirchen. Die Kunstwerke nehmen durch dieses Klima zwar Schaden und müssen regelmäßig restauriert werden, insgesamt überdauern sie aber doch die Jahrhunderte.

### **Untersuchungen an realen Gebäuden und Kunstwerken**

Ein neuer Ansatz besteht in dem Versuch, Beobachtungen an realen Gebäuden und gealterten Kunstwerken heranzuziehen, um klimatisch wirklich kritische Bereiche zu ermitteln.

Ein Beispiel sind die Untersuchungen, die der schwedische Ingenieur Jan Holmberg u. a. in mehreren schwedischen Depots [Holmberg 2001] durchführte, wie auch in Skokloster Castle [Holmberg 2011]. Seine Ergebnisse deuten auf ein Raumklima für optimale Erhaltung zwischen 40 – 60 % r.F. und 5 – 18 °C. Werte unter 30 – 35 % r.F. sollten vermieden werden, da sonst irreversible Schäden auftreten, ebenso wie Werte über 65 – 70 % r.F. zu vermeiden sind, da sonst Wachstum von Schimmelpilzen beginnt. Laut Versuchen von [Holmberg 2001] sind Schwankungen von  $\pm 15$  % r.F. für Holz über 24 Stunden tolerabel, (S. 16).

Kritische und noch zu klärende Punkte sind dabei die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Kunstgattungen und die Unsicherheiten bei den ursprünglichen Herstellungstechniken, bei der „Klimageschichte“ des jeweiligen Objektes und den tatsächlichen Ursachen vorliegender Schäden.

### **Fazit**

Der Grundkonflikt der Präventiven Konservierung ist derzeit, dass zwar klar ist, dass ein extrem stabiles Raumklima am besten dazu geeignet ist, Schäden zu vermeiden oder zu verlangsamen. Andererseits ist nicht bekannt, wo tatsächlich die Bereiche beginnen, bei denen es kritisch wird. Die Kunstwerke, die heute in Museen gezeigt werden, waren in ihrer Vergangenheit sicherlich nicht immer in einem perfekten Klima aufbewahrt und sie existieren trotzdem noch, wenn auch in unterschiedlichem Erhaltungszustand.

Die eigentliche Frage ist also, was halten Kunstwerke wirklich gefahrenfrei aus? Dieser Frage kann man sich von zwei Seiten her nähern – einerseits durch Laborversuche und numerische Simulationen, andererseits durch die Untersuchung realer, gealterter Kunstmaterialien und die Betrachtung deren Erhaltung unter einem spezifischen „historischen Klimas“.

Die aktuelle Debatte um die Aufweitung der Klimastandards ist mit dem Problem konfrontiert, dass immer noch die ausreichenden wissenschaftlichen Grundlagen fehlen, die von allen beteiligten Seiten, vor allem von der der Konservatoren akzeptiert werden.

Gerade die empirischen Erfahrungen aus der Erhaltung und die Verbindung zum jeweiligen historischen Klima bilden eine wichtige Grundlage für das Verständnis von Schadensursachen an den unterschiedlichen Materialien in Relation zum Raumklima und zur zulässigen Schwankungsbreite des Raumklimas. Um dies in eine wissenschaftlich basierte Form zu überführen, sind umfassende statistische Untersuchungen an realen Objekten notwendig, um einen Zusammenhang zwischen Erhaltung und Umgebungsbedingungen herzustellen.

Für die Risikobewertung von klimatisch bedingten Schäden sind neue Ansätze notwendig, die über die Betrachtung einzelner Grenzwerte hinaus gehen. Eine Möglichkeit dazu bietet die Betrachtung des historischen Klimas eines bestimmten Kunstwerkes oder einer Sammlung zur Einordnung der schädigenden Wirkung. Hier ist jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf gegeben, auch ist die Definition der Schadensquantität bei diesem Ansatz noch immer ein zentraler, ungeklärter Punkt. Um das tatsächliche schädigende Potential von Raumklima auf Kunstwerke und Ausstattung besser beurteilen zu können, müssen in Zukunft neben Labormessungen vor allem in-situ Untersuchungen an einer Vielzahl von realen Kunstwerken durchgeführt werden.

In Hinblick auf die Bewertung der hygrothermischer Simulation bedeutet dies, dass die individuelle Festlegung von Gütekriterien immer auch stark vom aktuellen Stand des Wissens auf dem jeweiligen Gebiet der Konservierungsforschung abhängig sein wird. Die Entwicklung neuer Schadensfunktionen, aber auch die dringend notwendige Angabe der Unsicherheiten bei diesen, wird das Potential der hier vorgestellte Methode in Zukunft noch erweitern und ggf. einen probabilistischen Ansatz zur Bewertung von Simulationen ermöglichen.

## 2.2 Hygrothermische Gebäudesimulation

Unter einer Simulation wird die wirklichkeitsgetreue Nachahmung technischer oder naturwissenschaftlicher Vorgänge verstanden. Diese Vorgänge werden durch physikalische oder mathematische Modelle beschrieben, die unter bestimmten Randbedingungen anwendbar sind und zu ihrem korrekten Funktionieren, verlässliche Eingabeparameter benötigen.

Die hygrothermische Gebäudesimulation ist ein Werkzeug der Bauphysik, das in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Programme wie WUFI, MATCH, Delphin oder HAMBASE sind in der Lage, den Verlauf von Temperatur und Feuchte in Bauteilen ein- wie auch zweidimensional unter instationären Randbedingungen zu simulieren. Die meisten dieser Modelle wurden über Jahre entwickelt und werden kontinuierlich validiert und verbessert. Im Rahmen des EU Projekts „Climate for Culture“ werden aktuell vorhandene Simulationswerkzeuge in einem Common Exercise verglichen, um ihre Tauglichkeit für historische Gebäude zu ermitteln [Leissner 2011].

In der Koppelung mehrerer eindimensionaler Modelle entsteht ein Raummodell, das als Ergebnis nicht nur den Verlauf von Temperatur und Feuchte in den Bauteilen ausgibt, sondern das Raumklima selbst und die Energiebilanzen. Diese werden in Abhängigkeit von Außenklima, Umschließungsflächen und inneren Einflüssen wie Nutzer, Besucher, Baufeuchte, Heizung oder Klimaanlage und weiteren Feuchte- oder Wärmequellen und -senken berechnet. Ziel ist letztendlich die Verknüpfung von hygrothermischen Bauteilberechnungen mit der energetischen Gebäudesimulation [Künzel 2005].

Der Vorteil dieser Tools für die Präventive Konservierung liegt darin, dass sie ermöglichen, Maßnahmen in Gebäuden im Voraus zu beurteilen, wie z. B. die Veränderung eines Heizungssystems, die Dämmung einer historischen Baukonstruktion oder die Abdichtung von Fenstern. Auch können solche Simulationen langwierige Realversuche bei komplexen Fragestellungen teils ersetzen oder durch Variantenrechnung ergänzen. Wegen der vorhandenen Unsicherheiten bei den Eingabeparametern ist die genaue Kalibrierung der Modelle und die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse essentiell, um Sicherheit über deren Richtigkeit zu erhalten. Ein Beispiel für ein hygrothermisches Raummodell ist das am Fraunhofer IBP entwickelte WUFI® Plus. Die Software wurde in zahlreichen Versuchen validiert, u. a. in [Holm 2002b] und bei IEA Annex 41 und wird für die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

### 2.2.1 Ablauf

In WTA Merkblatt 6-1-01/D sind die einzelnen Schritte zur Durchführung einer hydrothermischen Simulation mittels numerischen Rechenverfahren beschrieben [WTA 2002]. Im Wesentlichen gibt es drei Anwendungsbereiche, die „Tauglichkeitsbewertung“, die „Abschätzung des typischen Verhaltens“ einer Baukonstruktion und die „Konkrete Fallstudie“. Hinsichtlich denkmalgeschützter Objekte ist in der Regel die „Konkrete Fallstudie“ relevant, da hier meist eine individuelle Konstruktion unter individuellen Randbedingungen betrachtet wird. Eine Ausnahme bilden generelle Betrachtungen zur Funktionsweise bestimmter technischer oder konstruktiver Lösungen für den Denkmalschutz, bei denen eine generelle Worst-Case-Betrachtung beispielsweise mit einem Test-Referenz-Jahr durchgeführt wird. Die Schwierigkeit bei einer Fallstudie liegt in der hohen Anforderung an Vollständigkeit und Genauigkeit. Die Ungenauigkeit der Eingabedaten führt zu einer entsprechenden Unsicherheit der Rechenergebnisse. Die zulässigen Grenzen dieser Unsicherheiten sind festzulegen und das Ausmaß der Fehlerfortpflanzung ist abzuschätzen.

Anhand der festgelegten Anforderungen hinsichtlich Komplexität, zulässiger physikalischer und mathematischer Grenzen, Bedienbarkeit und ähnlichen weiteren Aspekten, erfolgt die Auswahl des Simulationsprogramms. Erste Testrechnungen helfen, die Bewertungskriterien und relevanten Eingabedaten festzulegen. Gerade im Bereich der Denkmalpflege sind umfangreiche Voruntersuchungen notwendig, um möglichst exakte Eingabedaten zur Geometrie des Gebäudes oder Raums, zur Baukonstruktion und den Materialien zu erhalten. Von entscheidender Bedeutung sind bei den Randbedingungen auch die Wetterdaten, die mit einer Wetterstation vor Ort erhoben werden sollten. Alle Daten werden in das Simulationsprogramm eingegeben und eine erste Rechnung durchgeführt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Analyse, Interpretation und Bewertung der Rechenergebnisse. Bei einer konkreten Fallstudie dienen die real gemessenen Werte zur Kalibrierung und Validierung der Simulation. Das Modell wird sukzessive kalibriert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis vorliegt und anschließend mit einem Vergleichszeitraum validiert. Schließlich können verschiedene Variantenrechnungen durchgeführt werden, um das Raumklima und die Wirkung verschiedener technischer, organisatorischer oder baulicher Maßnahmen durch die Simulation einzuschätzen. Im letzten Schritt erfolgt die Auswertung, Berichterstattung und Dokumentation der Simulation.

Tabelle 2: Eingabeparameter für die hygrothermische Gebäudesimulation nach [Holm 2006].

<b>Eingabeparameter</b>	<b>Erforderliche Datensätze oder Parameter</b>
<b>Geometrie</b>	Aufmaß des Gebäudes
	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	Numerisches Gitter
<b>Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie -funktionen</b>	Rohdichte und Porosität
	spezifische Wärmekapazität
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	Feuchtespeicherfunktion
	evtl. richtungsabhängige Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterleitung
<b>Wetterdaten</b>	Temperatur
	relative Feuchte
	kurzwellige Strahlung
	Windgeschwindigkeit und -richtung
	Niederschlag auf die Bauteiloberfläche
<b>Klimaparameter angrenzende Zonen</b>	Temperatur
	relative Feuchte
<b>Massenströme</b>	Infiltrationsluftwechsel
	Austausch mit angrenzenden Zonen
<b>Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen</b>	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptions- und -emissionsgrad
	Regenabsorptionsfaktor (nur außen)
<b>Feuchte- und Wärmequellen und -senken</b>	Klimatechnik und Heizung
	Besucher
	sonstige Quellen und Senken
<b>Steuerparameter</b>	Zeitschritte
	Rechengenauigkeit
	Anfangsbedingungen (Startzeitpunkt, Ausgangswerte Feuchte und Temperatur in den Materialien, etc.)
	Sonstige berechnungsspezifische Parameter



### **2.2.2 Randbedingungen**

Die Anwendung des hygrothermischen Gebäudemodells für die Beurteilung des Raumklimas für die Präventive Konservierung bedeutet, dass die individuelle Konstruktion des Gebäudes wie auch die individuellen Randbedingungen betrachtet werden müssen, mit hohen Anforderungen an die Vollständigkeit und Genauigkeit der Eingaben. Gerade das stellt die Herausforderung dar, da viele dieser Daten bei historischen Gebäuden nicht bekannt und auch nur begrenzt bestimmbar sind. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die notwendigen Eingabeparameter.

### **2.2.3 Ermittlung von Kennwerten historischer Materialien**

Die Simulation historischer Gebäude stellt eine besondere Herausforderung dar, nicht zuletzt wegen der Vielzahl meist unbekannter und zudem gealterter Materialien, die bisher in keiner Datenbank vorhanden sind. Die Ermittlung von Materialkennwerten historischer Materialien selbst gestaltet sich auch schwierig, da eine Probenahme meist nicht zulässig ist oder nicht in den für die klassischen Messverfahren notwendigen Mengen (z.B. Diffusionsmessung) erfolgen kann. Eine Möglichkeit ist die Nachstellung historischer Materialien in der ursprünglichen Technik, oder das Ersetzen mit ähnlichen Materialien gleichen Alters, wie es von [Wehle 2010] für die Simulation des Türkischen Saals am Schachenhaus durchgeführt wurde. Dabei müssen Kompositmaterialien wie bemaltes und vergoldetes Holz mit all ihren Schichten gesondert nachgestellt werden, was einen erheblichen Aufwand bedeutet. Bisher kann die Ausstattung eines historischen Raums daher nicht komplett und in ihren tatsächlichen Eigenschaften erfasst und in die Simulation integriert werden.

Für die Simulation bedeutet dies, dass häufig Annahmen getroffen werden müssen, die der Realität möglichst nahe kommen sollen, aber auch wiederum Unsicherheiten in die Kalkulation mit einbringen. Insgesamt besteht hier Bedarf für zerstörungsfreie und nicht invasive Verfahren, die zu einer Steigerung der Genauigkeit der Simulation führen können.

### **Vorhandene Kennwerte**

Kennwerte historischer Materialien liegen nur vereinzelt vor, Reihenuntersuchungen zur Varianz verschiedener Kunsttechniken und zum Einfluss der Alterung auf hygrothermische Parameter fehlen. [Worch 2007] hat für die Betrachtung des Mikroklimas und der Verformungen von Ölgemälden die Diffusionswiderstände unterschiedlicher Leinwände, Firnisse und Bindemittel bestimmt.

[Allegretti 2008] untersucht den Einfluss unterschiedlicher Kunsttechniken auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand und damit auf die Empfindlichkeit von Tafelgemälden auf Klimaschwankungen, allerdings ohne konkrete Nennung der gemessenen Werte. [Utz 2004] ermittelte hygrische und thermische Kennwerte für Lehmarchitektur, führte Festigungsversuche durch und simulierte das Verhalten der gefestigten Lehmziegel bei unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen mit WUFI 2D. [Wehle 2010] stellte für die detaillierte Simulation und Abschätzung der Feuchtepufferung des Türkischen Saals die wichtigsten Materialien der historischen Oberflächen nach (siehe Anhang E).

Ein Projekt, bei dem in Zusammenarbeit zwischen der TU Dresden und dem Fraunhofer IBP zum Teil auch Daten von historischen Baustoffen zusammengestellt wurden, ist MASEA, eine Materialdatensammlung für die Energetische Altbausanierung [[www.masea-ensan.de](http://www.masea-ensan.de)].

## **2.2.4 Bauphysikalische Grundlagen**

Im Folgenden werden die relevanten bauphysikalischen Prozesse beschrieben, die die Grundlage für die hygrothermische Gebäudesimulation bilden.

### **Wärme- und Feuchtetransport in Materialien**

Die Prozesse des Wärme- und Feuchtetransports (siehe Tabelle 3) sowie die messtechnischen Verfahren zur Bestimmung der relevanten Kennwerte sind ausführlich beschreiben bei [Künzel 1994] und [Krus 1995]. In der Folge werden die wichtigsten Mechanismen kurz zusammengefasst.

#### **Wärmetransport**

Beim Transport von Wärme wird grundsätzlich in drei Prozesse unterschieden: die Wärmeleitung durch Körper, Wärmestrahlung und Konvektion, d. h. Wärmetransport durch Luftströmungen. Beim Wärmetransport innerhalb von porösen Stoffen kommt noch ein zusätzlicher Effekt in Form der Fortpflanzung von Wärme in Folge von Enthalpieströmen durch Feuchtebewegung hinzu. Dabei entzieht die Feuchtigkeit einem Stoff Wärme bei der Verdunstung in den Poren an einem Ort und gibt sie erneut ab bei Kondensation an einem anderen. Man spricht dabei auch von Latentwärmeeffekten.

## Feuchtetransport

Feuchtetransport lässt sich unterscheiden in dampfförmigen Transport und in Flüssigtransport (siehe Tabelle 3). Für die bauphysikalische Betrachtung des Feuchtetransports sind die wesentlichen Mechanismen die Wasserdampfdiffusion und der Flüssigtransport durch Kapillarkräfte, siehe [Künzel 1994, S. 15].

Tabelle 3: Zusammenstellung der in der Praxis vorkommenden Wärme- und Feuchtetransportmechanismen, ihrer Ursachen und treibenden Potentiale nach [Künzel 1994]

	Transportmechanismus	Transportursache, -potential
Wärmetransport	Wärmeleitung	Temperatur
	Wärmestrahlung	Temperatur in der 4. Potenz
	Luftströmung	Gesamtdruck, Dichteunterschiede
	Enthalpieströme durch Feuchtebewegung	Dampfdiffusion mit Phasenwechsel und Flüssigtransportströme im Temperaturfeld
Dampftransport	Gasdiffusion	Dampfdruck (Temperatur, Gesamtdruck)
	Molekulartransport (Effusion)	Dampfdruck
	Lösungsdiffusion	Dampfdruck
	Konvektion	Gesamtdruckgefälle
Flüssigtransport	Kapillarleitung	Kapillarer Unterdruck
	Oberflächendiffusion	Relative Luftfeuchte
	Sickerströmung	Gravitation
	Hydraulische Strömung	Gesamtdruckunterschiede
	Elektrokinese	Elektrische Felder
	Osmose	Ionenkonzentrationen

Dazu ein Beispiel: Eine Kirche wird im Winter auf 16 °C beheizt, die relative Feuchte im Raum beträgt dadurch 30 % r.F., außen herrschen 80 % r.F. bei niedrigen Temperaturen von -10 °C. Der Dampfdruck außen beträgt damit 229 Pascal, der Dampfdruck innen 543 Pascal, da die warme Luft innen absolut betrachtet mehr Feuchte enthält (4 g/m<sup>3</sup>) als die kalte Luft außen (1,9 g/m<sup>3</sup>). Der Gradient des Dampfdrucks und damit der Feuchtetransport durch Diffusion geht also von innen nach außen, der Gradient der relativen Feuchte und damit auch der Flüssigtransport in den Poren verläuft entgegengesetzt von außen nach innen (vgl. Bild 10 unten).

Die erhöhte absolute Feuchte in der Kirche entsteht also durch ein Sorptionsfeuchteprofil im Mauerwerk in Folge der niedrigeren relativen Luftfeuchte innen, „das zu einem Flüssigtransport von der Außenseite der Mauer zur Innenseite führt. Das transportierte Wasser wird von außen durch Sorption zugeführt und erhöht von der Innenoberfläche aus durch Desorption den Luftfeuchtegehalt im Innenraum“ [Krus 1995, S. 38].

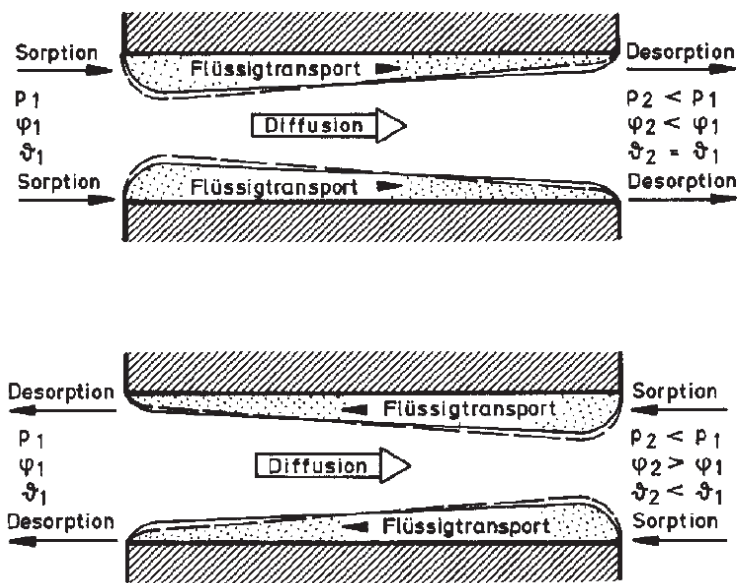


Bild 10: Feuchtetransport im Porenraum nach [Krus 1995], oben bei isothermen Bedingungen, unten bei nicht isothermen. Diffusion folgt dem Gradienten des Wasserdampfpartialdrucks  $p$ , Flüssigtransport findet entsprechend dem Gradienten der relativen Feuchte  $\varphi$  statt.

## Diffusion

Die Diffusion hat zusammen mit der Feuchtesorption einen erheblichen Einfluss auf die Klimastabilität von historischen Räumen. Sie bestimmt die Geschwindigkeit, mit der ein Stoff Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen oder abgeben kann. Sie wird beschrieben durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  und den  $s_d$ -Wert, der die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke für die Diffusion von Wasserdampf durch einen Feststoff angibt.

$$s_d = \mu * d \quad (1)$$

$s_d$  diffusionsäquivalente Luftschichtdicke

$\mu$  Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

$d$  Dicke der betrachteten Schicht

Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen können die Diffusionseigenschaften von Stoffen erheblich verändern. Kreidegrund und Vergoldungen, als in historischen Gebäuden häufiger anzutreffende Kunsttechniken, scheinen die Diffusionseigenschaften von Holz jedoch nur gering zu verändern.

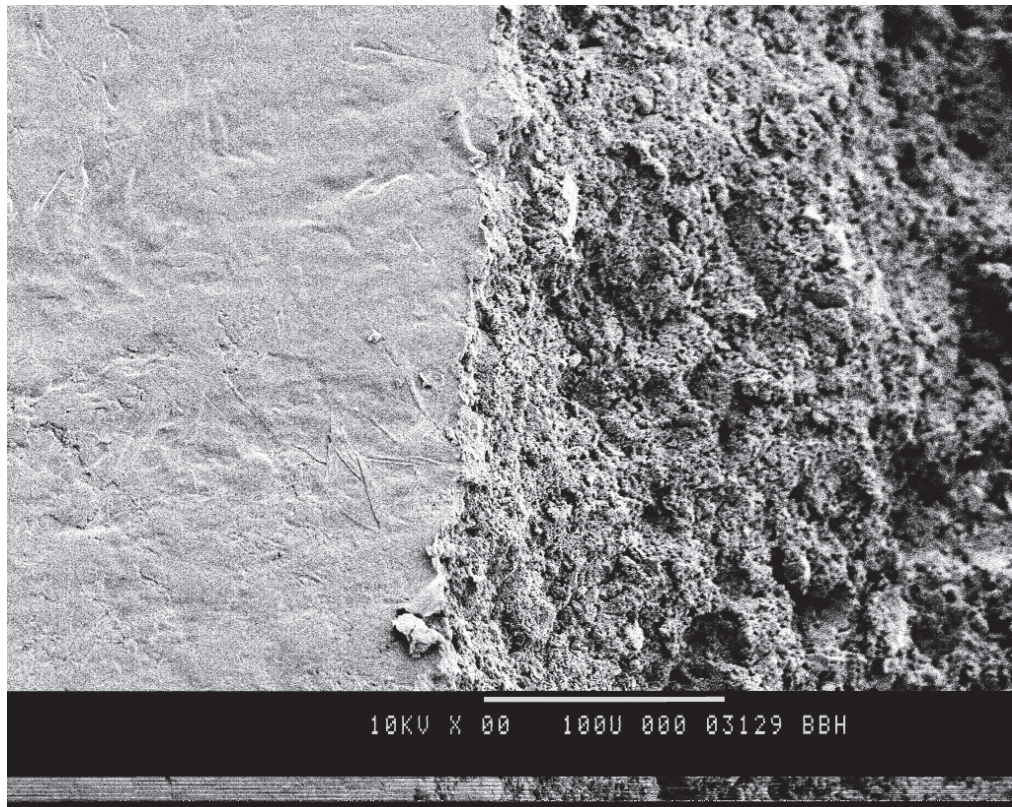


Bild 11: REM-Aufnahme eines Kreidegrunds mit Vergoldung zeigt links die glatte Oberfläche der Vergoldung. Die Diffusion mit der umgebenden Luft wird wegen der geringen Schichtdicke durch die Goldauflage jedoch nur geringfügig vermindert. Rechts im Bild ist der poröse Kreidegrund zu sehen. Die Länge des grauen Balkens über der Schrift im Bild entspricht 100 µm, Bild: Fraunhofer IBP [Wehle 2010].

Bei Messungen an Probekörpern zeigte sich, dass die Diffusionskennwerte der vergoldeten Holzproben ( $\mu = 31$ ,  $s_d = 0,65$ ) nicht sehr von den nur grundierten Proben ( $\mu = 28$ ,  $s_d = 0,59$ ) und denen des unbeschichteten Holzes ( $\mu = 26$ ,  $s_d = 0,52$ ) unterscheiden [Wehle 2010]. Die Vergoldung hemmt die Diffusion demnach kaum. Der Grund liegt darin, dass Blattgold durch Schlagen in Schichtdicken von unter 0,1 Mikrometern hergestellt wird (siehe Bild 11). Wird das Material Gold mit einem  $\mu$ -Wert von 100.000 als dicht angenommen, so berechnet sich der  $s_d$ -Wert der Vergoldung nach untenstehender Gleichung wie folgt:

$$s_d = \mu * d = 100000 * 10^{-7} \text{ m} = 0,01 \text{ m} \quad (2)$$

Die Kreidegrundsicht hat einen ähnlich hohen Einfluss auf die Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben wie die Vergoldung. „Die Kennzahlen von grundierten Proben ( $\mu = 28$ ,  $s_d = 0,59$ ) und vergoldeten Proben müssten dem-

nach näher beieinander liegen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich aber um Mittelwerte der Messungen. Die Diffusionswiderstände der sieben unbeschichteten Holzproben lagen im Bereich von  $\mu=25$  bis  $\mu=30$ , was eine Begründung für die Abweichung der beschichteten Proben ist. Zudem wurde der Kreidegrund von Hand aufgetragen, wodurch es zu Abweichungen bei den Schichtdicken kommen kann.“ [Wehle 2010]. Diese Erfahrung wird von [Allegratti 2008], S. 196, bei der Untersuchung unterschiedlicher Kunsttechniken und ihres Einflusses auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand bestätigt.

### Feuchtespeicherung / Feuchtepufferung

Die meisten Baustoffe und Materialien, die für die Herstellung von historischen Gebäuden wie auch von Kunstwerken verwendet wurden – Hölzer, Textilien, Naturstein, Mörtel, Fassungen – sind porös. Das bedeutet, dass sie eine Porenstruktur besitzen, die in der Lage ist, Feuchtigkeit in dampfförmiger und in flüssiger Form aufzunehmen, im Material weiter zu transportieren oder wieder abzugeben. Dieser Prozess, der das Raumklima wesentlich mit beeinflusst, wird auch als Feuchtepufferung oder Feuchtespeicherung bezeichnet.

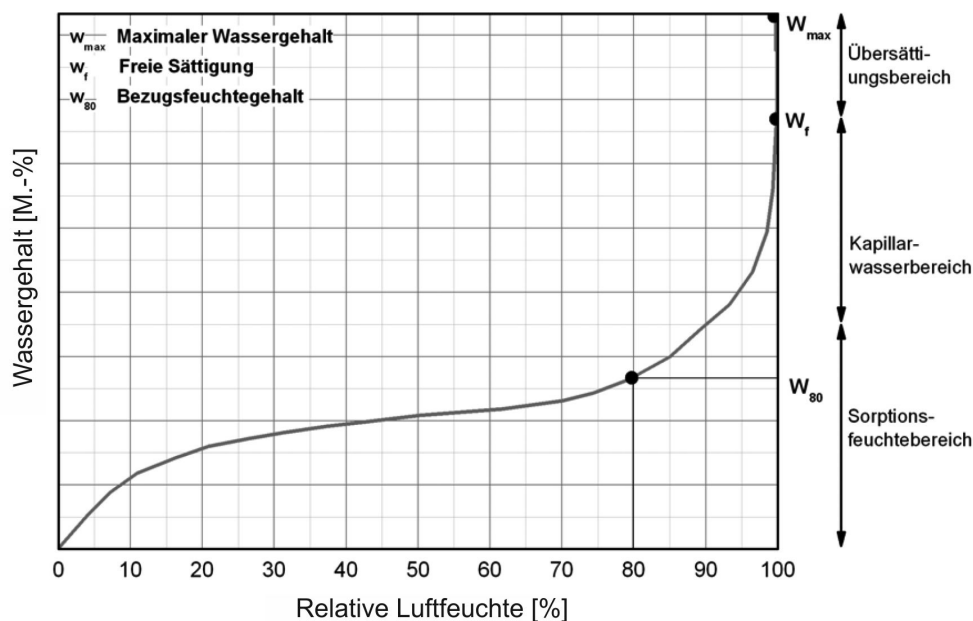


Bild 12: Wasseraufnahme eines Baustoffs in Korrelation zur relativen Feuchte, aus [Wehle 2010].

Poröse Stoffe streben kontinuierlich nach einem Feuchte-Gleichgewicht mit der Umgebungsluft. Wenn sich die Umgebungsbedingungen ändern, so ändert sich auch die Materialfeuchte. Bei allen Prozessen, die die Aufnahme und Abgabe von Feuchte aus der Raumluft bezeichnen, spricht man bei der Materialfeuchte vom hygroskopischen Bereich oder auch Sorptionsfeuchtebereich (Bild 12). Im

überhygroskopischen Bereich liegt flüssiges, ungebundenes Wasser im Porenraum vor, insbesondere in größeren Poren, den sog. Kapillarporen. Daher spricht man hier auch vom Kapillarwasserbereich. Der Übersättigungsbereich wird dann erreicht, wenn Feuchtigkeit durch zusätzliche Einflüsse wie Druck oder Anströmung von Wasser in die Poren eingebracht wird.

Wie erheblich die Wirkung der Feuchtepufferung auf das Raumklima in Gebäuden sein kann, zeigt das Beispiel von Bibliotheken, die geradezu vollgestellt mit feuchtepufferndem Material, den Büchern, sind. [Eckermann 2002] beschreibt die Feuchtepufferung des „natürlichen Eigenklimas“ des Rokokosaals der Anna Amalia Bibliothek in Weimar vor der Brandkatastrophe im Jahr 2004. Die jährliche Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte im ehemals komplett unklimatestisierten Rokokosaal von 1766 betrug bei Messungen im Jahr 1997 gerade einmal 15 % r.F. und lag in einem Bereich zwischen 47 % und 62 % r.F., bei Temperaturen zwischen 3 °C und 26 °C und einem für historische Gebäude relativ hohen mittleren Luftwechsel von  $0,8 \text{ h}^{-1}$ . Dabei waren die Wände der Bibliothek im Obergeschoß des Residenzschlosses in einer relativ „leichten“ Bauweise erbaut, was sich an der Schwankung der Temperatur innen nachvollziehen ließ. Die massive Dämpfung der Feuchteschwankungen in den Bibliotheksräumen beruhte also alleine auf den immensen feuchtepuffernden Massen trotz des Luftwechsels von  $0,8 \text{ h}^{-1}$ .

[Padfield 1998] beschreibt die Rolle von feuchtepuffernden Materialien für die Stabilisierung des Raumklima. In einer speziell entwickelten Prüfkammer prüft er die Adsorption und Desorption der Materialien über die Zeit und deren Einfluss auf die relative Luftfeuchte in der Kammer. Seine Erkenntnisse überträgt er auf den Museumsbau [Padfield 2004] und schlägt als passive Maßnahmen für Museums-Neubauten die Schaffung großer thermischer Massen sowie die Nutzung poröser Baustoffe und kapillaraktiver Materialien für die Außenwände vor.

## **Sorption**

Unter Sorption wird generell die Anreicherung eines Stoffes in einer Phase (fest, flüssig oder gasförmig) eines weiteren Stoffes (Absorption) oder auf der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Phasen (Adsorption) verstanden. Die Abgabe wird allgemein als Desorption bezeichnet. Bei porösen Baustoffen wird bei der Sorption Wasser in einer mono- oder multimolekularen Schicht an den Wandungen der Poren angelagert; dabei handelt es jedoch sich nicht um eine chemische Bindung des Wassers im Baustoff. Auch die Kapillarkondensation in Gelporen trägt zur Sorption von Feuchte bei. Für Transport- und Speicherprozesse bei porösen Baustoffen wird mit Sorption generell die Aufnahme von



Feuchtigkeit in Baumaterialien aus der umgebenden Luft bezeichnet, mit Desorption alle Vorgänge, die eine Abgabe von Feuchtigkeit aus den Baumaterialien zur Folge haben. Dazu gehört auch die Verdunstung von gespeicherter Feuchtigkeit aus Transportvorgängen an der Oberfläche eines Baustoffes.

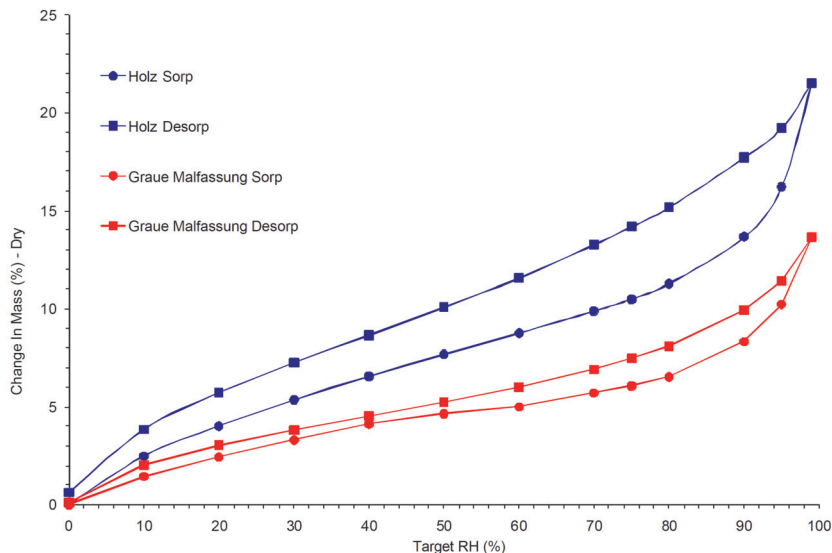


Bild 13: Unterschiedlicher Verlauf der sorptiven Aufnahme und Abgabe von Feuchte aus der Raumluft am Beispiel einer historischen grauen Farbfassung aus Kasein Tempera auf einer Holzoberfläche, Grisaille Malerei von 1673 am Strickhof in Appenzell [Garrecht 2010].

Bei Absorption und Desorption stellen sich unterschiedliche Feuchtegehalte bei derselben relativen Feuchte ein, daraus ergibt sich eine Hysterese der beiden Kurven (Bild 13). Nach [Künzel 1994] ist dieser Hysterese-Effekt bei den meisten Baustoffen so gering ausgeprägt, dass er die Ergebnisse der hygrothermischen Simulation kaum beeinflusst. Daher wird bei der Ermittlung von Kennwerten für die hygrothermische Simulation in der Praxis meist nur die Absorption gemessen, bzw. bei Stoffen, die eine ausgeprägtere Hysterese aufweisen, ein Mittelwert zwischen Absorption und Desorption in der Simulation verwendet.

### Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient

Die Übergangskoeffizienten bestimmen die Geschwindigkeit des Austauschs von Wärme und Feuchte mit den Bauteiloberflächen und sind abhängig von der Luftgeschwindigkeit, Richtung des Wärmestromes und von dem Temperaturunterschied zwischen Bauteil und Umgebungsluft.

In der hygrothermischen Gebäudesimulation mit WUFI® Plus werden der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient als konstant und ohne Temperaturabhängigkeit angenommen, was einer Vereinfachung der Realität entspricht. Die



Übergangskoeffizienten an der Außenoberfläche können windabhängig berechnet werden.

Für die Betrachtung von besonderen Schadensbildern durch Mikroklimata, die mit Luftgeschwindigkeiten und temperaturabhängigen Übergangsbedingungen in Verbindung stehen, müssen andere Methoden zur Anwendung kommen, wie CFD Simulationen.

### Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen

Die Berechnung der durch die Bauteile transportierten Wärme und Feuchte basiert auf Differentialgleichungssystemen, die die Wärme und Feuchtetransporte und -speicherung in den Materialien beschreiben [Künzel 1994] und die in der Simulation für jedes Bauteil gesondert gelöst werden müssen. Die Temperatur und die relative Feuchte im Raum werden aus der Wärmebilanz bzw. aus der Feuchtebilanz berechnet (Bild 14).

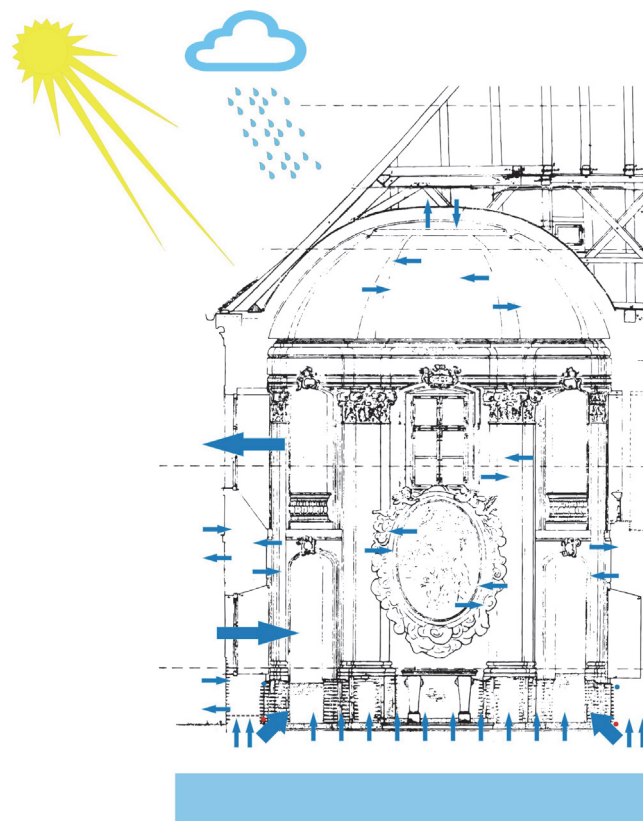


Bild 14: Das Schema zeigt die Feuchtebilanz eines Raumes am Beispiel der Renatuskapelle in Lustheim nach [Kilian 2004]. Feuchte wird durch die Wände, Decke und Boden transportiert sowie sorptiv aufgenommen und abgegeben. Austausch mit der Außenluft findet über Undichtigkeiten, Fenster und Türen statt. Der Boden und die in der Renatuskapelle am Wandsokkel eingebaute Bauteile geben wegen des dauerhaft feuchten Untergrundes als Quellen zusätzliche Feuchte an den Raum ab.

## 2.2.5 Funktionsweise des Raummodells

Das hygrothermische Raummodell WUFI® Plus besteht aus einer Koppelung mehrerer eindimensionaler Modelle für die die Räume begrenzenden Bauteile, die nach ihren Flächenanteilen in die Berechnung des Raumklimas mit eingehen. Zusätzlich werden über die Bilanzen die gesamten Wärme- und Feuchteströme mit berechnet.

### Wärmebilanz des Raumes

Die Temperatur im Raum wird bestimmt durch die Wärmeflüsse in den Raum. Dabei sind nicht nur die Wärmeflüsse über die Raumschale durch Transmission und durch solare Einstrahlung zu berücksichtigen, sondern auch Wärmegewinne oder -verluste durch den Luftwechsel und interne Wärmequellen wie z. B. Heizungssysteme oder Beleuchtung (3).

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} = \sum_j A_j \alpha_j (\vartheta_j - \vartheta_i) + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{IwQ} + n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i) + \dot{Q}_{RLT} \quad (3)$$

mit:

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Raumluft
$\alpha_j$ [W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\vartheta_a$ [°C]	Außenlufttemperatur
$\vartheta_j$ [°C]	Raumumschließungsflächentemperatur
$\vartheta_i$ [°C]	Innenlufttemperatur
$t$ [s]	Zeit
$A_j$ [m <sup>2</sup> ]	Raumumschließungsflächen
$c$ [J/kgK]	spezifische Wärmekapazität der Luft
$n$ [h <sup>-1</sup> ]	Luftwechsel
$\dot{Q}_{Sol}$ [W]	Kurzweilige Sonneneinstrahlung, die direkt zu einer Erwärmung der Innenluft bzw. Inneneinrichtungsgegenstände führt
$\dot{Q}_{IwQ}$ [W]	Interne Wärmequellen durch Personen, Beleuchtung und Geräte
$\dot{Q}_{RLT}$ [W]	Wärmestrom in Folge raumluftechnische Anlagen (RLT)
$V$ [m <sup>3</sup> ]	Raumvolumen

## Feuchtebilanz des Raumes

Die Massebilanz der Feuchte für die Raumlufte (4), die die relative Feuchte im Innenraum bestimmt, setzt sich zusammen aus dem Feuchtetransport über die Innenoberflächen, der nutzerabhängigen Feuchteproduktion und den Zugewinnen und Verlusten von Feuchte über Infiltration, natürliche oder mechanische Lüftung wie auch anderen Feuchtequellen und -senken, wie z. B. raumluftechnische Anlagen [Holm 2002b].

$$V \cdot \frac{dc_i}{d\tau} = \sum_j A_j \dot{g}_{w_j} + n \cdot V (c_a - c_i) + \dot{W}_{IFQ} + \dot{W}_{RLT} \quad (4)$$

mit:

$c_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Absolute Feuchte der Außenluft
$c_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Absolute Feuchte der Raumlufte
$\dot{g}_{w_j}$ [kg/(sm <sup>2</sup> )]	Feuchtestrom von der Wandinnenoberfläche zur Raumlufte
$n$ [h <sup>-1</sup> ]	Luftwechsel
$V$ [m <sup>3</sup> ]	Raumvolumen
$\dot{W}_{IFQ}$ [kg/h]	Feuchteproduktion im Raum
$\dot{W}_{RLT}$ [kg/h]	Feuchtezu- bzw. -abfuhr durch raumluftechnische Anlagen

Die Feuchtepufferung geht in der Simulation mit WUFI® Plus in Form des Feuchtetransports über die Innenoberflächen in die Rechnung mit ein. Über Flächenanteile wird ggf. Innenausstattung bei der Rechnung in der Form zusätzlicher feuchtepuffernder Flächen mit berücksichtigt und in die Simulation als gesonderten Wert zu integriert.

Bei Feuchte aus dem Erdreich, beispielsweise, muss diese als zusätzliche Feuchtequelle im Raum mit berücksichtigt werden (Bild 14). Aus der Gleichung zur Feuchtebilanz des Raumes geht hervor, dass wenn weder zusätzliche Feuchtequellen im Raum vorliegen noch irgendwelche raumluftechnischen Anlagen vorhanden sind, der Feuchtegehalt der Luft im Raum allein durch zwei Größen bestimmt wird – den Feuchtestrom zwischen Oberflächen und der Raumlufte und den Feuchteaustausch mit der Umwelt über den Luftwechsel mit dem Außenklima oder benachbarten Zonen.

### **2.2.6 Bestehende Bewertungskriterien für die Güte hygrothermischer Simulationen**

Ziel jeder Simulation ist es, die Realität mit vertretbarem Aufwand hinreichend genau zu beschreiben. Dabei wird die Simulation aufgrund zahlreicher Unsicherheiten und Unwägbarkeiten die Realität immer nur näherungsweise beschreiben.

Die Bewertung der Güte von hygrothermischen Simulationen im Gebäudebereich wird heute meist durch rein grafischen Vergleich von Messdaten und Simulation mittels Kurvendiagrammen von Temperatur und relativer Feuchte durchgeführt.

Laut WTA Merkblatt 6-2-01/D sind die zulässigen Grenzen der Unsicherheiten festzulegen und das Ausmaß der Fehlerfortpflanzung ist abzuschätzen. „Als Ergebnis der durchgeführten Rechnung [einer »Konkreten Fallstudie«] werden Zahlenwerte mit einem möglichst kleinen Unsicherheitsbereich erwartet.“ [WTA 2002, S. 3]. Dieser Unsicherheitsbereich wird jedoch nicht quantitativ definiert.

Beim dem internationalen Forschungsprojekt IEA Annex 41 wurden 17 verschiedene Programme für die thermische und hygrothermische Gebäudesimulation von insgesamt 39 Forschungseinrichtungen aus 19 Ländern getestet und bewertet [International Energy Agency 2008]. Die Bewertung und Gegenüberstellung der Daten erfolgte dabei hauptsächlich durch den Vergleich der Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte von kurzen Vergleichszeiträumen für sogenannte Common Exercises, bei denen von allen Partner derselbe reale oder generische Raum mit denselben Randbedingungen simuliert wurden.

Zusammenfassen lässt sich feststellen, dass für die Beschreibung und Bewertung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse für den Bereich der Präventiven Konservierung bisher keine Methode definiert ist, weder messbare Kriterien noch die Beschreibung der relevanten Kenngrößen sind derzeit vorhanden.

## **2.3 Statistische Methoden**

Insgesamt bietet die beschreibende Statistik eine Vielzahl von Werkzeugen, die eine Charakterisierung von Daten ermöglichen. Um die Qualität einer Simulation in Bezug zu Messdaten quantitativ zu beschreiben, müssen statistische Lagparameter und Zusammenhänge zwischen Datensätzen betrachtet werden. Eine Auswahl von unterschiedlichen Methoden der deskriptiven Statistik wird im Folgenden beschrieben.

### 2.3.1 Verteilung von Datensätzen

Die Verteilung von Datensätzen kann durch unterschiedliche statistische Lageparameter beschrieben werden, siehe u. a. [Stoyan 1993], die die Daten charakterisieren. Dabei findet zwangsläufig eine vereinfachte Wiedergabe eines unter Umständen komplexeren Datensatzes durch einzelne Zahlenwerte statt. Die Lageparameter können zum besseren Verständnis u. a. in Histogrammen, Dichtefunktionen oder Boxplots grafisch dargestellt werden. Die Methoden unterscheiden sich dabei, je nachdem, ob es sich um parametrische oder nicht parametrische Datensätze handelt (Tabelle 4). Bei Klimadaten handelt es sich um Zahlenwerte, also um metrische Daten. Während die parametrischen Methoden nur auf Zahlenwerte angewendet werden können, können die nichtparametrischen Methoden sowohl auf Zahlenwerte als auch auf andere Datensätze angewendet werden. Die aufgeführten nichtparametrischen Methoden haben den Vorteil, dass sie unabhängig sind von der Verteilung der Daten und weniger empfindlich gegenüber Ausreißern sind. Daher wird diesen robusten Methoden der Vorzug für die Bewertung der Simulationsergebnisse gegeben.

Tabelle 4: Auswahl der Methoden für die Beurteilung von parametrischen und nicht parametrischen Datensätzen. Die Korrelationskoeffizienten sind in Kapitel 2.3.2 näher beschrieben.

Frage	Methode	
	parametrisch	nicht parametrisch
Verteilung	Mittelwert	Median
Streuung	Standardabweichung $s$	Quantile
Ausreißer	Mittelwert $\pm 3 s$	1 % / 99 %-Quantil
Generelle Übereinstimmung	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson	Korrelationskoeffizient nach Spearman

### Verteilungen

Eine statistisch optimale Verteilung liegt in der Gauß'schen Glockenkurve als Normalverteilung vor. Eine solche Verteilung wird als unimodal (einheitlich) bezeichnet. Bei der Normalverteilung entspricht das Maximum der Glockenkurve dem arithmetischen Mittel oder Mittelwert (engl. Mean).

Die mittlere quadratische Abweichung der Messdaten vom Mittelwert wird als Standardabweichung ( $s$ ) bezeichnet. Normal verteilte Daten können allein durch die Standardabweichung und Mittelwert beschrieben werden. Für nicht normal verteilte Daten eignen sich Median und Quantile besser. Zur Untersuchung der Daten auf Normalverteilung existieren unterschiedliche Tests, beispielsweise nach Kolmogorov – Smirnov, der bei einem Signifikanzlevel von  $\alpha = 0,05$  erfüllt ist [Siegel 1988].

Eine robustere, nichtparametrische Möglichkeit der Beschreibung der Verteilung von Datensätzen bilden die Lageparameter. Diese können auch auf parametrische Daten angewandt werden. Die Daten werden dabei ihrer Größe nach sortiert und aneinander gereiht. Der Wert, der in der Mitte aller Messwerte liegt, wird Median genannt. Der Median wird durch Sortieren und Abzählen der Werte ermittelt. Im Vergleich zum Mittelwert ist er weniger anfällig gegenüber Ausreißern.

Weiterhin werden die Messwerte durch die Quantilen charakterisiert. Die Quantile teilen die Verteilung in bestimmte Segmente auf. Unterhalb des 20 %-Quantils liegen beispielsweise 20 % aller Werte. Zwischen dem 25 %- und 75 %-Quantil, den sog. Quartilen, liegen 50 %, also die Hälfte aller Werte.

Die Bestimmung der Extremwerte, Maximum und Minimum, sowie der 99 % und 1 %-Quantilen macht es möglich, Ausnahme-Ereignisse bzw. Ausreißer in Relation zum Mittelwert oder Median zu erfassen (siehe Bild 16 Mitte links). Der Umfang aller Messwerte wird als Spannweite = Maximum – Minimum (engl. *Range*) bezeichnet. Im Zusammenhang mit Klimadaten ist die Spannweite gleichbedeutend mit der Schwankungsbreite und kann für beliebige Intervalle – Jahr, Woche, Tag, Stunde – ermittelt werden.

### **Histogramme und Dichtefunktionen**

In Histogrammen und Dichtefunktionen werden Werte nach ihrer Häufigkeit grafisch dargestellt. Im Histogramm erfolgt eine Einteilung in Werte-Klassen. Die Klassenbreite ist dabei variabel, für die Darstellung der Klimadaten wird meist 1 % r.F. bzw. 1 °C gewählt (für ein Beispiel siehe Bild 16 unten links und Bild 25). In den Dichtefunktionen wird die Häufigkeit einzelner Wert prozentual in Bezug auf die Gesamtheit der Daten dargestellt, z. B. die Anzahl der Stunden die ein bestimmter Wert in einem Messjahr [h/a] vorkommt. Histogramme und Dichtefunktionen dienen der Visualisierung der Verteilung von Daten.

## Boxplots

In einem Boxplot (oder Variabilitäts-Schema) wird, wie in einem Histogramm, die Häufigkeit von Werten grafisch dargestellt. In einer eindimensionalen Darstellung werden bestimmte Lageparameter innerhalb der Messdaten, wie der Median und die Quartilen (25 % und 75 % Quantil), angezeigt und diese durch eine Box markiert. Über die Whisker, die spätestens bei der 1,5-fachen Länge der Box enden, werden die Ausreißer in Form von Punkten oberhalb der Whisker dargestellt. Extremwerte liegen mehr als 3 Boxlängen von einem der beiden Quartile entfernt und werden als Stern dargestellt (siehe Bild 15 und Bild 16 unten rechts). Dadurch lässt sich schnell ein Überblick über den Datenumfang gewinnen (vgl. auch Diagramme Anhang A bis Anhang D).

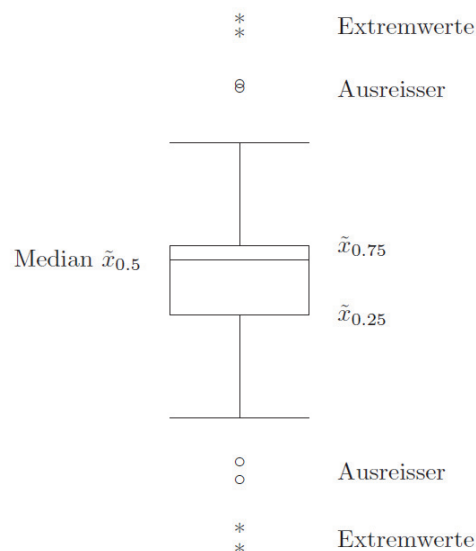


Bild 15: Komponenten eines Box-Whisker Plots nach [Toutenburg 2008].

Für die Bewertung des Raumklimas (siehe u.a. Bild 25) wird eine weitere, zweite Darstellung gewählt, die die größtmögliche Menge an Informationen enthält und dabei gleichzeitig übersichtlich ist. In der gewählten Darstellung liegen 80 % der Werte innerhalb der Box zwischen 10 %- und 90 %-Quantile. Vereinfacht betrachtet befinden sich die Werte größtenteils innerhalb dieses Korridors. Dort, wo die Box einknickt, liegen die beiden Quartile, die Whisker zeigen das 1 % und das 99 %-Quantil sowie Minimum und Maximum und damit die Spannweite der Daten über den betrachteten Zeitraum.

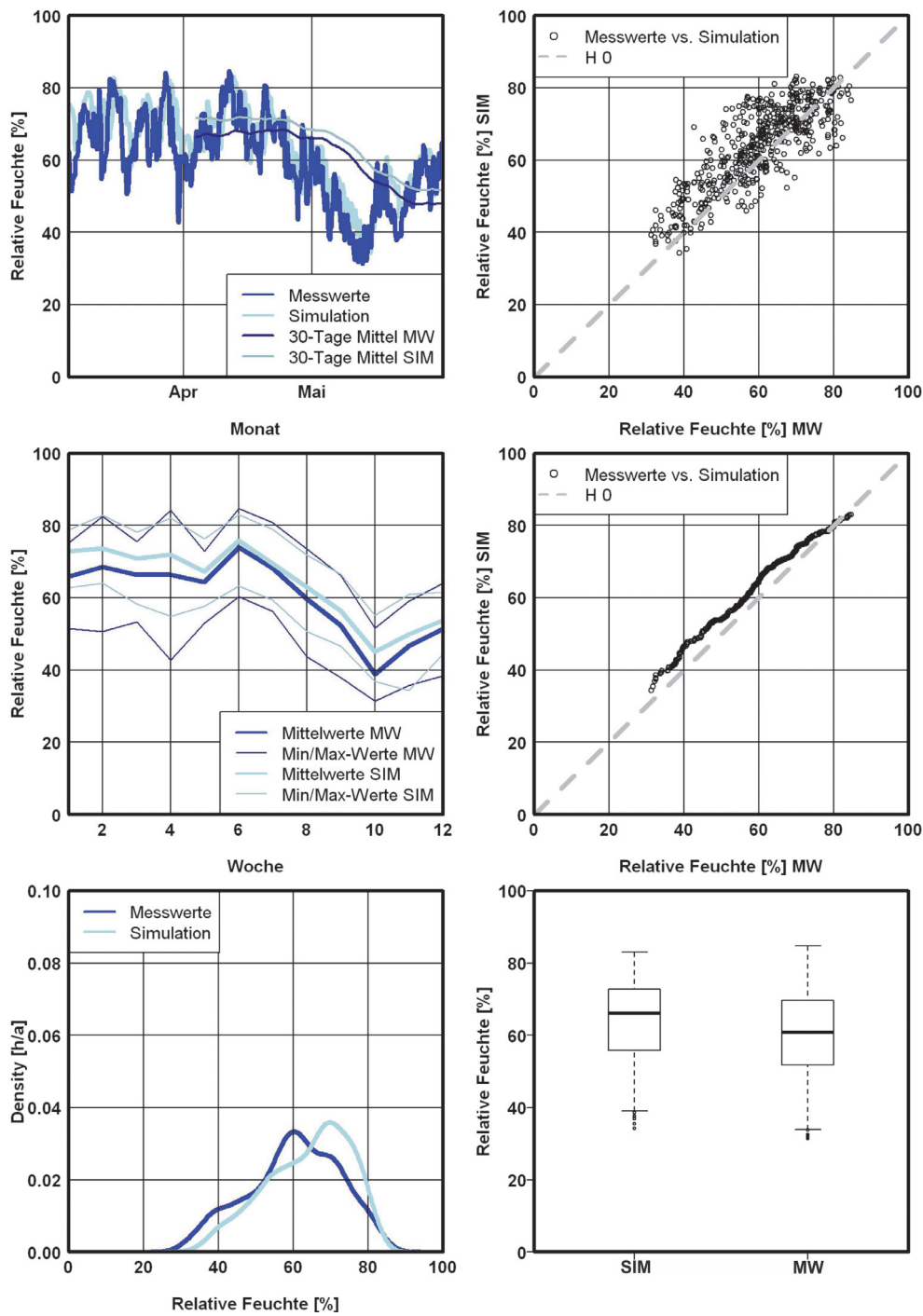


Bild 16: Schema zur grafischen Darstellung der Verteilungen zum Vergleich von Datensätzen, als vereinheitlichtes Auswertungsblatt im Anhang A bis D. Am Beispiel der Torhalle Lorsch (siehe auch Kapitel 6.3.5) wird deutlich, dass die Simulation (SIM) hier im Vergleich zu den Messwerten (MW) insgesamt zu feuchte Werte vorhersagt. Die Darstellung der Wochenmittelwerte zeigt, dass die Maximalwerte zwar gut abgebildet werden, nicht aber die Minimalwerte. Diese Art der Darstellung ermöglicht die schnelle Beurteilung von Ursachen von Abweichungen zwischen Simulation und Messwerten.



### 2.3.2 Vergleich von Datensätzen

Die Statistik bietet verschiedene Werkzeuge zum Vergleich von Datensätzen. Hier werden die für die Bewertung von Simulationsdatensätzen relevanten grafischen und analytischen Methoden vorgestellt.

#### **Streudiagramm (*Scatterplot*)**

Ein Streudiagramm oder *Scatterplot* stellt den Zusammenhang zweier Datensätze grafisch dar. Für die Risikoabschätzung des Raumklimas werden Diagramme mit Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte genutzt (für ein Beispiel siehe Bild 9, S. 42). Zum Vergleich von Datensätzen werden die unsortierten Datenpaare eines Parameters, z. B. simulierte und gemessene Daten der relativen Luftfeuchte, in einem 2-dimensionalen Diagramm unsortiert gegeneinander aufgetragen (vgl. Bild 16 oben rechts und Anhang A bis Anhang D). Dabei wird deutlich, ob ein linearer Zusammenhang zwischen Messwerten und Simulation besteht, der mit dem Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson quantitativ ausgedrückt werden kann. Da in Anhang A der Unterschied zwischen den beiden Datensätzen künstlich mit einer linearen Funktion generiert wurde, erscheinen die Streudiagramme dort als Linien. Bei den Messdaten wird die Streuung um die Winkelhalbierende, die eine ideale Übereinstimmung beschreiben würde, deutlich. Streudiagramme ermöglichen einen schnellen Überblick über die Güte der Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Messdaten gegenüber den Simulationsdaten.

#### **Korrelationskoeffizienten**

Korrelationskoeffizienten zeigen die Tendenz für einen Zusammenhang zwischen 2 Datensätzen auf. Dabei ist zu unterscheiden in die Betrachtung a) eines linearen Zusammenhangs von Datenpaaren entsprechend ihrer Lage innerhalb einer Zeitreihe und b) eines monotonen Zusammenhangs von ihrer Größe (bzw. ihrem Rang) nach sortierten Daten.

- a) Wird durch Betrachtung des Streudiagramms (*Scatterplot*) der beiden Datensätze klar, dass ein hinreichender linearer Zusammenhang zwischen den Datensätzen besteht, so kann dieser numerisch durch den empirischen Korrelationskoeffizient  $r$  nach Bravais-Pearson beschrieben werden, siehe [Fahrmeir 2010]. Der empirische Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson beschreibt den linearen Zusammenhang zweier Datensätze. Je näher die Punkte im Streudiagramm an einer Geraden liegen, desto näher liegt  $r$  bei 1. Er errechnet sich aus den Abweichungen aller Wertepaare der Punktwolke zu deren Schwerpunkt, der durch die arith-

metischen Mittel der Verteilungen definiert wird.

Der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson ermittelt sich aus den Daten  $(x_i, y_i)$  für  $i=1, \dots, n$  durch

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Da gänzlich verschiedenen Verteilungen den gleichen Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson ergeben können, ist es notwendig, Scatterplot und QQ-Plot ebenso zu betrachten.

- b) Bei nicht normal verteilten Daten wird bevorzugt der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman verwendet. Dabei werden die beiden Datensätze sortiert und in Rangskalen überführt. Für jedes Wertepaar wird die Differenz in den Rängen ihrer Variablen ermittelt und mit dieser die Kenngröße  $r_{sp}$  bestimmt. Ein Koeffizient  $r_{sp}=1$  würde bedeuten, dass bei beiden Datensätzen gelten würde, dass für alle  $x_i$  alle  $y_i$  monoton ansteigen würden. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman misst also nicht einen linearen Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen, sondern einen monotonen oder die Übereinstimmung der Abfolge der einzelnen Wertebereiche.

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ermittelt sich aus den sortierten Daten  $(x_i, y_i)$  für  $i=1, \dots, n$  durch

$$r_{sp} = \frac{s_{R_{xy}}}{s_{R_x} \cdot s_{R_y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{xi} - \overline{R_X})(R_{yi} - \overline{R_Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{xi} - \overline{R_X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{yi} - \overline{R_Y})^2}}$$

Beide Korrelationskoeffizienten sind dimensionslos, und liegen im Wertebereich zwischen -1 und +1. Eine grobe Richtlinie zur Einordnung des Korrelationskoeffizienten nach Bravis-Pearson gibt [Fahrmeir 2010], Tabelle 5. Diese Einordnung gilt insbesondere für relativ exakt gemessene Werte, wie es bei den vorliegenden Mess- und Simulationsdaten der Fall ist. Ein Test auf Normalverteilung zur Entscheidung, welchem Korrelationskoeffizienten ggf. der Vorzug zu geben ist, kann nach Kolmogorov-Smirnov erfolgen. [Siegel 1988]

Tabelle 5: Schema zur Einordnung des Bravis-Pearson Korrelationskoeffizienten  $r$  nach [Fahrmeir 2010].

Wert von $r$	Interpretation
nahe bei Null	Kein linearer Zusammenhang
$ r  < 0,5$	Schwache Korrelation
$0,5 <  r  < 0,8$	Mittlere Korrelation
$ r  > 0,8$	Starke Korrelation
$ r  = 1$	Vollständige Korrelation

### Quantil-Quantil-Diagramm (*QQ-Plot*)

Bei einem Quantil-Quantil-Diagramm oder *QQ-Plot* werden die Datensätze ihrer Größe nach sortiert gegeneinander aufgetragen [Toutenburg 2008]. Das Ergebnis ist eine Kurve, die die beiden Datensätze unabhängig vom zeitlichen Verlauf gegenüberstellt (vgl. Bild 16 Mitte rechts). Bei gleicher Verteilung der Daten ergibt sich eine Ursprungsgerade mit Steigung 1. In QQ-Plots ist es leicht möglich, abzulesen, in welchen Bereichen Messung und Simulation gut oder nicht gut übereinstimmen und damit die Bereiche zu identifizieren, die bei der Kalibrierung des Simulationsmodells verbessert werden müssen (siehe auch Kapitel 6.3.5, Bild 51 und Bild 52).

## Ferro-Hypothesen

Als Beispiel für einen Hypothesentest für den statistischen Vergleich von zwei Datensätzen werden sogenannten Ferro-Hypothesen vorgestellt. [Ferro 2005] stellt vier Hypothesen auf, auf die zwei unabhängige Datensätze getestet werden. Die Hypothesen und ihre Bedeutung sind in Bild 17 grafisch als Boxplots dargestellt.

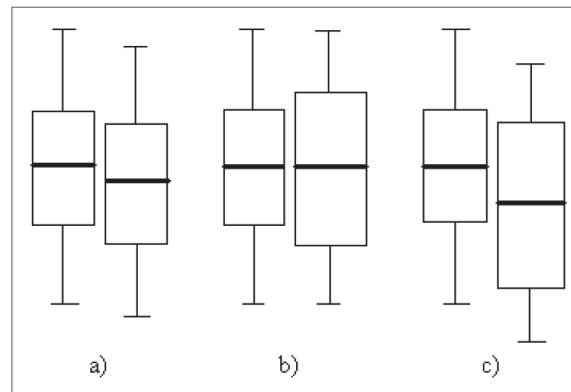


Bild 17: Hypothesen nach Ferro. a) Hypothese HL zeigt einen Unterschied in der Lage, b) Hypothese HS in der Größe und c) HLS in Lage und Größe des Datenumfangs [Schöpfer 2011].

Die Hypothesen werden zusammen mit einem QQ-Plot grafisch aufgetragen und beziehen sich dabei auf die lineare Beziehung zwischen den Datensätzen mit:

$$H_o : y_p = x_p$$

$$H_S : y_p = \sigma_Y (x_p / \sigma_X)$$

$$H_L : y_p = \mu_Y + (x_p - \mu_X)$$

$$H_{LS} : y_p = \mu_Y + \sigma_Y (x_p - \mu_X) / \sigma_X$$

$x_p$       Datensatz 1

$y_p$       Datensatz 2

$\mu$         Erwartungswert

$\sigma$         Streuung

wobei gilt  $-\infty < z < \infty$  und  $\mu_X, \mu_Y, \sigma_X, \sigma_Y > 0$

Die Nullhypothese  $H_0$  unterstellt die optimale Übereinstimmung zwischen den Datensätzen und wird im Diagramm als 45° Linie durch den Ursprung dargestellt.  $H_S$  zeigt den Unterschied in der Streckung (*Scale*),  $H_L$  den Unterschied in der Lage (*Location*).  $H_{LS}$  kombiniert die beiden letzteren und zeigt die Unterschiede der Datensätze in *Scale* und *Location* auf. Zusätzlich sind im Diagramm die einzelnen Datenpunkte als QQ-Plot aufgetragen, d.h. beide Datensätze werden sortiert miteinander verglichen. „Die rechte Seite der Gleichungen stellt dabei die Quantile der Verteilung  $F$  dar, die so angepasst wurden, dass sie den Quantilen der Verteilung  $G$  entsprechen. Die entsprechend der Hypothesengleichungen berechneten Quantile werden in einem QQ-Plot gezeigt. In der Graphik werden dazu die Plots von  $H_0$ ,  $H_S$ ,  $H_L$ ,  $H_{LS}$  und der ursprüngliche QQ-Plot der Verteilungen dargestellt. Die Geraden der Hypothesen werden in der Graphik mit dem ursprünglichen QQ-Plot verglichen. Die Hypothesengerade, die den QQ-Plot am besten beschreibt, zeigt, worin die Ursache für Unterschiede zwischen den Verteilungen liegt.“ [Schöpfer 2011] Für ein Beispiel siehe Bild 51 und Bild 52.

Die Hypothesen nach Ferro werden bisher in der Klimawandelsimulation für den Vergleich von Wetterdaten eingesetzt und bieten die Möglichkeit, zwei Datensätze generell miteinander zu vergleichen und die Ursachen von Abweichungen mathematisch zu beschreiben.

## 3 Hygrothermische Simulation historischer Gebäude

Ausgehend von der Bewertung des Standes des Wissens, zeigt dieses Kapitel die methodische Vorgehensweise für die hygrothermische Simulation von historischen Gebäude auf und beschäftigt sich mit den Unsicherheiten durch die Eingabeparameter und Randbedingungen.

### 3.1 Vorgehensweise für historische Gebäude

Die Untersuchung des Raumklimas in einem historischen Gebäude macht interdisziplinäre Zusammenarbeit unabdingbar, siehe hierzu auch [WTA 2011]. Die Fragestellung kommt in der Regel von der Seite der Nutzer, der eine Veränderung eines Gebäudes oder seiner Nutzung plant. Da Veränderungen des Raumklimas die Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung betreffen können, werden beratende Konservatoren hinzugezogen. Hygrothermische Simulationen stellen eine Möglichkeit die Wirkung solcher Veränderungen vorherzusagen und werden daher immer häufiger auch im Kontext historischer Gebäude und Museen eingesetzt. Die eigentliche Simulation und Kalibrierung des Modells wie auch die Variantenrechnungen werden dann von einem Spezialisten für hygrothermische Fragestellungen durchgeführt. In diesem interdisziplinären Zusammenspiel müssen zu Beginn die Ziele der Simulation, die relevanten Schadensprozesse und Bewertungskriterien gemeinsam mit allen Beteiligten definiert werden (vgl. Bild 2).

Die Definition der Ziele und der relevanten Schadensprozesse kann bzw. muss in der Regel zeitlich vor der eigentlichen Simulation stehen, da dabei die notwendigen Daten für die Kalibrierung und Validierung des Modells festgelegt werden. Das Raumklima und die Außenklimabedingungen, aber auch die relevanten Randbedingungen, wie die Nutzung des Gebäudes, das Öffnen von Türen und Fenstern, Verschattung, der Betrieb von Heizungen oder Klimatechnik, Besucherzahlen, etc. sollten zumindest für den Zeitraum eines Jahres vor Ort detailliert gemessen und dokumentiert werden. Wird beispielsweise die Oberflächentemperatur einer Außenwand hinter einem Gemälde in der Simulation mit betrachtet, so sind für die Kalibrierung des Modells entsprechende Messungen über einen längeren Zeitraum notwendig.

Aus den oben definierten Zielen und Schadensfunktionen leiten sich die relevanten Eingabe-Parameter für die Simulation ab, die in der Gebäudeaufnahme bestimmt werden müssen. Diese Parameter müssen später auch bei der Kalibrierung der Simulation berücksichtigt werden und dort in einem realistischen Rahmen liegen. Sensitivitätsanalysen dienen der Abschätzung unbekannter bzw. unsicherer Parameter bei der Kalibrierung des Modells und ermöglichen auch die Einstufung der zur Erreichung der Ziele notwendigen Genauigkeit. Am Ende steht die Möglichkeit, mit dem kalibrierten Modell Variantenrechnungen durchzuführen, um die Antworten auf die zu Beginn des Prozesses aufgeworfenen Fragestellungen zu ermitteln.

### **Ablauf der hygrothermischen Simulation eines historischen Gebäudes in der Übersicht**

1. Definition der Ziele der Simulation  
(Analyse von Schadensprozessen, Vorhersage von baulichen Veränderungen, Nutzung, technische Gebäudeausrüstung, Klimawandel, etc.)
2. Ermittlung der relevanten Schadensprozesse und Risiken /  
Festlegung der Bewertungskriterien in Hinblick auf Schadensfunktionen
3. Festlegung und Ermittlung der relevanten Eingangsgrößen für die Simulation, Messung von Raum- und Außenklima
4. Durchführung, Bewertung und iterative Kalibrierung des Modells mittels Sensitivitätsanalysen und Modifikation der relevanten Parameter und Validierung
5. Simulatorische Bearbeitung der Fragestellung mit dem kalibrierten / validierten Modell / Variantenbetrachtung
6. Dokumentation des Modells und der Varianten

#### **3.1.1 Definition der Ziele der Simulation**

Zu Beginn steht eine Fragestellung, die einer Klärung bedarf. Das kann die Erforschung eines Schadensprozesses sein, aber auch die konkrete Frage nach den Auswirkungen von bestimmten Maßnahmen oder anderen Veränderungen auf das Raumklima. Diese Maßnahmen können konservatorische Gründe haben, wie die Verbesserung des Raumklimas zur Vermeidung von Schäden an Kunstwerken, oder aber auch rein organisatorischer Art sein, wie eine Änderung der Nutzung eines Gebäudes, die bauliche Maßnahmen oder neue Klimatechnik notwendig macht.

### **3.1.2 Ermittlung der relevanten Schadensprozesse**

Veränderungen am komplexen Gefüge eines historischen Gebäudes führen immer auch zu Veränderungen des Raumklimas. Das bedingt die Frage nach Änderungen der Bedingungen für die Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung. Die relevanten Schadensprozesse müssen daher in dem jeweiligen Fall identifiziert werden und in der Bewertung der Simulation mit betrachtet werden. Die Schadensprozesse müssen in der Simulation hinreichend genau wieder gegeben werden. Dazu ist eine fallweise Festlegung der jeweils relevanten Bewertungskriterien notwendig (siehe Kapitel 5). Beispielsweise müssen bei der Betrachtung des Risikos für Schimmelpilzwachstum die Bereiche hoher relativer Luftfeuchte besonders gut dargestellt sein. In einem solchen Fall muss die Simulation besonders für diesen Bereich gut kalibriert werden. Sollen hingegen die kurzzeitige Schwankungen betrachtet werden, so ist deren korrekte Abbildung notwendig.

### **3.1.3 Festlegung und Ermittlung der relevanten Eingangsgrößen**

Die erforderlichen Randbedingungen und Eingabeparameter für hygrothermische Gebäudesimulationen sind in Tabelle 2 auf Seite 47 dargestellt. Diese lassen sich nach ihrem Einfluss auf das Berechnungsergebnis Raumklima in relevantere und weniger relevante Parameter unterteilen (Tabelle 6). Trotzdem ist eine Fallweise Betrachtung notwendig, da jedes historische Gebäude seine individuellen, klimatischen Besonderheiten hat. Wichtig ist die Erfassung nicht nur der Umschließungsflächen sondern auch der Ausstattung, die erheblich zur Stabilisierung des Raumklimas in Hinblick auf Schwankungen der relativen Luftfeuchte und Temperatur beitragen kann.

### **Geometrie des Gebäudes**

Die exakte Geometrie ist für die Simulation nur von untergeordneter Bedeutung, da in den hygrothermischen Raummodellen allein die Flächenanteile bilanziert werden. Wichtig ist deren korrekte Wiedergabe, auch der Flächenanteile der Ausstattung, die als zusätzliche Komponenten in die Simulation mit eingegeben werden können. Komplexe Architekturformen und geometrische Details wie Versprünge oder Hohlkehlen an Decken werden nicht mit abgebildet und müssen bei der Flächenberechnung entsprechend als Korrektur mit berücksichtigt werden. Ist die Betrachtung von lokalen Luftströmungen gefragt, sind andere Modelle wie z. B. CFD Simulationen notwendig. Die exakte Geometrie und Konstruktion historischer Gebäude sind meist nur schwer zu ermitteln. Oft sind keine oder nur unzureichende Informationen zur Baukonstruktion vorhan-



den, da bauzeitliche Pläne oder eine exakte, verformungsgerechte Bauaufnahme durch den Eigentümer oder die Bauforschung häufig fehlen.

### **Masseströme**

Das Raumklima wird grundsätzlich in einem hohen Maß von den Masseströmen mit angrenzenden Zonen und der Außenluft bestimmt, da das Raumvolumen gegenüber dem Volumen der oberflächennahen Schichten, die einen Einfluss auf die Sorptionsprozesse haben, deutlich größer ist. Geht man bei einem leeren Raum mit dem Volumen  $5 \times 5 \times 2 \text{ m}^3$  davon aus, dass die ersten 2 cm der Innenwandoberfläche durch Prozesse der Feuchtepufferung und Wärmespeicherung einen kurzfristigen, aktiven Einfluss auf das Raumklima haben, so stehen  $50 \text{ m}^3$  Raumvolumen gerade einmal  $1,8 \text{ m}^3$  eines mehr oder weniger porösen und diffusionsoffenen Baustoffs gegenüber. Die höchste Relevanz liegt daher bei der Luftwechselrate, die den Massestrom zwischen Innenraum und Außenluft bestimmt (siehe Formel (4), Kapitel 2.2.5). Ein Problem stellt dabei die korrekte messtechnische Erfassung des Luftwechsels dar, da eine kontinuierliche Messung nur in den wenigsten Fällen möglich ist. Jegliche Nutzung eines Gebäudes, wie das Öffnen von Türen und Fenstern, aber auch Änderungen der Witterungsbedingungen außen, führen zu Schwankungen der Luftwechselrate [Kilian 2004]. Falls kein zeitliches Profil der Luftwechselrate zu ermitteln ist, sollte ein robuster Mittelwert verwendet werden, der für verschiedene Jahreszeiten beispielsweise über ein passives Tracergasverfahren [Holmberg 1999] ermittelt werden kann. Bei zonalen Modellen sind die Raten des interzonalen Austausches und das Klima der angrenzenden Räume zu berücksichtigen. Je geringer die Massenströme sind, desto höher wirkt sich auf der anderen Seite wiederum der Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf das Raumklima aus. So spielen beispielsweise bei einem Archiv- oder Depotbau mit sehr niedrigem Luftwechsel die feuchtepuffernden Eigenschaften der großen Masse des archivierten Sammlungsguts eine erhebliche Rolle bei der Klimastabilisierung.

### **Außenklima**

Aufgrund der hohen Relevanz der Massenströme und des Infiltrationsluftwechsels sind die Parameter des Außenklimas entsprechend wichtig für das Modell. Für eine konkrete Fallstudie, wie sie die Simulation des Raumklimas eines historischen Gebäudes immer darstellt, ist die Erfassung der Klimadaten in der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes notwendig, vor allem für relative Luftfeuchte und Temperatur. Klimadaten von weiter entfernten Orten, wie z. B. von einer 20 km entfernten Wetterstation an einem Flughafen außerhalb einer Stadt, können zu erheblichen Abweichungen in der Simulation führen.

Tabelle 6: Vorgeschlagene Bewertung der Relevanz der Eingabeparameter für die hygrothermische Gebäudesimulation von historischen Gebäuden (0 = geringe Relevanz, +++ = sehr hohe Relevanz).

<b>Datensätze oder Eingabeparameter</b>	<b>Relevanz</b>
Geometrische Details / Aufmaß des Gebäudes	0 / +
Aufbau des zu berechnenden Bauteils	+
Rohdichte und Porosität	+
spezifische Wärmekapazität	+
feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit	+
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	++
Feuchtespeicherfunktion	0 ... ++
diffusionsäquivalente Luftschichtdicke der Oberflächenbeschichtung	++
Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterleitung	0 ... +
Temperatur außen	+ ... ++
relative Feuchte außen	+ ... ++
kurzweilige Strahlung / Verschattung	0 ... ++
Windgeschwindigkeit und -richtung	0 ... ++
Niederschlag auf die Bauteiloberfläche	0 ... +
Temperatur angrenzende Zone	+ ... ++
relative Feuchte angrenzende Zone	+ ... ++
Infiltrationsluftwechsel	+++
Austausch mit angrenzenden Zonen	+ ... +++
Wärme- / Feuchteübergangskoeffizient	0 ... + / 0 ... +
Strahlungsabsorptions- und -emissionsgrad	0 ... +
Regenabsorptionsfaktor (außen)	0 ... +
Klimatechnik und Heizung	++
Besucher	++
sonstige Quellen und Senken	0 ... ++

Optimal ist die Verwendung eines belüfteten Temperatur- und Feuchtefühlers, wie er bei Wetterstationen zum Einsatz kommt, da bei unbelüfteten Fühlern die Phasen der Betauung unter Umständen länger dauern können und damit Messwerte mit zu hoher relativer Luftfeuchte ausgegeben werden und länger andauern können als in Realität.

Die weiteren Wetterparameter spielen in der Regel dagegen eine eher untergeordnete Rolle. Die kurzweilige Strahlung auf opake Bauteile hat lediglich einen geringen Anteil an der Wärmebilanz eines Raumes in Form des Wärmestroms, der durch die Raumbooberflächen fließt. Der Anteil ist abhängig vom Strahlungsabsorptions- und -emissionsgrad der Außenoberfläche. Der Emissionsgrad ist für die meisten mineralischen und natürlichen Baustoffe annähernd gleich und liegt näherungsweise bei 0,9. Metalle weisen einen zum Teil deutlich geringeren Emissionsgrad auf. Der Absorptionsgrad ist von der Farbe des Baustoffs abhängig und ist bei dunklen Farben generell einen höher als bei hellen.

In Hinblick auf thermische solare Gewinne kann die kurzweilige Strahlung jedoch auch erheblichen Einfluss haben, je nach Anteil der Fensterfläche und Ausrichtung eines Gebäudes.

Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind vor allem dann relevant, wenn in der Kombination mit Niederschlag durch Schlagregen und entsprechendem Regenabsorptionsfaktor außen in einem hohen Maß Feuchte in ein Bauwerk eingetragen wird, wie z. B. bei den mittelalterlichen Backsteinkirchen in Vorpommern, die durch den häufigen Niederschlag auf den Außenwänden bei konstant hoher Außenluftfeuchte eine dauerhafte, massive Durchfeuchtung aufzeigen [Weiß 2010]. Windrichtung und Windgeschwindigkeit sind auch von Relevanz bei undichten Konstruktionen, da sie einen Einfluss auf die Infiltrationsrate haben. Das setzt jedoch voraus, dass das Simulationswerkzeug in der Lage ist, den Luftwechsel aus diesen beiden Parametern entsprechend zu modellieren.

### **Stoffkennwerte**

Die thermische Simulation ist gegenüber der hygrischen weniger sensibel auf Einflussparameter. Thermische Prozesse laufen nach linearen Modellen ab, die entsprechenden Kennwerte sind messtechnisch einfach zu bestimmen. Die thermischen Kennwerte spezifische Wärmekapazität, feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit sowie Rohdichte und Porosität haben insgesamt nur einen untergeordneten Einfluss auf die Dynamik des Raumklimas.

Hygrische Prozesse sind dagegen in einem hohen Maße nicht-linear, wie das Beispiel der Hysterese-Funktion bei Adsorption und Desorption zeigt. Auch sind

Aufwand und Dauer deutlich höher für die Messung der Materialkennwerte. Die Transport-Prozesse laufen dynamischer ab und betreffen vor allem die oberflächennahen Schichten eines Baustoffs. Daher hat der Aufbau des gesamten Bauteils für die Simulation der relativen Luftfeuchte im Raum eine geringere Relevanz als die hygrischen Eigenschaften der oberflächennahen Materialien.

Für Prozesse der Feuchtepufferung und -abgabe sind die Feuchtespeicherfunktion, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  und die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  der Oberflächenbeschichtung relevant. Beim  $s_d$ -Wert reichen bereits geringe Werte von wenigen Zentimetern aus, um die Feuchtepufferung erheblich zu reduzieren. Diese Werte sind für historische, gealterte Materialien nur in sehr geringem Umfang bekannt – weder für Kunstwerke und Ausstattung noch für Baumaterialien und Putz- und Anstrichsysteme. Es ist aber auch wegen der meist wertvollen originalen Oberflächen normalerweise unmöglich, Öffnungen in der Konstruktion anzulegen, um beispielsweise einen Wand- oder Deckenaufbau für die Simulation mit allen Maßen und Materialien der einzelnen Schichten zu ermitteln. Die bauphysikalischen Kenngrößen können daher meist nur durch Rekonstruktion oder Messung eines ähnlichen Materials messtechnisch ermittelt werden. Alternativ können für die Feuchtepufferung mittels Sensitivitätsanalysen unbekannte Werte in einem iterativen Verfahren für den gesamten Raum angenähert werden.

Die Flüssigleitfunktionen für Weiterleitung und kapillares Saugen ( $w$ -Wert) sind in der Gebäudesimulation dagegen nur dann relevant, wenn Feuchte in einem hohen Maß durch Schlagregenbelastung oder anstehende Feuchte vorliegt.

Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten können bei ungeheizten historischen Gebäuden, die meist eine homogene Temperaturverteilung haben und geringe Luftgeschwindigkeiten, mit Standardkennwerten gerechnet werden und spielen in der Regel eine untergeordnete Rolle. Der Feuchteübergangskoeffizient ist nur schwer messtechnisch zu ermitteln und wird meist näherungsweise aus dem konvektiven Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt. Bei beheizten Gebäuden und höheren Luftgeschwindigkeiten müssen sie in der Simulation berücksichtigt werden.

### **Quellen und Senken**

Relevant sind grundsätzlich alle Quellen und Senken von Feuchte und Wärme, die einen Einfluss auf das Raumklima haben. Bei historischen Gebäuden, die oft für Besucher zugänglich sind, hat die Nutzung eine besonders hohe Relevanz. Besucher stellen Quellen von Wärme und Feuchte dar, über Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion, und Feuchteabgabe über Atmung, Transpira-

tion oder auch feuchte Kleidung. Daher ist deren exakte Erfassung eine wichtige Grundlage für das Modell.

Klimatechnik und Beheizung haben massive Auswirkungen auf das Raumklima. Für ein Simulationsmodell eines beheizten Gebäudes ist es entscheidend, dass die Leistung pro Zeit erfasst ist und in die Simulation mit einfließen kann. Andernfalls kann ein solches Gebäude nicht korrekt simuliert werden.

Weitere Quellen und Senken, wie beispielsweise Mauerfeuchte in Folge aufsteigender Bodenfeuchte oder wiederkehrende „Sommer“-Kondensation an kalten Oberflächen, müssen bei der Gebäudeaufnahme für das konkrete Gebäude identifiziert und im Simulationsmodell korrekt abgebildet werden.

### **3.1.4 Durchführung, Bewertung und Kalibrierung der Simulation mittels Sensitivitätsanalysen und Validierung**

Nach der Bestimmung aller relevanten Randbedingungen und deren Eingabe in die Simulationssoftware wird eine erste Simulation durchgeführt.

Das Ergebnis wird mit gemessenen Klimadaten abgeglichen und nach festgelegten Kriterien (siehe Kapitel 4 und 5) in Hinblick auf die korrekte Abbildung der statistischen Lageparameter und der relevanten Schadensfunktionen bewertet. In der Folge beginnt ein Prozess der Kalibrierung des Modells, bei dem Simulation und Messung iterativ angeglichen werden, mit dem Ziel als Endergebnis ein möglichst realitätsnahes Simulationsergebnis zu erhalten, das die zuvor festgelegten Kriterien erfüllt. Dazu werden Sensitivitätsanalysen benutzt, bei denen charakteristische Parameter mit einem hohen Einfluss auf das Raumklima identifiziert und dann in einem realitätsnahen Rahmen variiert werden.

Es ist darauf zu achten, dass die relevanten Einflüsse für das jeweilige Gebäude berücksichtigt werden. Für Schloss Linderhof überwiegt beispielsweise der Einfluss der Besucher und des Luftwechsels gegenüber der Feuchtepufferung der inneren Oberflächen, während diese beim Schachenhaus einen erheblich höheren Einfluss auf das Raumklima und damit auf das Ergebnis der Simulation haben. Auch dürfen keine künstlichen Effekte erzielt werden, beispielsweise durch eine unrealistische Überhöhung der Besucherzahlen.

Die Validierung muss mit einem zweiten, unabhängigen Datensatz erfolgen, der gesondert erhoben wurde. Erst die Validierung zeigt, ob die Kalibrierung erfolgreich und realitätsnah war.

### **3.1.5 Variantenrechnungen**

Mit dem kalibrierten Modell sind Variantenrechnungen möglich. Dabei muss berücksichtigt werden, dass auch die Änderung von Parametern im Modell, wie die Veränderung der Baukonstruktion oder die Simulation einer Klimaanlage wiederum Unsicherheiten in sich bergen. Da diesbezüglich eine Validierung an realen historischen Gebäuden in den seltensten Fällen möglich sein wird, ist es hier wichtig darauf zu achten, wie gut das jeweilige Simulationstool selbst für die jeweilige Fragestellung validiert ist.

Für eine Verallgemeinerung der Ergebnisse, die mit dem kalibrierten Modell für ein bestimmtes Jahr erstellt wurden, ist die Nutzung von Testreferenzjahren möglich, die typische Wetterereignisse abbilden, sofern es für den jeweiligen Standort verfügbar ist. Ggf. kann auch ein ungünstiges Jahr, z. B. ein besonders kaltes oder warmes Jahr für die Betrachtung genutzt werden.

### **3.1.6 Dokumentation des Modells und der Varianten**

Abschließend müssen das Modell und die Varianten hinreichend genau dokumentiert werden, damit die einzelnen Schritte, Randbedingungen und Ergebnisse nachvollziehbar sind. Eine Methodik und grundlegende Anforderungen zur Dokumentation der Ergebnisse von numerischen Simulationsberechnungen gibt [WTA 2002].

## **3.2 Grenzen und Unsicherheiten**

Die Ungenauigkeit der Eingabedaten führt notwendigerweise zu einer entsprechenden Unsicherheit der Rechenergebnisse. Dabei tragen verschiedene Bereiche des Modells zu Verlusten bei der Genauigkeit bei. Ziel jeglicher Simulationen ist es, die Realität mit vertretbarem Aufwand hinreichend genau zu beschreiben, sodass die Unsicherheiten einerseits zwar berücksichtigt und andererseits aber gegen den Aufwand der Simulation abgewogen werden müssen.

### **3.2.1 Eingabeparameter**

Grundsätzlich liegen die Unsicherheiten zunächst bei den Eingabeparameter der Geometrie und der Materialeigenschaften, die vor allem bei historischen Räumen auf Grund von Inhomogenitäten und komplexen Raumsituationen immer nur näherungsweise bestimmt und modelliert werden können.

### 3.2.2 Wetterdaten

Für die exakte Darstellung eines Simulationsmodells sind die genauen Wetterdaten des jeweiligen Standortes relevant. Die Nutzung von Daten eines anderen Standorts bzw. einer Wetterstation in der weiteren Umgebung, bspw. die eines Flughafens, kann zu erheblichen Unsicherheiten und Abweichungen führen, wie das Beispiel der Simulation des Schachenhauses zeigt, bei der für das Jahr 2006 und 2007 keine Wetterdaten vor Ort vorlagen und daher Daten vom Hohenpeißenberg und der Zugspitze genutzt werden mussten (siehe Kapitel 6.1).

### 3.2.3 Klimamessung

Die exakte Messung des Innenraumklimas ist vor allem deshalb wichtig, da die Genauigkeit der Messung wiederum Auswirkungen auf die Genauigkeit der Kalibrierung hat. Die Verwendung von Sensoren mit einer bestimmten Genauigkeit bedeutet, dass bei der Kalibrierung des Modells genau dieselbe Unsicherheit in der Lage der tatsächlichen Werte existiert.

Die Messung des Raumklimas, die die Grundlage für die Kalibrierung der Modelle darstellt, ist also bereits mit Unsicherheiten behaftet. Die betrifft zunächst die absolute Genauigkeit der Messung an sich. Bei Thermohygrographen liegt diese nach [Brown 1994] bei  $\pm 5 - 10 \% \text{ r.F.}$ , bei elektronischen Sensoren bei ca.  $\pm 1,5$  bis  $3 \% \text{ r.F.}$ , abhängig vom Feuchtebereich und den verwendeten Sensortypen. Vor allem im Hochfeuchtebereich, der für die Messung des Außenklimas relevant ist, sind hochwertige Sensoren notwendig, die im Optimalfall luftumspült sind. Dies setzt aber eine entsprechende Qualitätskontrolle und die regelmäßige Kalibrierung der Sensoren voraus, die auch durch Alterung an Genauigkeit einbüßen [Brown 1994], [Holmberg 1995]. Die Temperaturmessung mit PT100 Sensoren erreicht Genauigkeiten von  $\pm 0,1 \text{ K}$ , bei kombinierten Sensoren sind die Genauigkeiten deutlich geringer. Die derzeit gebräuchlichen Sensirion® Sensoren, die relative Feuchte und Temperatur in Kombination messen, liegen bei ca.  $\pm 0,3$  bis  $0,5 \text{ K}$  und für die Feuchte bei ca.  $\pm 1,5$  bis  $2 \% \text{ r.F.}$  Vor allem beim Vergleich der absoluten Feuchtegehalte, die aus der relativen Feuchte und der Temperatur berechnet werden und den Einfluss des Außen- auf das Innenklima aufzeigen, ist eine genaue Temperaturmessung unumgänglich. Diese ist auch für die korrekte Ermittlung der Massenbilanzen in der Simulation notwendig.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verteilung des Klimas im Raum, der gemessen bzw. simuliert werden soll. Die Gebäudesimulation gibt einen Wert für das Raumklima aus, der für die Luft in Raummitte gilt. Tatsächlich existieren aber

oft lokal mehr oder weniger stark ausgeprägte Mikroklimata in Räumen [Camuffo 2002]. So ist der Punkt, an dem gemessen wird, auch relevant für die Korrelation von Messung und Simulation. Der italienische Standard UNI10829 [Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 21.6.1999] für die Messung von Temperatur und Feuchte schlägt daher ein 2-stufiges Verfahren vor. Eine kontinuierliche Messung an einer oder mehreren repräsentativen Stellen wie auch die diskontinuierliche Messung der Verteilung von Temperatur und Feuchte in Räumen zu unterschiedlichen Jahreszeiten. Damit wird eine Einordnung der kontinuierlich gemessenen Daten geschaffen, die Rückschlüsse für eine bessere Risikoabschätzung ermöglicht.

### **3.2.4 Zeitliche Nutzungsprofile**

Ein Punkt, der in der Simulation mit am schwersten abzubilden ist, sind zeitliche Profile und Änderungen beim Luftwechsel oder andere, nicht dokumentierte oder messbare Eingriffe in das Raumklima durch den Nutzer. Daher ist für Messungen die Verwendung eines Logbuchs ratsam, in der der Nutzer besondere Ereignisse vermerkt.

### **3.2.5 Bedeutung für die Simulation historischer Gebäude**

Ausnahmeereignisse können in der Simulation nur selten richtig abgebildet werden. So kann beispielweise ein Sturm bei einem Wettersturz zu einer temporär hohen Luftwechselrate führen, die in Modell unter Umständen nicht dargestellt werden kann und damit zu einer Änderung von Temperatur und relativer Luftfeuchte, die in Realität höher ist, als der simulierte Verlauf des Innenraumklimas für den Zeitraum. Umgekehrt können gerade Extremereignisse, wie der Ausfall einer klimatechnischen Anlage aber auch zu immensen Schäden führen, die dann in der Simulation nicht korrekt vorhergesagt werden können. Somit ist die Aussagekraft in Hinsicht auf Extremereignisse eingeschränkt. Eine Lösung kann die gezielte Simulation derartiger Ereignisse darstellen. Eine weitere Möglichkeit stellt die Berücksichtigung von Fehlerfortpflanzungen und die Angabe Unsicherheiten im Ergebnis dar. Dafür fehlen für die Simulation historischer Materialien derzeit noch die Methoden.



## 4 Bewertungskriterien

Der Begriff *Kriterium* leitet sich aus dem Lateinischen ab und bedeutet wörtlich „Prüfstein, unterscheidendes Merkmal oder Kennzeichen“, also einen festgelegten Wert oder eine Marke zur Unterscheidung von verschiedenen Fällen. Bei der Bewertung der Güte von Simulationen steht die Frage im Vordergrund, ob die Genauigkeit der Abbildung in Bezug auf eine spezifische Frage oder einen bestimmten Parameter ausreichend gut ist oder nicht.

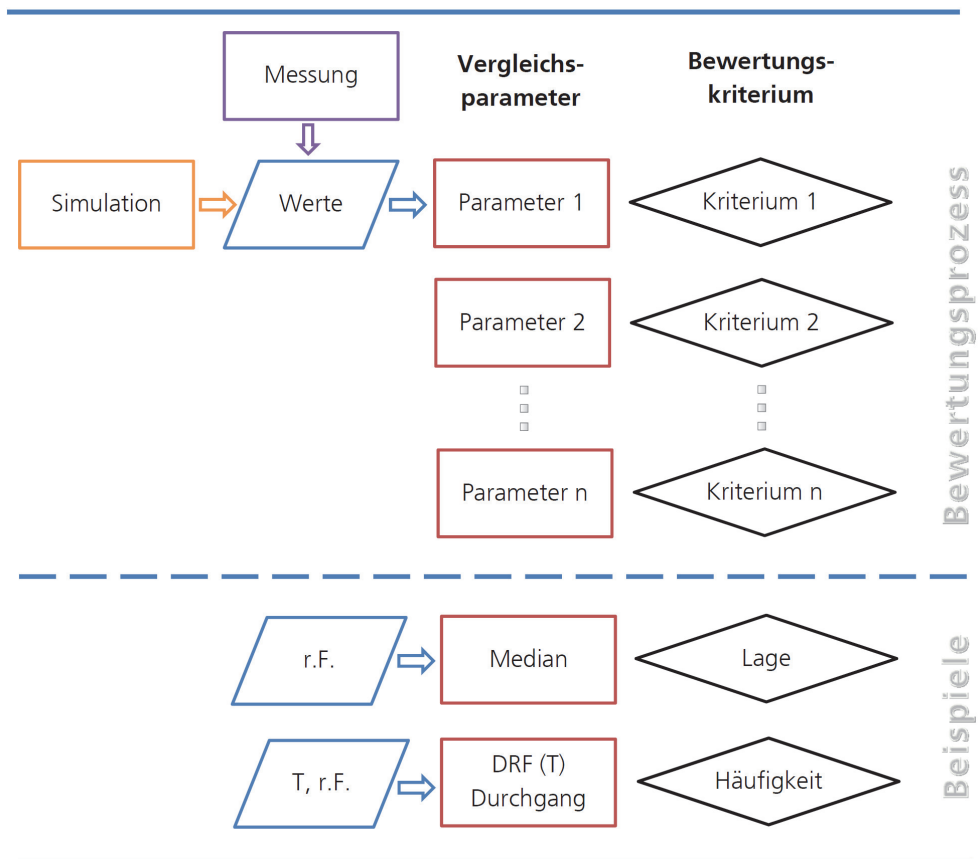


Bild 18: Bewertungsprozess im Rahmen der Kalibrierung eines Simulationsmodells im Kontext der Präventiven Konservierung mit Prüfung eines oder mehrerer Bewertungskriterien in Hinblick auf bestimmte Vergleichsparameter, die statistische Lageparameter, z. B. der Median, und / oder Schadensfunktionen, wie z. B. die Häufigkeit des temperaturabhängigen Durchgangs der Deliqueszenzfeuchte (DRF) eines bauschädlichen Salzes, darstellen können. Werden alle je nach Fragestellung individuell festgelegten Kriterien erfüllt, gilt eine Simulation als erfolgreich kalibriert.

Der Prozess zur Identifizierung der individuellen Kriterien für die Bewertung der Güte eines Simulationsergebnisses erfolgt grundsätzlich in zwei Schritten:

1. Auswahl der relevanten Vergleichsparameter in Bezug auf die statistischen Lageparameter und Schadensfunktionen.
2. Festlegung der individuellen Bewertungskriterien für diese Vergleichsparameter.

Dabei können je nach individueller Fragestellung eine unterschiedliche Anzahl von Vergleichsparametern und entsprechenden Bewertungskriterien notwendig sein. Im Beispiel (Bild 18, unten) ist einer der beiden Vergleichsparameter die Lage des Medians, das Kriterium ist die Einhaltung des Bereichs  $\pm 5\%$  r.F. Der andere Vergleichsparameter ist eine Schadensfunktion in Form des Durchgangs der temperaturabhängigen Deliqueszenzfeuchte (DRF), bei der ein bauschädliches Salz kristallisiert oder in Lösung geht. Das Bewertungskriterium ist hier die Häufigkeit der Durchgänge, die in der Simulation im Vergleich zur Realität vorhergesagt wird.

Im Fall von Schloss Linderhof (Kapitel 6.2) sind beispielsweise insbesondere die Bereiche mit hoher Feuchte wegen des Schimmelpilzrisikos und die kurz- und mittelfristigen Schwankungen des Raumklimas in Bezug auf mechanische Schäden von Interesse. In diesem Fall müssen die entsprechenden Lageparameter korrekt abgebildet werden, aber auch die Dynamik des Raumklimas. Für das Beispiel der Torhalle Lorsch (Kapitel 6.3) ist vor allem die Häufigkeit der Schwankungen um die Deliqueszenzfeuchte bestimmend, die den Schadensprozess dort charakterisieren.

## 4.1 Anforderungen

Der Grad der Abbildung der Realität durch das Simulationsmodell muss durch die Bewertungskriterien hinreichend gut beschrieben werden. Da es in der Präventiven Konservierung um die Risikobewertung des Raumklimas geht, müssen die Kriterien darüber hinaus die Bewertung der korrekten Abbildung von relevanten Schadensfunktionen oder weiteren Fragestellungen ermöglichen.

Darüber hinaus sind weitere allgemeine Anforderungen zu erfüllen. Die Kriterien müssen auf dem Stand des Wissens und der Technik basieren und die Anforderungen sowohl seitens der Konservierung als auch seitens des Ingenieurwesens respektieren.

Die Bewertungskriterien sollten möglichst universell innerhalb der verschiedenen Felder der Konservierungswissenschaft anwendbar sein. Andererseits müssen sie an die besonderen Fragestellungen der jeweiligen historischen Gebäude

und Sammlungen oder spezifischen Schadensprozessen individuell angepasst werden können. Aus der Sicht der Konservatoren wird immer eine größtmögliche Genauigkeit der Vorhersagen gefordert sein, da die Räume und Artefakte, die betrachtet werden, in der Regel einzigartig und damit unersetzbar sind.

Aus Sicht des Ingenieurwesens muss in Hinblick auf die Genauigkeit der Simulation eine Orientierung am Stand der Technik und des Wissens erfolgen und an den aktuellen Möglichkeiten der bestehenden Modelle sowie an deren Unsicherheiten.

Letztendlich müssen die Bewertungskriterien eine solide Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen des jeweiligen Modells in Bezug auf den konkreten Anwendungsfall ermöglichen.

## **4.2 Bewertungskriterien im Kontext der Präventiven Konservierung**

Aus Sicht der Präventive Konservierung hängt die Qualität und damit der Nutzen hygrothermischer Simulationen stark von deren Genauigkeit in der Abbildung des realen Gebäudes ab. Da insbesondere überdurchschnittlich hohe Ereignisse, also die Extremwerte des Datensatzes, zu Schäden führen können – hohe Feuchte über eine längere Zeit, extrem geringe Werte, Frost und hohe Materialfeuchte oder starke Schwankungen der relativen Luftfeuchte – ist deren korrekte Abbildung notwendig. Einen zweiten Aspekt bilden kurz- und mittelfristigen Schwankungen des Klimas sowie deren Lage, da diese die Voraussetzung für das Fortschreiten von Schäden in Folge von Wechselbeanspruchungen sind, wie Frost / Tauwechsel, Quellen und Schwinden oder Kristallisationswechsel von Salzen.

Die Bewertung gliedert sich in 2 Schritte:

1. Statistische Bewertung der Güte der Abbildung der Realität durch die Simulation / Prüfung der Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten
  - a. Bewertung der Lageparameter
  - b. Bewertung der Dynamik des Raumklimas
2. Bewertung der korrekten Abbildung der relevanten Schadensfunktionen oder weiteren Fragestellungen durch das Modell

Die Bewertung der Lageparameter und der Dynamik des Raumklimas erfolgt auf der Basis von Kriterien, die sich an den derzeitigen Möglichkeiten der hygrothermischen Gebäudesimulation orientieren. Die Festlegung der Kriterien für die relevanten Schadensfunktionen muss von Fall zu Fall individuell erfolgen.

#### **4.2.1 Kriterien zur Bewertung der Güte der Abbildung der Realität**

Im 1. Schritt wird die Güte der Wiedergabe der Realität durch die Simulation bewertet. Dies dient der Überprüfung, ob das Modell die Wirklichkeit generell richtig abbildet und ob die verwendeten Eingabeparameter und Randbedingungen eine realitätsnahe Simulation ermöglichen, und ist vor allem in Hinblick auf spätere Variantenrechnungen erforderlich, aber auch auf die Abbildung von Schadensprozessen, die mit bestimmten Temperatur- oder Feuchtebereichen zusammenhängen.

Im Folgenden werden die relevanten Parameter und Kenngrößen aus Sicht der Präventiven Konservierung zusammengefasst.

##### **a) Abbildung der absoluten Werten und Lageparameter**

Absolute Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte bestimmen über die Dauer von Ereignissen die kumulativ schädigende Wirkung des Klimas auf Artefakte (*Dose-Response-Relationships* und chemische Abbauprozesse), extreme Werte führen dagegen zu spontanen Schädigungen (*Thresholds*).

##### Temperatur

Temperatur wird grundsätzlich eine geringere schädigende Wirkung für Kunstwerke beigemessen als der relativen Feuchte. Dennoch gibt es kritische Bereiche, die beachtet werden müssen. Geringe Temperaturen und Frost scheinen an Artefakten nur in seltenen Fällen Schäden zu verursachen. Bei extrem tiefen Temperaturen können jedoch an organisch gebundenen Materialien in Kombination mit einer Versprödung der Materialien unterhalb der Glasübergangstemperatur durch thermische Schrumpfungsprozesse und dadurch induzierte Spannungen spontan Schäden entstehen. Zu beachten ist auch, dass bei hoher Feuchte im Porengefüge von Materialien Frostschäden, z. B. im Mauerwerk, insbesondere an Putzen und Naturstein im Sockelbereich historischer Gebäude, auftreten können.

Die korrekte Abbildung hoher Temperaturen ist wichtig für die Beurteilung der Wachstumsbedingungen von Mikroorganismen. Bei höherer Temperatur steigt das Risiko für biologische Aktivität und Wachstum (vgl. Bild 19). Die Dauer der Ereignisse muss ebenso korrekt wiedergegeben werden. Auch chemische Abbauprozesse laufen bei hohen Temperaturen schneller ab.

Verschiedene Schadensprozesse weisen zudem eine Temperaturabhängigkeit auf, die bei der Beurteilung von Schadensfunktionen eine Rolle spielt, beispielsweise die Deliqueszenz von Salzen oder auch das eben genannte Wachstum von Mikroorganismen.

Die Temperatur bestimmt darüber hinaus die absolute Luftfeuchte, die für den Vergleich zwischen Innen- und Außenklima relevant ist.

### Relative Feuchte

Änderungen der relativen Luftfeuchte führen zu Dimensionsänderungen von hygroskopischen Materialien und damit zu Spannungen im Materialverbund. Da der Prozess der Feuchteabgabe aus tieferen Schichten über längere Zeit fortschreitet, ist zum einen die Dauer der Ereignisse wichtig, zum anderen aber auch die Detail-Betrachtung der relevanten Oberflächen. Wird eine Kirche für einen Gottesdienst aufgeheizt, dauert es wegen der Trägheit der Materialien beispielsweise einige Zeit, bis Feuchteänderungen sich im Material überhaupt erst bemerkbar machen, siehe [Künzel 1991], [Bratasz 2011]. Manche Fragestellungen können mit dem hygrothermischen Raummodell, das auf mehreren 1-dimensionalen Modelle aufgebaut ist, alleine nicht betrachtet werden. Ein Beispiel hierfür sind Wärmebrücken in Ecken, die bei kühleren Oberflächentemperaturen ein höheres Risiko für Schimmelpilzwachstum aufweisen. Für diese Form von Detailuntersuchungen muss die hygrothermische Gebäudesimulation durch weitere 1- bzw. 2-dimensionale Modelle ergänzt werden.

Dass einzelne Ereignisse mit niedriger relativer Feuchte extrem gefährlich sein können, zeigt das Beispiel des Schönen Stalles im nördlichen Pavillon von Lustheim, wo im Sommer 2003 wegen eines Ausfalls der Befeuchtung die relative Feuchte so weit absank, dass dort schlagartig Salze aus dem Mauerwerk kristallisierten und die zuvor aufwendig restaurierten barocken Wandmalereien spontan erneut massiv schädigten.

Nicht nur zu geringe, sondern insbesondere zu hohe Feuchte ist als kritisch für Kunstwerke und historische Räume anzusehen, da sie zu Quellprozessen und mechanischen Spannungen an organischen Bindemitteln und zu Korrosion von empfindlichen Metallen und Gläsern führen kann. Hohe relative Luftfeuchte ist

zudem die Voraussetzung für die Aktivitäten von Mikroorganismen und anderen biologischen Schädlingen (vgl. Bild 19).

Die korrekte Abbildung der relativen Feuchte über die zeitliche Dauer ist eine zentrale Voraussetzung für eine instationäre Risikobeurteilung, wie beispielsweise mit der Postprocessing-Software WUFI BIO zur Beurteilung des Schimmelpilzrisikos .

### **b) Abbildung der Dynamik des Raumklimas**

Da die Klimastabilität im Wesentlichen durch die kurz- und mittelfristigen Schwankungen des Raumklimas wie auch durch die gesamte Spannweite beschrieben wird, müssen diese beiden Punkte im Besonderen betrachtet werden. Je häufiger Zyklen in kritischen Bereichen (Frost-Tau-Wechsel, Deliqueszenzfeuchte von Salzen, plastische Deformation) durchschritten werden, desto eher kommt es zu einer fortschreitenden kumulativen Schädigung.

Bei der Betrachtung von Kurzeitschwankung stellt sich die Frage, was „kurzzeitig“ überhaupt bedeutet. [Burmester 2000] beschreibt für Schwankungen der relativen Luftfeuchte innerhalb einer Stunde oder innerhalb eines Tages für Museen sehr enge Grenzen bzw. Richtwerte (siehe auch Kapitel 2.1.3). Museen sind meistens klimatisiert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Betrachtung eines Tages von 0 bis 24 Uhr ausreichend ist, da sich die einzelnen Tage ähneln. Bei Sammlungen in historischen Gebäuden ohne Klimatechnik ergibt sich ein anderes Bild. Diese sind stärker an das Außenklima gekoppelt und Änderungen, die Schwankungen im Innenraum verursachen, z. B. in Folge eines Wetterumschwungs, können zum Teil über mehrere Tage dauern.

Bei der Analyse historischer, unklimatisierter Gebäude wird deutlich, dass die tägliche Schwankungsbreite des Klimas allein für eine Risikobeurteilung nicht hinreichend genau beschreibt, da Schwankungen bei Wetteränderungen zum Teil über mehrere Tag dauern. [Bichlmair 2012] stellt am Beispiel von Schloss Linderhof Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte innerhalb eines Tages einer Auswertung mittels der gleitenden Schwankungsbreite gegenüber. Die Spannweite zwischen Minimum und Maximum in den Intervallen wird dabei nicht fest, sondern in Stundenschritten über den gesamten Zeitraum betrachtet, sodass auch kurzfristige Ereignisse, die über einen Tag hinaus gehen, in ihrem kompletten Umfang erfasst werden.

Dabei zeigt sich, dass die mittelfristigen Schwankungen des Raumklimas bei der Betrachtung von festen Tageszeiträumen stark unterschätzt werden. Erst bei der Betrachtung von gleitenden Intervallen von 24 Stunden oder größer wird

die maximale Höhe von Schwankungen, die Kunstwerke in den Schlossräumen belasten, sichtbar.

Auch die Lage der Schwankung im Wertebereich der relativen Feuchte ist von Interesse. Änderungen im Bereich hoher relativer Luftfeuchte haben bei hygroskopischen, organischen Materialien ein höheres Schädigungspotential, als solche im Bereich geringer Feuchte, da die Dimensionsänderungen größer sind (siehe Bild 7 in Kapitel 2.1). Kurzfristige, insbesondere stündliche Änderungen nehmen bei den langsamen hygrothermischen Transport-Vorgängen in dicken, massiven Bauteilen nach neueren Forschungen eine eher untergeordnete Rolle ein, vgl. [Bratasz 2011]. Die jährliche Schwankungsbreite gibt Auskunft über die maximale Belastung der Materialien über den Jahreszyklus und wird von [Mecklenburg 1998] als der kritischste Parameter eingeschätzt.

Die tägliche wie auch die gleitende Schwankungsbreite über mehrere Tage stellen zusammen mit der jährlichen Spannweite der Daten die wichtigsten Kriterien dar, um die Dynamik des Raumklimas zu beschreiben, die für zahlreiche Schadensfunktionen in der Präventiven Konservierung eine zentrale Rolle spielt.

#### **4.2.2 Bewertung der Abbildung der relevanten Schadensfunktionen**

Im 2. Schritt der Bewertung muss geprüft werden, ob die relevanten Schadensfunktionen durch das rechnerische Modell hinreichend genau abgebildet werden. Welche Schadensfunktionen dabei relevant für ein bestimmtes historisches Gebäude sind, hängt von den individuellen Schadensprozessen und Fragestellungen ab und muss von Fall zu Fall geprüft werden (siehe Tabelle 8).

Schadensfunktionen können grundsätzlich unterschieden werden in:

1. Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge (*Dose-Response-Relationships*): Eine bestimmte Dosis verursacht eine bestimmte Wirkung. Beispiele dafür sind die Entwicklung von Korrosion unter bestimmten Umweltbedingungen in der Kombination von Schadstoffen bzw. Salzen und klimatischen Bedingungen wie hoher Feuchte, das Wachstum von Schimmelpilzen durch eine bestimmte zur Verfügung stehende Feuchtemenge bei einer bestimmten Temperatur (vgl. Bild 19), oder die Degradation von Kunstmaterialien durch Licht. Für die Schädigung von Gemälden durch Licht gilt beispielsweise ein linearer Zusammenhang, sodass die Dauer von 1.000 Stunden bei 1 Lux die gleiche schädigende Wirkung hat wie 1 Stunde bei 1.000 Lux Beleuchtungsstärke. Für diese Art der Schadensfunktion ist die Dauer und Höhe der Ereignis-

se relevant, also die korrekte Verteilung der Daten über die Zeit, die am besten über einen Vergleich der Verteilung der Daten (statistische Lageparameter / Häufigkeiten, siehe Kapitel 2.3.1) nachzuvollziehen ist. Die Schädigung geschieht fortschreitend, kumulativ.

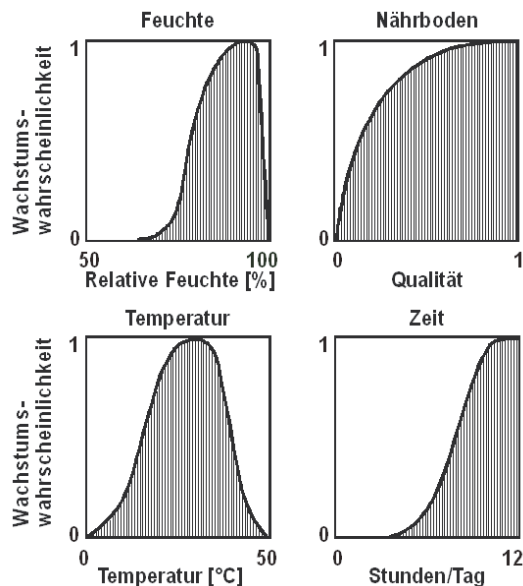


Bild 19: Abhängigkeit von Schadensprozessen von Umweltbedingungen am Beispiel der Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze nach [Sedlbauer 2001].

2. Grenzwerte (*Thresholds*): Das Überschreiten einer bestimmten Grenze (*Threshold*) verursacht eine Schädigung. Diese Grenze kann der Kristallisations- oder Hydratationspunkt eines Salzes sein, Frost- / Tauwechsel, aber auch eine maximal tolerierbare Schwankung der relativen Luftfeuchte, bevor eine Schädigung des Materials durch irreversible, plastische Deformation geschieht. Die Grenze muss dabei kein Einzahlenwert sein, sondern kann auch in Abhängigkeit von einem oder mehreren Parametern variabel sein, z. B. die temperaturabhängige Deliqueszenzfeuchte eines Salzes.  
Wichtig für korrekte Wiedergabe ist hier die Auswertung der zeitlich bezogenen Schwankungsbreiten und die korrekte Verteilung der Daten, da auch die Lage der Schwankung im Wertebereich der relativen Feuchte wesentlich ist. Die Schädigung entsteht spontan, kann sich aber auch kumulieren.
3. Chemische Verfallsprozesse: chemische Abbauprozesse und Reaktionen verlaufen bei geringerer Temperatur mit langsamerer Geschwindigkeit ab, wie zum Beispiel der Abbau von Acetat-Film oder die Degradation



von Papieren. Dieser Zusammenhang wird durch folgende von Svante Arrhenius beschriebene Gleichung dargestellt:

$$k = A e^{-E_A/RT} \quad (5)$$

k [-]            Reaktionsgeschwindigkeitskonstante

A [-]            Frequenzfaktor

$E_A$  [J/mol]      Aktivierungsenergie

R [J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>]    Allgemeine Gaskonstante

T [K]            absolute Temperatur

Diese bedeutet letztendlich, dass sich mit jeder Erhöhung der Temperatur um 10 °C die Reaktionsrate ungefähr verdoppelt. Viele chemische Degradationsprozesse haben dabei einen logarithmischen Verlauf, wie z. B. die Schädigung durch Licht, die zu Beginn stark ist und dann mit der Zeit immer weniger wird. Chemische Abbauprozesse ähneln in ihrem Ablauf den Dosis-Wirkungs-Zusammenhängen. Allerdings kann die Temperatur in diesem Fall nicht als Dosis betrachtet werden, sondern vielmehr als der entscheidende Faktor, dessen Höhe, die Geschwindigkeit des Prozesses aus thermodynamischer Sicht bestimmt.

Für chemische Abbauprozesse ist die Dauer und Höhe der Ereignisse relevant, also die korrekte Verteilung der Daten über die Zeitdauer. Die Schädigung entsteht kumulativ.

## 5 Individuelle Festlegung von Bewertungskriterien

Das Ziel jeglicher Simulationen ist es, durch Vereinfachung komplexer Prozesse mit vertretbarem Aufwand ein hinreichend genaues Bild der Realität wider zu geben. Hygrothermische Simulationen werden ein Raumklima in einem realen Gebäude immer nur näherungsweise beschreiben können, da die Aufgabe extrem komplexer Natur ist und das Ergebnis von zahlreichen Unwägbarkeiten beeinflusst wird. Beim Vergleich von Simulationen und Messungen wird deutlich, dass nicht jeder Tag detailliert richtig dargestellt werden kann. Daher ist es vielmehr wichtig, die generelle Charakteristik des Innenraumklimas richtig abzubilden.

### 5.1 Auswahl der statistischen Kenngrößen

Jegliche statistische Methoden dienen einer Reduktion der Komplexität der Daten, um an Hand von mehr oder weniger einfachen Kenngrößen bestimmte Charakteristika zu beschreiben oder Vergleichbarkeit zu schaffen (siehe Kapitel 2.3). Für die Bewertung der Güte der Simulationen wird hier einfachen Kenngrößen der Vorzug gegeben, die entweder einen direkten Rückschluss auf die Höhe und mögliche Gründe einer Abweichung ermöglichen oder aber Zusammenhänge zwischen Datensätzen anschaulich beschreiben.

Bei der Risikoabschätzung muss berücksichtigt werden, dass Ausnahmeereignisse in der Simulation nur selten richtig abgebildet werden können. Die Bewertung der Güte eines Simulationsmodells muss deswegen die Anfälligkeit gegenüber Ausreißern berücksichtigen. Daher muss die Abbildung der Messwerte durch die Simulation für den Bereich ohne Ausreißer strengere Kriterien erfüllen als für die gesamte Spannweite, die allein durch Maximum und Minimum bestimmt wird. Als Ausreißer werden in diesem Fall die Werte betrachtet, die jenseits der 1 %- und 99 %-Perzentile liegen. Da der Mittelwert anfällig auf Ausreißer ist und die korrekte Anwendung Standardabweichung eine Normalverteilung der Daten voraussetzt, die bei Klimadaten nicht immer gegeben ist, wird dem Median und den Perzentilen als Kenngröße der Vorzug gegeben. Der Test auf Normalverteilung nach Kolmogorov Smirnov zeigt, ob die Verteilung der simulierten Daten und der gemessenen Werte ähnlich ist. Auch die Korrelati-

onskoeffizienten werden als ein robustes statistisches Werkzeug verwendet, da diese den Zusammenhang zwischen zwei Datensätzen in einem 1-Zahl-Wert beschreiben und bewerten lassen.

Die Konsistenz des Zusammenhangs zwischen zwei Datensätzen über den gesamten Datenbereich zeigt QQ-Plot besser auf als die so genannten Ferro-Hypothesen. Letztere können bei größerer Unsicherheit der Gründe einer Abweichung von zwei Datensätzen gut verwendet werden. Für die meist nur geringen Abweichungen bei der hygrothermischen Gebäudesimulation ist die Verwendung eines QQ-Plots sinnvoller, der auch aufzeigt, in welchen Bereichen die Abweichungen ein unterschiedliches Ausmaß haben.

Die Bewertung einer hygrothermischen Simulation im Kontext der Präventiven Konservierung gliedert sich in 2 Schritte, in die Bewertung der Güte der Abbildung der Realität durch die Simulation und in die Überprüfung der korrekten Abbildung von Schadensfunktionen für die hier die relevanten statistischen Kenngrößen vorgeschlagen und beschrieben werden.

## **5.2 Festlegung von Kriterien zur Bewertung der Güte der Abbildung der Realität**

Aus den in Kapitel 4.2 beschriebenen Aspekten lassen sich folgende Charakteristika der Datensätze und Vergleichsparameter (siehe auch Kapitel 2.3) für Bewertung der Güte der Abbildung der Realität folgende Kriterien ableiten:

1. Korrekte allgemeine Abbildung des Datensatzes  
(Lageparameter: Median, Quartilen, 1 % / 99 %-Quantil)
2. Korrekte Beschreibung der Extrema / jährliche Schwankungsbreite und der Ausreißer (Minimum, Maximum, Spannweite, 1 % / 99 %-Quantil)
3. Korrekte Beschreibung der Dynamik kurzfristiger Schwankungen  
(tägliche Schwankungen / gleitende Schwankungsbreite)
4. Korrekte Beschreibung der Lage der kurzfristigen Schwankungen im Datenbereich (Lageparameter und gleitende Schwankungsbreite)

Diese Charakteristika müssen für Temperatur und relative Feuchte geprüft werden. Die hier vorgeschlagenen Bewertungskriterien (Tabelle 7) orientieren sich am Stand der Technik und an den Möglichkeiten und Grenzen der derzeit verfügbaren Simulationswerkzeuge. Für den Grad der Übereinstimmung zwischen

Simulation und Messung erfolgt dabei eine Abstufung Bewertungskriterien in drei Kategorien „hervorragend“ und „akzeptabel“ und „gering“.

Die Kategorie „akzeptabel“ ist so weit gefasst, dass die in Kapitel 6 vorgestellten Fallstudien sie für die meisten der oben genannten Kriterien wie Datenumfang, Extremwerte oder Median gerade noch erfüllen. Die Untersuchungen wurden mit einem sehr hohen Anspruch an Genauigkeit durchgeführt und stehen stellvertretend für den Stand der Technik auf dem Gebiet der hygrothermischen Simulation historischer Gebäude. Alle Werte außerhalb dieser Kategorie erhalten die Bewertung „gering“. In diesem Fall sollte eine Simulation ggf. erneut kalibriert und wiederholt werden.

Die Kategorie „hervorragend“ bedeutet eine sehr hohe Übereinstimmung von Modell und Realität und orientiert sich für den Median und die 1 % und 99 %-Quantile an den Grenzen der Messgenauigkeit für die Datenerfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte der im Projekt „Klimastabilität historischer Gebäude“ eingesetzten Messtechnik. Für den gesamten Datenumfang wie auch die Lage von Minimum und Maximum werden weichere Kriterien festgesetzt, da hier zahlreiche Unwägbarkeiten aus der realen Nutzung der historischen Gebäude zu höheren Unsicherheiten in der Simulation führen. Nicht dokumentierte Ereignisse, wie z. B. das Lüften einer Kirche können schnell zu „Ausreißern“ in den Daten führen, die sich in der Lage von Minimum und Maximum wie auch in der Spannweite der Daten manifestieren.

Abhängig von den spezifischen Gegebenheiten der untersuchten historischen Gebäude müssen diese Kriterien gegebenenfalls angepasst werden. Beispielsweise kann eine Beschränkung der zulässigen Abweichung der oberen Bereiche der relativen Luftfeuchte (z. B. Werte oberhalb des 70 %-Quantil) erfolgen, wenn die gemessenen Daten in einem Bereich liegen, der als Risikozone für bestimmte Schadensprozesse gilt, wie Schimmelpilzbildung oder mechanische Schädigung aufgrund von dynamischen Wechsell.

Zum Vergleich des kompletten Datenumfangs stehen mit den Hypothesen nach Ferro und den QQ-Plots zwei unterschiedlich komplexe Verfahren zur Verfügung (siehe Kapitel 2.3.2). Die Hypothesen nach Ferro ermöglichen zwar die Beurteilung der Ursache größerer Abweichungen, aber nur eine grobe, generelle Abschätzung der Genauigkeit der Übereinstimmung von Messung und Simulation. Daher wurde dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt und nur exemplarisch am Beispiel der Torhalle Lorsch angewendet (vgl. Kapitel 6.3, S. 147). Die Verwendung von QQ-Plots ermöglicht insgesamt eine bessere Abschätzung der Genauigkeit der Übereinstimmung in verschiedenen Werte-Bereichen und damit auch die Erforschung der Ursachen von möglichen Abweichungen zwischen Simulation und Messung. Daher wird dieser Methode hier der Vorzug gegeben.

Tabelle 7: Auswahl vorgeschlagener Bewertungskriterien im Kontext der Präventiven Konservierung für den Vergleich von Simulation und Messdaten in Bezug auf unterschiedliche Charakteristika von Datensätzen

<b>Charakteristikum</b>	<b>Vergleichsparameter</b>	<b>Bewertungskriterium</b> Hervorragend / Akzeptabel
Gesamter Datenumfang	Spannweite	$\pm 5\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 10\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Datenumfang ohne Ausreißer	1 % / 99 % Quantil	$\pm 3\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 5\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage Maximum	Maximum	$\pm 5\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 10\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage Minimum	Minimum	$\pm 5\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 10\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage 1 % Quantil	1 % Quantil	$\pm 3\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 5\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage 99 % Quantil	99 % Quantil	$\pm 3\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 5\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage allgemein	Median	$\pm 3\%$ r.F., $\pm 1\text{ °C}$ / $\pm 5\%$ r.F., $\pm 3\text{ °C}$
Lage allgemein	Korrelationskoeffizienten	$\geq 0,95$ / $\geq 0,8$
Lage allgemein	QQ-Plot	$\Delta \leq 5\%$ r.F., $1\text{ °C}$ / $\Delta \leq 10\%$ r.F., $3\text{ °C}$
Dynamik	Häufigkeit Tagesschwankungen	Quote: $0,95 - 1,05$ / Quote: $0,75 - 1,25$

Eine weitere Abstufung hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit kann in Hinblick auf das Ziel der Simulation getroffen werden. Sollen nur tendenzielle Aussagen getroffen werden, kann eine Simulation weniger exakt ausfallen, als wenn z. B. eine klimatechnische Anlage ausgelegt oder ein konkreter Schadensprozess untersucht werden soll.

### 5.3 Festlegung von Kriterien zur Bewertung der Abbildung von Schadensfunktionen

Schadensfunktionen haben das Ziel, einen Schadensprozess / Verfallsprozess in einer mathematischen oder logischen Funktion abzubilden. In den letzten Jahren wurden in verschiedenen Bereichen der Konservierungsforschung Schadensfunktionen aufgestellt, um ein besseres Verständnis für Schadensprozesse zu bekommen und um Alterung und Schädigung zu bewerten und vorherzusagen zu können. Insgesamt ist das Wissen, vor allem um die quantitativen Abläufe von Schadensprozessen, immer noch sehr beschränkt. Die korrekte Abbildung von Schadensfunktionen ist wesentliches Bewertungskriterium, um die Qualität von hygrothermischen Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung zu beschreiben. Die jeweiligen Kriterien für die notwendige Genauigkeit von Simulationen im Bereich historischer Gebäude muss letztendlich für jeden Fall in einer Diskussion mit allen relevanten Experten und Entscheidungsträgern gefällt werden. Für bereits vorgeschädigte Bauten oder Sammlungen können beispielsweise höhere Anforderungen an die Genauigkeit notwendig sein.

Folgende Parameter müssen in Hinsicht auf die Wechselwirkungen zwischen Erhaltung und Raumklima zusammenfassend aus den beiden vorangegangenen Kapiteln je nach Fall besonders betrachtet werden:

- hohe Temperaturen
  - Schnellerer Ablauf chemischer Verfallsprozesse, Begünstigung biologischen Wachstums
- niedrige Temperaturen
  - Versprödung organischer Bindemittel unterhalb der Glasübergangstemperatur, Bildung von Eis im Porenraum bei hoher Materialfeuchte und Temperaturen  $< 0\text{ °C}$  über längere Zeit
- hohe Luftfeuchte
  - Quellen, Verlust von Festigkeit, irreversible Deformation, Schimmel, Salze in Lösung
- niedrige Luftfeuchte
  - Schrumpfen, Kristallisation von Salzen
- Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchte
  - Risiko fortschreitender mechanischer Schäden an Materialien durch Quellen und Schwinden, Frost / Tau-Wechsel oder Kristallisations- bzw. Hydratationswechsel von Salzen

Die nachfolgende Tabelle 8 beschreibt eine Auswahl bekannter, quantitativer Schadensfunktionen und nennt die Bewertungskriterien zur Beurteilung der Güte der Vorhersage eines bestimmten Schadensprozesses.

Tabelle 8: Beispiele für typische Schadensprozessen und -funktionen und Auswahl geeigneter Bewertungskriterien. Für den Vergleich der Häufigkeit wird eine Quote aus dem Ergebnis der Vorhersage durch die Simulation und durch die Messung gebildet.

<b>Schadensprozess</b>	<b>Vergleichsparameter</b>	<b>Bewertungskriterium</b>
<b>Niveau und Häufigkeit</b>		
Kristallisation und Hydratation von Salzen	Durchgang der Deliqueszenzfeuchte	Vergleich der Häufigkeit
Frost / Tau-Wechsel	Durchgang 0 °C / Materialfeuchte / Dauer	Vergleich der Häufigkeit
Mechanischer Schaden durch Wechsel zwischen hoher und geringer Feuchte	kurzfristige Schwankungen / Spannweite / Überschreitung des Yield Points	Vergleich der Häufigkeit / Lageparameter / Vergleich der Häufigkeit
Tiefemperatur-Schaden an organisch gebundenen Malschichten	Temperatur unter Glasübergangstemperatur / Überschreitung des Yield Points	Vergleich der Häufigkeit
<b>Niveau und Dauer</b>		
Mikroorganismen	Dauer von Feuchte und Temperatur bezogen auf die Güte des Substrats	Biohygrothermisches und Isoplethenmodell [Sedlbauer 2001]
<b>Frequenz von Schwankungen</b>		
Dynamik der Wechsel, Mechanischer Schaden	Tägliche Schwankung, bzw. gleitende Schwankungsbreite	Vergleich der Häufigkeit

An Hand dieser Schadensfunktionen werden nun zunächst die Messwerte und in der Folge das Simulationsergebnis analysiert. Die Ergebnisse dieser Analyse dienen als Kenngrößen für den Vergleich zwischen Simulation und Realität.

### Vorhersagequote zum Vergleich der Häufigkeit von Ereignissen

Für den Vergleich der Häufigkeit von Ereignissen wird der Quotient  $Q_V$  aus dem Ergebnis der Vorhersage der Simulation und dem der Messung gebildet. Dieser Quotient beschreibt die Güte der Vorhersage in Hinblick auf eine ausgewählte Schadensfunktion oder andere für das Raumklima relevante Ereignisse.

Die Vorhersagequote  $Q_V$  ergibt sich aus:

$$Q_V = \frac{N_{Sim}}{N_{MW}} \quad (6)$$

mit

$N_{MW}$  Anzahl der Ereignisse aus Risikoabschätzung nach der Messung  
 $N_{Sim}$  Anzahl der Ereignisse aus Risikoabschätzung nach der Simulation

für alle  $N_{MW}, N_{Sim} \in \mathbb{N}$  und  $N_{MW} > 0$

oder für absolute Vorhersagewerte wie die Einordnung in Risikoklassen oder Rate des Fortschritts eines Schadensprozesses:

$$Q_V = \frac{x_{Sim}}{x_{MW}} \quad (7)$$

mit

$x_{MW}$  Wert aus Risikoabschätzung nach der Messung  
 $x_{Sim}$  Wert aus Risikoabschätzung nach der Simulation

für alle  $x_{MW}, x_{Sim} \in \mathbb{R}$  und  $x_{MW} \neq 0$

An dieser Stelle ist es wichtig, den Wertebereich für  $N_{MW}$  und  $N_{Sim}$  bzw.  $x_{MW}$  und  $x_{Sim}$  zu betrachten. Für kleine Werte von  $N_{MW}$  wird die Abstufung der Werteskala für die Bewertung des Ergebnisses zunehmend gröber. Bei 5 gemessenen und 3 simulierten Extrem-Ereignissen ergibt sich beispielsweise eine Vorhersagequote von lediglich 60 %, obwohl das Ergebnis u. U. bei der Bewertung von 8760 Stunden / Rechenschritten für 1 Jahr durchaus als akzeptabel oder sogar als gut gelten kann. Daher ist es notwendig, für diese Methode eine minimale Stichprobengröße der zu bewertenden Ereignisse zu definieren. In der Folge wird für die Bewertung eine Abstufung in 0,05-Schritten vorgeschlagen.



Für den Quotienten wird daher eine mindestens ebenso feine Abstufung gefordert. Daraus leitet sich für  $N_{MW}$  eine Mindestanzahl von 20 Ereignissen für die sinnvolle Anwendung der Vorhersagequote zur Bewertung der Güte der Vorhersage von Ereignissen ab. Unterhalb von 20 Ereignissen liefert die Methode immer noch einen Anhaltspunkt zur Bewertung (vgl. Tabelle 12, S. 117), hier muss jedoch eine fallweise Betrachtung und die Diskussion unter den beteiligten Fachleuten erfolgen, ob ein Ergebnis noch akzeptabel ist oder eben nicht. Für den Wert  $x_{MW}$  muss eine analoge Betrachtung erfolgen, die die Anzahl der Ereignisse, die zu der entsprechenden Risikoabschätzung führen mit einbezieht.

Aus Sicht der Präventiven Konservierung müssen die Vorhersagen der Schadensprozesse eine hohe Übereinstimmung mit der Realität aufweisen, da meist einzigartige, wertvolle Artefakte betrachtet werden, die im Schadensfall nicht einfach ersetzt werden können.

Daher wird eine Quote der Vorhersage  $Q_V \geq 0,75$  als Kriterium für die Kategorie „akzeptable“ Abbildung von Schadensfunktionen festgelegt (Tabelle 9), d. h. Schwankungsbreiten, Grenzüberschreitungen oder die quantitative Vorhersage durch die Schadensfunktion müssen mindestens in 3 von 4 Fällen richtig dargestellt sein. Dieser Wert orientiert sich auch am aktuellen Stand der Technik der Simulationen.

Tabelle 9: Vorschlag für Bewertungskategorien und Vorhersagequoten  $Q_V$  für die Vorhersage von Ereignissen und die Abbildung der quantitativen Schadensfunktionen nach dem „Sicherheitsprinzip“ mit Aufschlag in der Zone erhöhter Gefährdung und nach den Prinzipien der „Risikoabschätzung“ mit äquidistantem Abstand um  $Q_V$ .

Bewertungskategorie	Vorhersagequote $Q_V$ „Sicherheitsprinzip“	Vorhersagequote $Q_V$ „Risikoabschätzung“
hervorragend	$0,95 \leq Q_V \leq 1,10$	$0,95 \leq Q_V \leq 1,05$
akzeptabel	$0,75 \leq Q_V \leq 1,5$	$0,75 \leq Q_V \leq 1,25$
gering	$Q_V < 0,75$ oder $Q_V > 1,5$	$Q_V < 0,75$ oder $Q_V > 1,25$

Die untere Grenze der Vorhersagequote für die Kategorie „hervorragend“ bezieht sich mit  $Q_V \geq 0,95$  auf den Datenumfang der doppelten Standardabweichung  $s$  normalverteilter Daten (vgl. Bild 20) wie auch auf die typische Bewertung von Konfidenzintervallen. Dieser Wert wird in der Statistik häufig für die Beschreibung einer hohen Übereinstimmung oder einer hohen Wahrscheinlichkeit der Vorhersage herangezogen und daher hier übernommen.

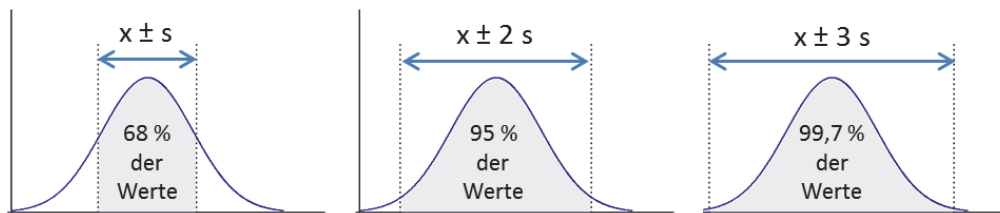


Bild 20: Zur Bedeutung der Varianz bei einer Normalverteilung, nach: [Oestreich 2009].

Für die obere Grenze der Vorhersagequote können zwei verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen, das „Sicherheitsprinzip“ oder die „Risikoabschätzung“.

### „Sicherheitsprinzip“ vs. „Risikoabschätzung“

Der Ingenieursmäßige Ansatz, das „Sicherheitsprinzip“ (engl. *precautionary principle*), geht von einem Sicherheitsaufschlag im Fall des Versagens oder für ein Schadensrisiko aus und überschätzt daher lieber das Ergebnis einer Simulation. Daher macht es für diesen Ansatz einen Unterschied, ob es sich um ein Überschätzen vs. Unterschätzen einer Schadenswahrscheinlichkeit handelt. Ein Unterschätzen kann zu größeren Schäden führen als vorhergesagt. Ein Überschätzen führt im schlimmsten Fall zu überzogenen Maßnahmen und finanziell höherem Aufwand, nicht aber zu Schäden am Kunst- und Kulturgut, da die Risikobewertung auf der sicheren Seite liegt. Daher kann hier im Sinne eines Sicherheitszuschlags die obere Grenze weiter gefasst werden und bspw. bei 1,10 für die Bewertung „hervorragend“ und bei 1,5 für „akzeptabel“ liegen.

Die „Risikoabschätzung“ (engl. *risk assessment*) ist ein Ansatz aus der Präventiven Konservierung, der auf eine konkrete Beschreibung der Risiken abzielt und ein Überschätzen des Risikos für ebenso ungünstig erachtet wie ein Unterschätzen, da im Falle eines Überschätzens ggf. zu massive Maßnahmen getroffen werden. In diesem Fall sind die Bereiche für Über- und Unterschätzen äquidistant (siehe Tabelle 9).

Für diese Arbeit wird in der Folge der Ingenieursmäßige Ansatz des „Sicherheitsprinzips“ weiter betrachtet. Abhängig von den spezifischen Gegebenheiten der untersuchten historischen Gebäude müssen die Bewertungskriterien ggf. individuell angepasst werden und können entweder strenger oder auch weiter gefasst werden.

## 6 Ableitung von individuellen Bewertungskriterien an Fallstudien

Die Anwendbarkeit der Bewertungskriterien wird in diesem Kapitel anhand von drei Fallstudien untersucht. Die Ableitung individueller Kriterien zur Bewertung der Güte der hygrothermischen Simulationen erfolgt auf Basis der im Rahmen des Projektes „Klimastabilität historischer Gebäude“ erarbeiteten Untersuchungen und Ergebnisse. Ziel des Forschungsprojektes war die Untersuchung der klimatischen Funktionsweise historischer Gebäude. Um ein umfassendes Bild zu erhalten wurden unterschiedliche Bautypen in die Untersuchung mit einbezogen. Das Königshaus am Schachen ist ein einfaches Gebäude in Holzbauweise mit extremen Außenklimabedingungen und relativ wenigen Besuchern. Im Gegensatz dazu ist Schloss Linderhof, das wie das Schachenhaus auch in den oberbayerischen Alpen liegt, ein sehr komplexes Gebäude in Massivbauweise, mit einem extrem hohen Besucheraufkommen im Sommer. Die Torhalle Lorsch stellt einen Sonderfall dar, der für die hygrothermische Gebäudesimulation und die Betrachtung der Wechselbeziehung zwischen Raumklima und umgebendem Außenklima besonders interessant ist. Es handelt sich um einen einzelnen Raum über einer Tordurchfahrt, der von allen Seiten vom Außenklima umspült ist, ohne jegliche Klimatisierung und ohne Einfluss von aufsteigender Bodenfeuchte. Für die raumklimatischen Simulationen zum Königshaus am Schachen, zu Schloss Linderhof sowie zur Torhalle in Lorsch werden nach den in Kapitel 4 und 5 entwickelten Methoden individuelle Bewertungskriterien abgeleitet und mit diesen die Ergebnisse der Simulationen bewertet. Die Grundlagen und die erhobenen Daten sind in den IBP-Berichten zu den jeweiligen Häusern [Wehle 2011], [Bichlmair 2011] und [Kilian 2012] detailliert beschrieben.

### 6.1 Königshaus auf dem Schachen

Anhand des Türkischen Saals im Königshaus am Schachen wird ein komplexer historischer Raum mit unterschiedlichsten, gealterten Innenraummaterialien und einer 2-schaligen Baukonstruktion simuliert, mit dem Anspruch alle Randbedingungen und Eingabeparameter so genau wie möglich zu bestimmen. Das Ziel der Simulation war die Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen Randbedingungen auf das Raumklima, insbesondere der Feuchtepufferung, der Besucher, des Luftwechsels und des Außenklimas. Die umfangreichen Arbeiten

dazu dauerten insgesamt über zwei Jahre. Zu Beginn stand die konservatorische Untersuchung und Erfassung der Materialien und klimatisch bedingten Schäden durch [Holl 2008]. Zunächst wurde parallel dazu eine stark vereinfachte Simulation mit nur näherungsweise bestimmten Randparametern [Kilian 2008] erstellt. In der Folge wurde eine weitere, detaillierte Simulation mit Erfassung aller Randbedingungen und Eingabeparameter [Wehle 2010] angefertigt. Dazu wurden detaillierte Untersuchungen zum Gebäude und zu den Materialien im Türkischen Saal durchgeführt und die hygrischen und thermischen Kennwerte der historischen Innenraummaterialien ermittelt. Die Wetterdaten der weiter entfernten Station auf der Zugspitze wurden korrigiert und die Verschattung durch die umstehenden Berge auf ihren Einfluss auf das Ergebnis hin überprüft. Schließlich wurde die Luftwechselrate mit einem passiven Tracergas-Verfahren gemessen.

Alle Daten wurden in die Simulationssoftware WUFI® Plus eingegeben und das Modell anhand der Messdaten von 2006/2007 solange kalibriert, bis das bestmögliche Ergebnis erreicht wurde. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt nun die Bewertung der Simulation. Die Untersuchungen, das Simulationsmodell und weitere Ergebnisse sind in [Wehle 2011] detailliert beschrieben. Mit demselben Modell wurde eine weitere Simulation mit Wetter- und Klimadaten vor Ort vom Schachen aus den Jahren 2010/2011 zur Validierung durchgeführt, um zu untersuchen, wie gut die Kalibrierung war und was die Änderung der Randbedingungen bewirkt.

### **Ablauf der Untersuchungen und Simulationen am Schachenhaus**

- Klimamessungen innen und außen 2006 bis 2012
- Grundlagenermittlung Gebäude und Materialien
- 1. Simulation mit vereinfachten Parametern 2006/2007
- Kalibrierung der 1. Simulation
- Restauratorische Untersuchung
- Erfassung der sorptiven Oberflächen
- Erweiterte Gebäudeaufnahme
- Nachstellung historischer Materialien
- Messung der hygrischen Eigenschaften
- Korrektur der Wetterdaten vor Ort / Wetterstation / Verschattung

- Messung des Luftwechsel (Tracer Gas, Blower Door)
- Eingabe in die 2. verbesserte Simulation 2006/2007
- Kalibrierung der 2. Simulation / Bewertung
- Rechnung von Varianten (Nutzung / Klimawandel / ...)
- 3. Simulation mit Wetterdaten 2010/2011
- Kalibrierung der 3. Simulation / Bewertung
- Kritische Bewertung der Simulationen

### 6.1.1 Hintergrund und Baugeschichte

Die Schlösser Neuschwanstein, Herrenchiemsee und Linderhof von König Ludwig II. (\*25. August 1845 Nymphenburg, † 13. Juni 1886 Starnberger See) sind weltweit bekannt und jährlich das Reiseziel zahlreicher Touristen. Weniger bekannt ist das erste Bauwerk des Königs: das Königshaus am Schachen (Bild 21, links). Es liegt auf einem 1876 m hohen Bergsporn vor dem Felsmassiv der Dreitorspitze im Wettersteingebirge und ist nur durch einen mehrstündigen Fußmarsch zu erreichen. Das Königshaus auf dem Schachen ist das erste von König Ludwig II. selbst errichtete Bauwerk. Im Obergeschoss befindet sich der prunkvoll eingerichtete Türkische Saal (Bild 21, rechts), der im Mittelpunkt der Untersuchungen stand.

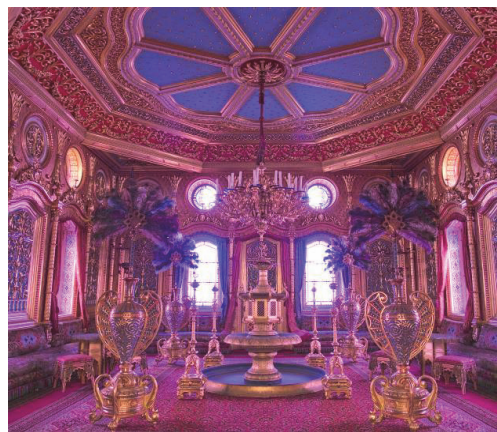


Bild 21: Links: Das Schachenhaus von Süden. Rechts: Der Türkische Saal.  
(Foto links: Bayerische Schlösserverwaltung, Foto rechts: Kristina Holl, Fraunhofer IBP / BSV).

Durch die exponierte Lage ist das Gebäude zu allen Jahreszeiten der rauen Witterung ausgesetzt. Der Standort ist geprägt durch lange Frostperioden im Winter und schnelle Wetterwechsel im Sommer. Umso bemerkenswerter ist der Erhaltungszustand des Schachenhauses und seiner Ausstattung, welcher außerordentlich gut ist. Das Königshaus am Schachen hat weder eine Heizung noch eine sonstige Klimatisierung. Demnach sind die klimatischen Verhältnisse innen allein durch das Außenklima, die Konstruktion des Gebäudes und die Besucher bestimmt.

Ein Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, was die Gründe für die gute Erhaltung sind. Dazu wurde die Ausstattung restauratorisch untersucht, Schäden kategorisiert und exemplarisch kartiert, die Materialien und Kunsttechniken erfasst und beschrieben. Durch eine quantitative Erfassung und die Bestimmung der stofflichen Kennwerte der am häufigsten vorkommenden Materialien war es möglich, in der Folge eine sehr detaillierte Simulationen des Raumklimas im Türkischen Saal zu erstellen, siehe auch [Wehle 2010] und den Bericht RK 013\_2/2011/294.

## **6.1.2 Grundlagenermittlung**

### **Baukonstruktion**

Die Lage des Schachenhauses ist extrem ausgesetzt, trotzdem hält das Gebäude dem rauen Bergklima seit mehr als 135 Jahren stand. Während dieser Zeit haben zwar starke Stürme immer wieder zu einzelnen Schäden geführt, aber die solide Konstruktion (Bild 22) konnte bis heute Schädigungen in größerem Ausmaß verhindern. Auch haben seit Fertigstellung des Gebäudes regelmäßig Instandsetzungsarbeiten stattgefunden.

Die Besonderheit am Türkischen Saal ist, dass dieser in einer Raum-in-Raum-Konstruktion ausgebildet ist. Schon die äußere Schale ist mit aufgenagelten Leisten und dem deckenden Anstrich aus Ölfarben winddicht ausgeprägt. Die tapezierten und gefassten Innenwände bilden die innere Schale, welche in die Außenschale eingestellt und mit Abstandshaltern abgestützt ist. Diese Konstruktion ist für die Klimastabilität ausschlaggebend und lässt das Außenklima nur zeitverzögert und gepuffert in den Innenraum gelangen.

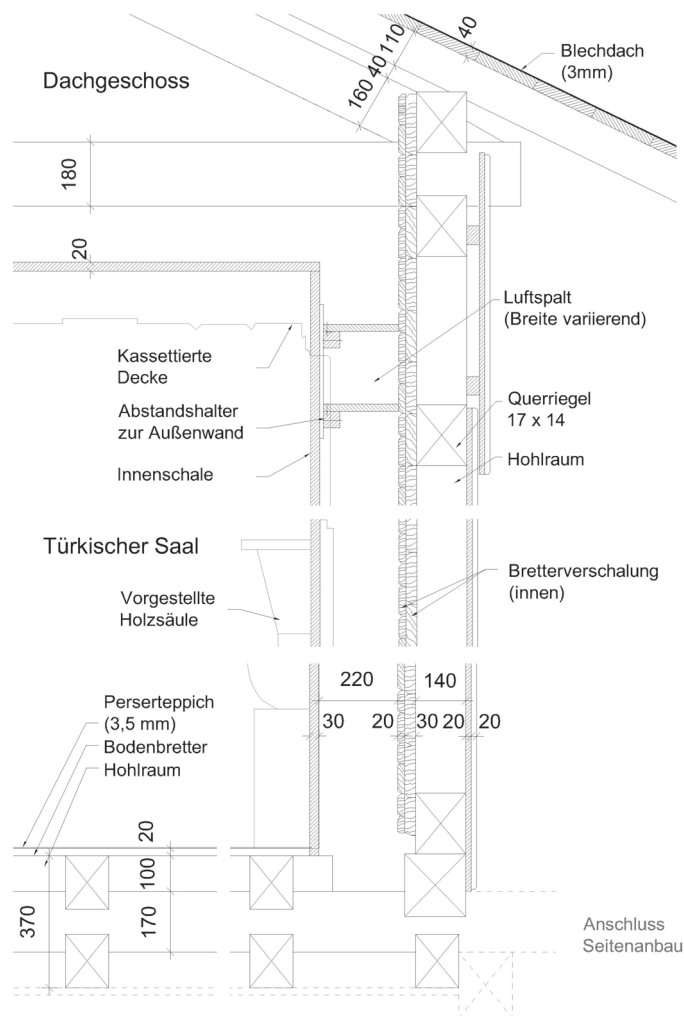


Bild 22: Vertikalschnitt Türkischer Saal Nord-Ost-Ecke [Wehle 2010]. In die äußere Schale die aus Brettern mit aufgenagelten Leisten mit einem dichten Ölfarbanstrich und einer zusätzlichen Bretterschalung innen besteht, ist der Türkische Saal als eigener Baukörper in einer Haus-in-Haus Konstruktion eingestellt.

## Luftwechsellmessung

Die Luftwechselrate hat einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität des Raumklimas in historischen Gebäuden. Eine höhere Luftwechselrate führt zu einem verstärkten Austausch mit der Außenluft und damit zu höheren Schwankungen des Klimas in Innenräumen.

Die Ergebnisse erster vereinfachter Simulationsversuche lassen bereits darauf schließen, dass das Gebäude relativ luftdicht ist. Um diese Vermutung zu belegen und um genaue Werte für die weitere Simulationen zu erhalten, wurde im September 2009 eine Luftwechsellmessung mit einem passiven Tracergas-Verfahren im Königshaus durchgeführt. Die Messung dauerte knapp drei Wochen.

Ziel war es, sowohl den Luftwechsel im Türkischen Saal als auch den Luftaustausch zwischen Ober- und Untergeschoss zu bestimmen. Dazu wurden Messeinheiten der schwedischen Firma Pentiaq AB verwendet [Holmberg 1999]. Bei dieser Art der Luftwechsellmessung wird das Gebäude in unterschiedliche Zonen eingeteilt, in welche je nach Zonenvolumen eine bestimmte Anzahl an Tracergas-Quellen installiert wird, die kontinuierlich Indikatorgas freisetzen. Die Quellenverteilung erfolgt so, dass sich nach einiger Zeit durch natürliche Luftbewegungen eine konstante Tracergas-Konzentration im Gebäude einstellt. Um dem Luftwechsel zwischen Ober- und Untergeschoss zu bestimmen, wurden im Türkischen Saal zwei Arten von Quellen mit jeweils unterschiedlichen Tracergasen installiert. Aufgrund einer ungleichmäßigen Durchmischung der Luft im Untergeschoss konnte der Luftaustausch zwischen den Geschossen jedoch nicht bestimmt werden.

Die spezifische Luftwechselrate im Türkischen Saal ist mit  $0,34 (\pm 0,03) \text{ h}^{-1}$  tatsächlich als niedrig einzustufen. Der Hauptteil des Luftvolumenstromes in das Obergeschoss besteht aus vorkonditionierter Luft aus dem Untergeschoss. Auch der Luftwechsel von  $n = 0,41 (\pm 0,08) \text{ h}^{-1}$  für das gesamte Königshaus ist nicht hoch (vgl. Kapitel 7.2). Wegen der ungleichmäßigen Durchmischung des Tracergases im Untergeschoss liegt die Unsicherheit der Messung bei ungefähr 20 %. Aber sogar in diesem Bereich kann der Wert nach einer Klassifizierung von Luftwechselraten in historischen Gebäuden nach [Holmberg 1997] immer noch als niedrig angesehen werden und das Königshaus mit „gut“ bis „exzellent“ bewertet werden (siehe Tabelle 24).

### **6.1.3 Konservatorische Untersuchungen**

Die Ausstattung des Türkischen Saales wurde eingehend auf ihre Erhaltung hin untersucht [Holl 2010]. Dabei wurden die Schäden erfasst und bewertet. So sollte abgeschätzt werden, welche Schäden auf klimatische Ursachen zurückzuführen sind. Die im Türkischen Saal verwendeten Materialien wurden kunsttechnologisch untersucht und in der Folge quantitativ abgeschätzt, wie viel Textilien, Papier und gefasste sowie vergoldete Holzoberflächen sich im Raum befinden [Holl 2008]. Letzteres war erforderlich, um die anschließenden Raumklimasimulationen möglichst realitätsnah durchführen zu können. Zur Dokumentation der Schäden an der Ausstattung des Türkischen Saales wurde ein Katalog angefertigt.

#### **Schäden durch Mikroorganismen**

In den Jahren 2007 bis 2011 traten im Schachenhaus immer wieder auch höhere Werte der relativen Luftfeuchte auf. Das Risiko der Schimmelpilzbildung ist



vorhanden (Bild 25), kann aber für das Schachenhaus immer noch als gering eingestuft werden, da die hohen Feuchtwerte stets bei gleichzeitig geringen Temperaturen auftreten. Der extrem kritische Bereich, im Diagramm dunkelgrün dargestellt, wird nicht erreicht.

An der Ausstattung konnte bei der Untersuchung 2008 kein akuter Schimmelfall festgestellt werden. Es war geringfügige Schimmelpilzbildung vor allem in den Rundfenstern von West- und Ostseite zu erkennen, die wohl aufgrund von Wassereintrag durch starke Gewitter entstanden sind. Eine Laboranalyse am Fraunhofer IBP ergab, dass keine der entnommenen Proben aktives Schimmelpilzwachstum aufwies. Auch eine Auswertung mit dem Tool WUFI® Bio zeigt keine immanente Gefahr von Schimmelpilzwachstum [Krus 2012], was vor allem den geringen Temperaturen im Schachenhaus geschuldet ist.

### **Erfassung der feuchtepuffernden Materialien**

Ein Großteil der Ausstattung hat hygroskopische Eigenschaften, das heißt sie nimmt Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung auf und gibt diese bei sinkender relativer Feuchte wieder ab (siehe auch Kapitel 2.2.4). Durch ihre Sorptionseigenschaft beeinflussen die Materialien entscheidend das Raumklima mit. Die Erfassung, Kartierung und die anschließende Flächenberechnung ergab, dass die Ausstattung zu je etwa einem Drittel aus Textilien und vergoldeter Holzoberfläche besteht sowie aus farbig gefasstem Holz und – abgesehen von einem geringen Anteil Glas- und Metalloberflächen – aus weiteren sorptionsaktiven Materialien (Bild 23).

### **Ermittlung der Materialkenndaten der Ausstattung des Türkischen Saals**

Die Genauigkeit der Gebäudesimulation wird maßgeblich durch die Kenntnis der hygrothermischen Materialkennwerte und der Baukonstruktion bestimmt. Insbesondere das Wissen über die feuchtetechnischen Eigenschaften historischer Baustoffe und Materialien ist immer noch sehr begrenzt, da bisher kaum Forschungsarbeit in diesem Bereich durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 2.2.3). Deswegen wurden die im Türkischen Saal mengenmäßig am häufigsten vorkommenden Materialien hinsichtlich ihres feuchtetechnischen Verhaltens untersucht, um die für die Simulation in WUFI®-Plus relevanten Materialkenndaten zu bestimmen, insbesondere die Feuchtespeicherfunktion und die Diffusionseigenschaften.

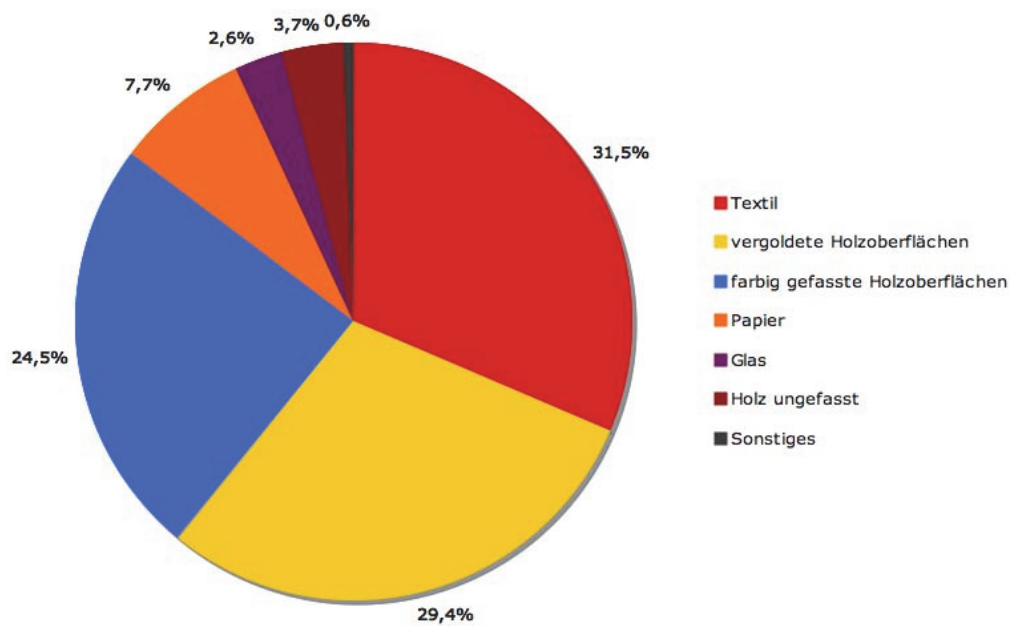


Bild 23: Flächenanteile der Materialien der Innenraumoberflächen und Ausstattung im Türkischen Saal nach [Holl 2008].

Dies erfolgte auf Grundlage der vorausgegangenen restauratorischen Untersuchungen. Die Hauptschwierigkeit bei der messtechnischen Erfassung der Materialkenndaten bestand darin, dass eine Entnahme von Originalproben in ausreichendem Umfang in einem wertvollen historischen Gebäude wie dem Schachenhause natürlich nicht möglich ist. Die historischen Materialien wurden daher auf Grundlage der restauratorischen Untersuchungen möglichst originalgetreu nachgebildet. Da ein Einfluss des Alterungsprozesses auf die Materialeigenschaften vermutet wird, wurden soweit möglich Materialien des gleichen Alters wie die Originale verwendet. Neben der Tapete und den gefassten und vergoldeten Holzflächen, wurden die Brokatseidenvorhänge, der Persische Teppich und die Rosshaarfüllung der Polstermöbel hinsichtlich ihrer Materialkenndaten untersucht.

Feuchtespeichereigenschaften sowie Feuchtetransportvorgänge bestimmen den Feuchtehaushalt eines Materials. Im Anhang sind in Tabelle E 1 die ermittelten Standardstoffkennwerte der Materialien zusammengestellt. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte wurden DIN ISO 12572, 2001 im Feuchtebereichsverfahren ermittelt. Neben diesen Messungen wurde auch die Rohdichte sowie die freie Wassersättigung der Materialproben in den Laboren des Fraunhofer IBP bestimmt.



Bild 24: Messung der Materialkennwerte an nachgestellten historischen Materialien. Links: originale Tapete, Mitte: nachgestellte Tapete mit Leinwandträger, Zeitung, Packpapier, Farb- und Goldfassung, Rechts: historischer Teppich bei der Diffusionssmessung in der Klimakammer. (Fotos: Fraunhofer IBP Kristina Holl / Barbara Wehle)

Zur Bestimmung der Sorptionseigenschaften kam das Klimakammerverfahren nach DIN ISO 12571, 2000 zum Einsatz. Die Adsorptionskurven der Materialproben der Ausstattung des Türkischen Saales wurden durch Messung der Ausgleichsfeuchte bei 50, 65, 80 und 93 % relativer Luftfeuchte bestimmt. Die Ergebnisse der Bestimmung der Sorptionsisothermen und Messung der freien Wassersättigung zur Approximation der Feuchtespeicherfunktion nach [Holm 2002a] sind im Angang in Tabelle E 2 zusammengefasst.

Damit wurden die wichtigsten hygrischen Materialkennndaten erfasst und nachfolgend im Simulationsprogramm übernommen. Da die thermischen Kenndaten wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität bezogen auf die Ausstattung für die Simulation wenig ausschlaggebend sind, wurden hier vergleichbare Literaturwerte bei der Eingabe verwendet. Die gemessenen Standardstoffkennwerte der Seidenstoffe mussten für die Simulation in WUFI®-Plus modifiziert werden. Da die Stoffe in Wasser quellen, ist der Wassergehalt bei der freien Sättigung im Vergleich zur Porosität in der Simulation zu hoch. Deshalb wurden Rohdichte sowie  $\mu$ -Wert und  $s_d$ -Wert bei gleich bleibender Porosität halbiert und die Wärmeleitfähigkeit verdoppelt (Tabelle E 3). Auch die entsprechenden Stoffkennwerte der Feuchtespeicherfunktion der Materialien wurden halbiert (Tabelle E 4), um gültige, realistische, Werte zu erhalten.

#### **6.1.4 Klima**

Von gleicher Relevanz wie die Beschaffung der Materialkenndaten für die Simulation und oft ebenfalls mit Schwierigkeiten verbunden ist die Bereitstellung verlässlicher Außen- und Raumklimadaten. Auch aus konservatorischer Sicht ist die Erfassung dieser unerlässlich. Um der Frage nachzugehen, welche Faktoren zur guten Erhaltung des Königshauses beitragen, werden seit September 2006 vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Türkischen Saal Messungen der Temperatur und der relativen Feuchte wie auch außen am Gebäude durchgeführt. Diese werden als Grundlage für die Kalibrierung der Simulation verwendet.

##### **Außenklima**

Zur Erfassung des Außenklimas ist ein Außenfühler mit Wetterhütte als Schutzvorrichtung auf dem Balkon an der Nordfassade angebracht. Dort sind die Verfälschungen der Messung durch direkte Sonneneinstrahlung im Sommer am geringsten. Diese Außenklimamessungen waren jedoch vor allem wegen Kälte und hoher Feuchte anfällig für Messausfälle und Messungenauigkeiten. Für die Simulation in Wufi®-Plus sind zusätzliche Außenklimaparameter wie beispielsweise Wind, Regen und Sonneneinstrahlung wichtig. Diese wurden für die Jahre 2006 und 2007 von den Wetterstationen Hohenpeißenberg und Zugspitze über den Deutschen Wetterdienst bezogen.

Im November 2009 wurde zudem in Kooperation mit der Technischen Universität München eine Wetterstation aufgestellt, die nun Wetterdaten in unmittelbarer Nähe des Königshauses erfasst. Dadurch ist es möglich, ein realitätsnäheres Wetterfile für die Simulation zu erzeugen. Die Messungenauigkeiten und Ausfälle hinsichtlich der relativen Feuchte und Lufttemperatur reduzieren sich dadurch auf ein Minimum.

##### **Raumklima im Türkischen Saal**

Seit Oktober 2006 bis heute werden vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik Messungen zum Raumklima durchgeführt. Zuerst wurde nur im Türkischen Saal gemessen, dann kamen auch Sensoren in Untergeschoss und Dachstuhl hinzu. Gemessen wurden die relative Luftfeuchte und die Raumlufttemperatur. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit Hilfe von Datenloggern. Im Fall des Königshauses kommt erschwerend hinzu, dass eine Überprüfung der Messvorrichtung wegen der Winterschließung nur von Juni bis Oktober möglich ist, weshalb es vor allem in den Wintermonaten immer wieder zu Messausfällen kam.

Es lässt sich feststellen, dass auf Grund des Fehlens jeglicher Klimatisierung bzw. Beheizung das Innenklima zeitverzögert dem Außenklima folgt. Im Inneren des Schachenhauses herrschen eher kühle Temperaturen.

Temperatur und relative Feuchte sind als Streudiagramm bzw. Punktwolke im Kontext eines Einteilungsschemas dargestellt (Bild 25) und als Wertepaar zu dem jeweiligen Messzeitpunkt aufgetragen. In diesem Schema werden Beurteilungskriterien der Qualität des Raumklimas im Kontext der präventiven Konservierung dargestellt. Die Raumklimawerte (blaue Punkte) sollten hier idealerweise in keinem der eingefärbten Bereiche liegen. In dem Schema ist die Gefährdung durch Mikroorganismen nach [Sedlbauer 2001] abgestuft nach unterschiedlichen Substratklassen dargestellt. Die relative Feuchtigkeit ist in diesem Kontext als zu hoch zu bewerten. Auch bedeutet eine hohe relative Feuchte eine verstärkte mechanische Belastung für organische Materialien, wie z. B. Leim bei Klimaschwankungen im Vergleich zu einem mittleren Feuchtebereich [Mecklenburg 2010a]. Aus dem Histogramm in Bild 35 kann die Häufigkeit der einzelnen Werte der relativen Luftfeuchte abgelesen werden. Als Intervallgröße wurde 1 % r.F. gewählt.

Während die erste Messperiode 2006 bis 2007 durch relativ milde Wetterverhältnisse geprägt war, was sich auch an den Messdaten innen zeigt (vgl. Bild 30, links), zeigt die Auswertung des gesamten Messzeitraumes (Bild 25) eine größere Schwankung der Werte von Temperatur und Luftfeuchte. Die mittlere relative Luftfeuchte im Türkischen Saal steigt im Lauf der Jahre an, und im Winter werden deutlich kältere Temperaturen erreicht.

Über den gesamten Messzeitraum von Oktober 2006 bis Oktober 2010 gesehen lag der Median der Temperatur im Türkischen Saal gerade einmal bei 4,1 °C. Der niedrigste gemessene Wert betrug -14,5 °C, in 5 % der Zeit lag die Temperatur unterhalb von -6,6 °C und in 25 % der Zeit unter 0,1 °C. In den Sommermonaten stieg die Temperatur auf maximal 23,6 °C an. Der Median der relativen Luftfeuchte liegt mit 66,1 % r.F. ungefähr 6 % r.F. höher als im deutlich trockeneren ersten Messjahr (vergleiche Bild 30). Die Luftfeuchte im Türkischen Saal erreichte insgesamt einen Maximalwert von 89,9 % r.F. In 90 % der Zeit bewegte sich die relative Feuchte in einem Bereich von 50 % bis 80 % r.F. und damit ungefähr auf einem höheren Niveau als im ersten Messjahr, was auf eine Änderung des Außenklimas zurückzuführen ist.

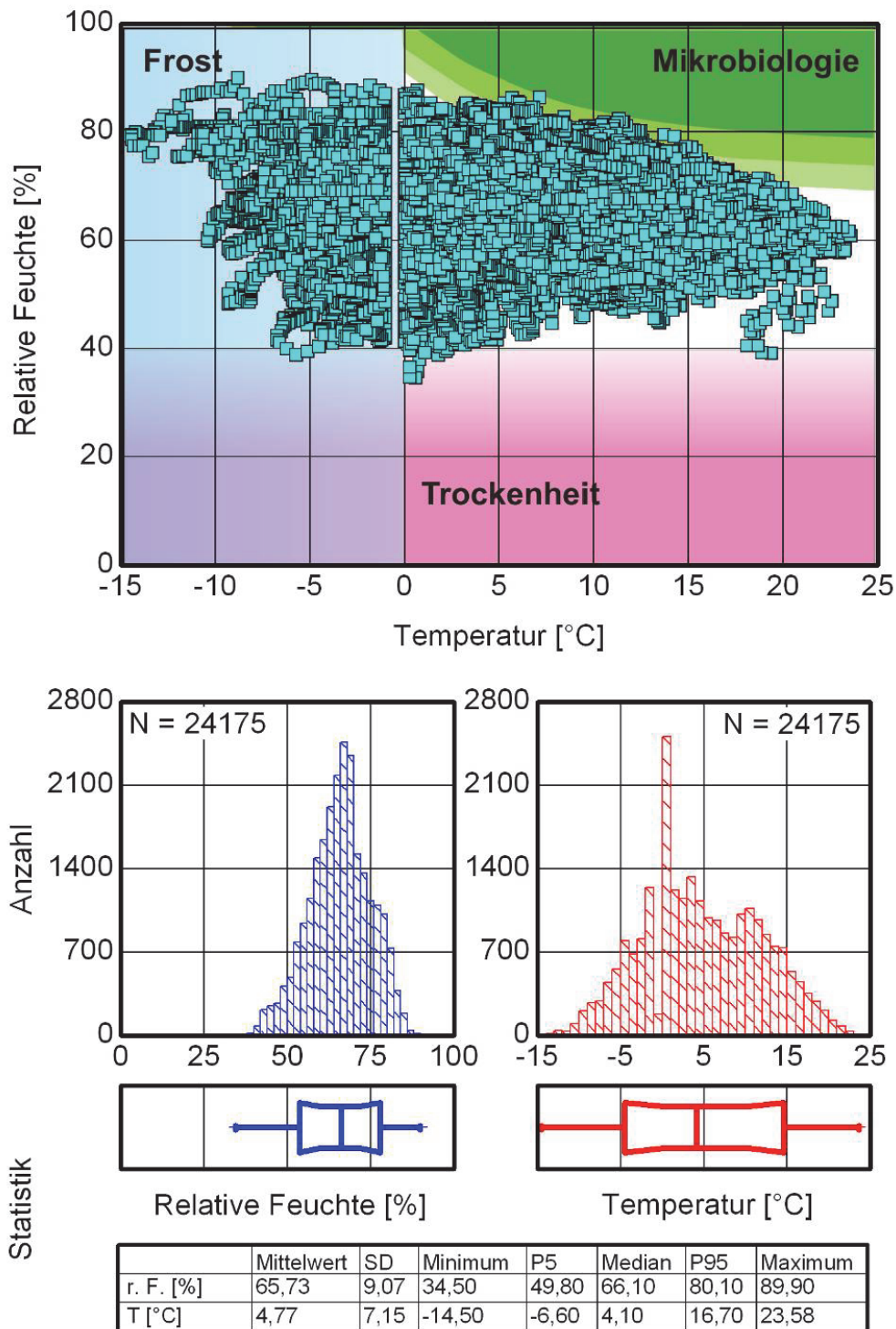


Bild 25: Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte im Türkischen Saal von 1.10.2006 bis 30.9.2010. Mitte: Histogramme und Box Plots der relativen Feuchte (links) und der Temperatur (rechts) der stündlich gemessenen Werte. Unten: Statistische Auswertung des Messjahres. Die fehlenden Messdaten zwischen 0 und -1 °C und die Spitze im Histogramm bei 0 °C sind auf einen Fehler des Datenloggers zurückzuführen.

### 6.1.5 Hygrothermische Gebäudesimulation

Das Raumklima im Königshaus am Schachen wurde mit der Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik simuliert. Eine 1. Simulation wurde 2008 mit vereinfachten Parametern durchgeführt und ist in [Kilian 2008] beschrieben. Alle in der Folge ermittelten Kenndaten zum Schachenhaus gingen in die 2. Gebäudesimulation ein [Wehle 2010].

#### 2. Simulation für die Jahre 2006/2007

In Variantenberechnungen wurden die verschiedenen, das Raumklima beeinflussenden Faktoren, in der Simulation berücksichtigt und das Modell sukzessive kalibriert. Das Dachgeschoss und der Türkische Saal wurden als zwei getrennte Zonen angesetzt (Bild 26). Das Königshaus wird in der Zeit von Oktober bis Ende Mai winterfest gemacht. In dieser Zeit des Jahres werden die Fenster durch Läden von außen verschlossen. In der Simulation wurden für diesen Zeitraum die Fenster durch opake Flächen mit einem angeglichenen Wärmedurchgangswiderstand (U-Wert) ersetzt. Mit Hilfe der ermittelten Materialkennwerte wurden in der Datenbank der WUFI®-Software neue Materialien für Tapete, gefasste und vergoldete Holzoberflächen, Vorhänge, Teppichboden und die Rosshaarfüllung der Polster definiert. In der Simulation wurde unter anderem der Einfluss der textilen Materialien auf die Raumklimastabilität sichtbar. Diese Materialien puffern Minimal- und Maximalwerte der relativen Luftfeuchte, was für den Erhalt der Kunstwerke im Türkischen Saal von großer Wichtigkeit ist.

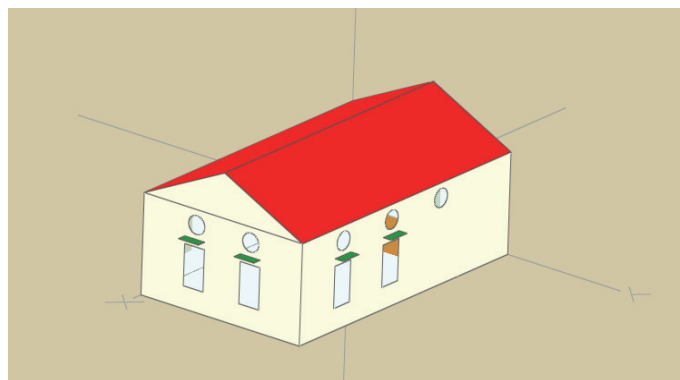


Bild 26: Gebäudegeometrie der 2. Simulation zum Raumklima im Türkischen Saal.

Die beste Übereinstimmung von Messwerten und Simulationsergebnissen im ersten Teil des Jahres zeigte sich bei einer konstanten Luftwechselrate von  $n = 0,57 \text{ h}^{-1}$  für Oktober bis Februar und von  $n = 0,42 \text{ h}^{-1}$  von März bis Mai. Für die Zeit von Juni bis Oktober, wenn im Königshaus Besucherverkehr herrscht, wurde in der Simulation eine über den Tag variierende Luftwechselrate im Be-



reich von  $n = 0,65$  bis  $1,0 \text{ h}^{-1}$  angesetzt (Bild 27). Insgesamt lagen die Werte für die Luftwechselrate in der 2. Simulation höher als die in der Tracergas-Messung ermittelten. Der Einfluss der Besucher als zusätzliche Wärme- und Feuchtequelle wurde in der Simulation als zeitliches Profil berücksichtigt und ist in [Wehle 2010] beschrieben.

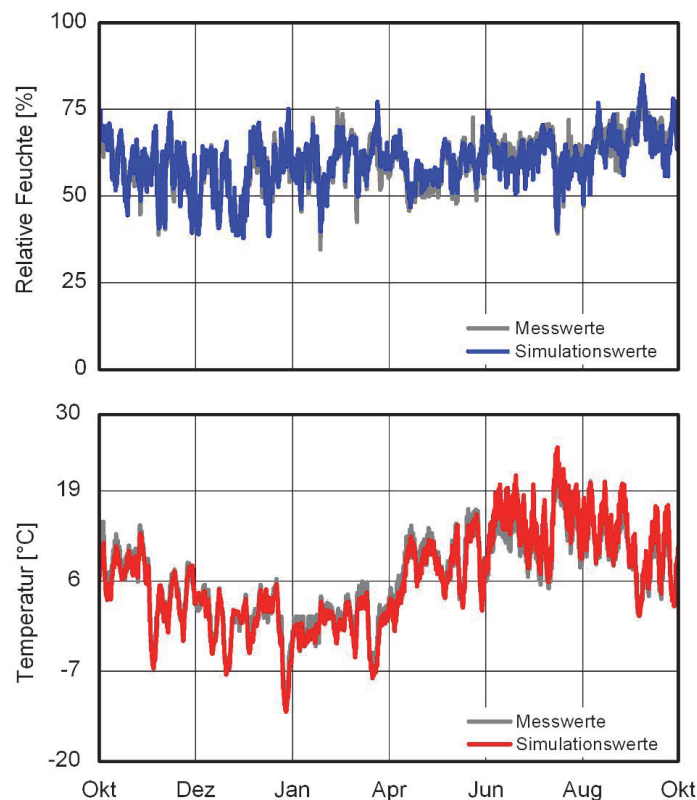


Bild 27: Ergebnis der 2. Simulation, Verlauf relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur im Türkischen Saal für den Zeitraum 1.10.2006 bis 30.9.2007.

### 3. Simulation für die Jahre 2010/2011 – Validierung des Modells

Um zu prüfen, ob die Kalibrierung des Modells die Rechnung von Varianten erlaubt, wurde eine Validierung mit einem weiteren Datensatz durchgeführt. Dazu wurde eine 3. Simulation für das Jahr 2010/2011 mit dem unveränderten Modell durchgeführt. Im Unterschied zur Simulation 2006/2007, bei der Wetterdaten vom Hohen Peißenberg und von der Zugspitze verwendet werden mussten, konnten erstmals Wetterdaten direkt vom Standort am Schachenhaus genutzt werden. Das Ergebnis zeigt deutlich, dass die relative Luftfeuchte im Mittel richtig abgebildet wird, zumindest für den Zeitraum von September 2010 bis Mai 2011, die Schwankungsbreite aber zu gering ausfällt. Das bedeutet, dass das Modell, das auf ein anderes Außenklima kalibriert wurde, eine zu hohe Luftwechselrate verwendet.



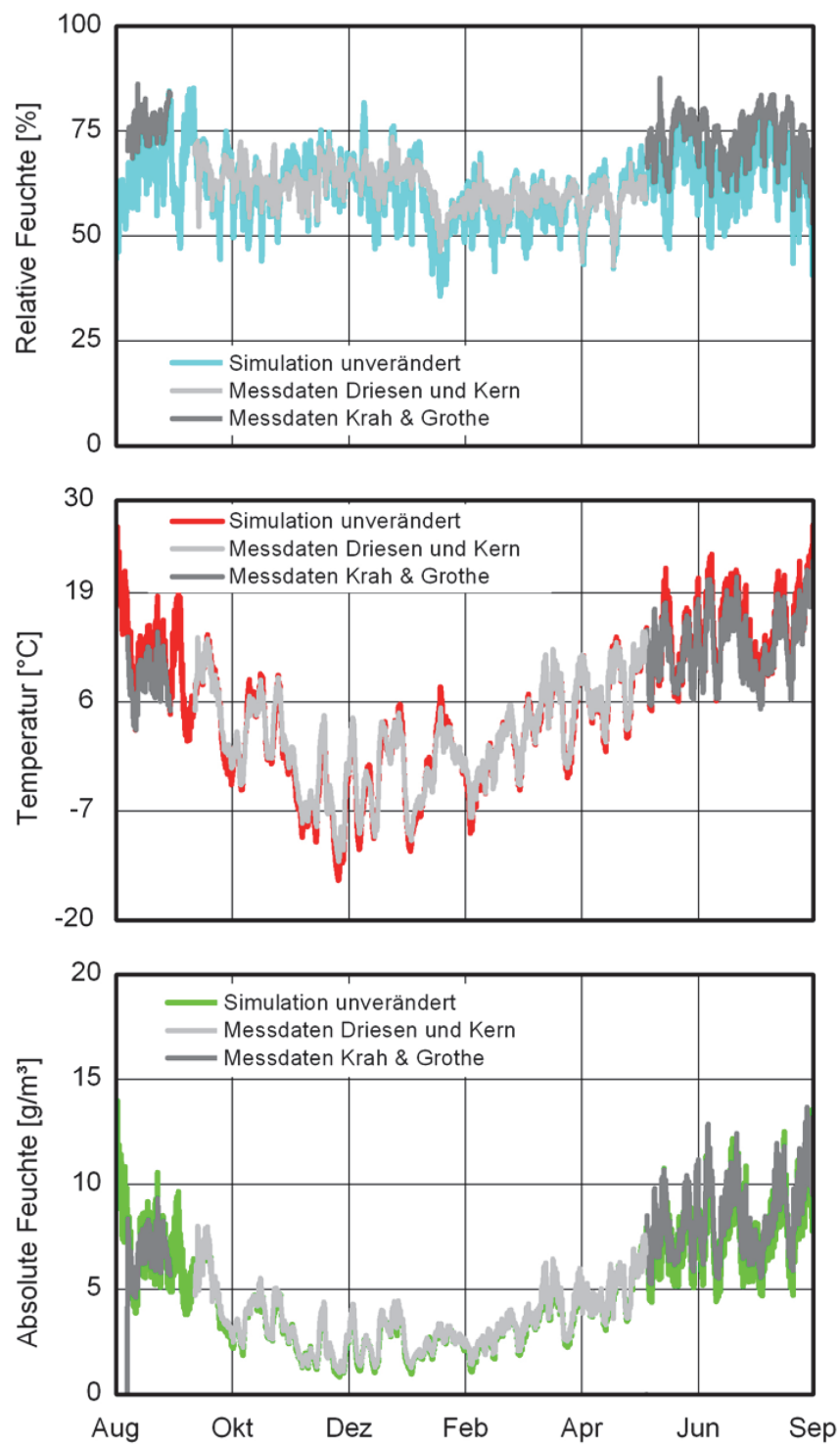


Bild 28: Validierung des Modells vom Schachenhaus. 3. Simulation mit den Daten vom 22.08.2010 bis 22.08.2011, Außenklima aus Messdaten der Wetterstation am Standort Schachen. Das Raumklima wurde mit Datenloggern von zwei Herstellern gemessen. Es wurde das unveränderte, kalibrierte Modell der 2. Simulation 2006/2007 verwendet. Die Temperatur stimmt weiterhin gut mit den Messungen überein, die relative Luftfeuchte zeigt in der Simulation deutlich stärkere Schwankungen als in der Realität.

Der Grund dafür liegt in der Verwendung der Klimadaten der weiter entfernten Wetterstationen und vor allem darin, dass bei der Messung des Außenklimas bisher ein nicht belüfteter Sensor in einer Wetterhütte verwendet wurde. Der Außensensor am Schachenhaus befindet sich auf dem Balkon auf der Nordseite und ist der Witterung des rauen Gebirgsklimas weniger ausgesetzt, als der Sensor der Wetterstation. Daher ist das dort aufgezeichnete Mikroklima gegenüber der frei stehenden Wetterstation etwas gedämpft. Um die realen, gemessenen Schwankungen des Innenraumklimas in der Kalibrierung des 2. Simulationsmodells trotzdem abzubilden, wurde die Luftwechselrate höher als in der Realität angesetzt, was zu der beschriebenen größeren Schwankungsbreite führt (siehe auch Tabelle 12).

Bei einer erneuten Kalibrierung des Modells mit den gemessenen Klimadaten der Jahre 2010/2011, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, ergab sich eine bessere Übereinstimmung durch Reduzierung der Luftwechselrate von 0,57 auf 0,29 h<sup>-1</sup> für den Winter und ein sommerliches Tagesprofil mit einem Luftwechsel zwischen 0,5 und 0,85 h<sup>-1</sup>.

### **6.1.6 Statistische Bewertung**

Im Folgenden werden die Simulationen der Jahre 2006/2007 und 2010/2011 einander gegenübergestellt und mit statistischen Methoden verglichen.

#### **Korrelationskoeffizienten**

Insgesamt weist die Korrelation der simulierten Temperatur und der Messdaten mit Werten nahe 1 ein sehr hohes Niveau auf (siehe Tabelle 10). Bei der Simulation der relativen Luftfeuchte wird die Verbesserung der Simulation durch die aufwendige Kalibrierung mit Bestimmung der feuchtepuffernden Materialien und saisonalen Profilen quantitativ nachvollziehbar mit einer Erhöhung des Korrelationskoeffizienten  $r_s$  von 0,7364 auf 0,79545.

Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Bravis-Pearson sowie Test der Messwerte und Simulationsdaten aus dem Türkischen Saal auf Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov, Normalverteilung der Daten bei einem Signifikanzlevel  $\alpha < 0,05$ .

Simulation	Parameter	Test auf Normalverteilung $\alpha$ Kolmogorov - Smirnov	Korrelationskoeffizienten	
			Pearson $r_{xy}$	Spearman $r_{sp}$
Messdaten	r.F. [%]	0,035	-	-
Messdaten	T [°C]	0,049	-	-
vereinfachte Sim.	r.F. [%]	0,045	0,775	0,736
vereinfachte Sim.	T [°C]	0,040	0,972	0,970
Optimierte Sim.	r.F. [%]	0,051	0,840	0,795
Optimierte Sim.	T [°C]	0,056	0,983	0,983
Messdaten 2011	r.F. [%]	0,089	-	-
Messdaten 2011	T [°C]	0,044	-	-
Validierung 2011	r.F. [%]	0,045	0,670	0,683
Validierung 2011	T [°C]	0,041	0,990	0,990

### Lageparameter

Bei dem Vergleich der Lageparameter für das Jahr 2006/2007 zeigt sich die Verbesserung von der 1. groben Simulation zur 2. mit dem verfeinerten und erweiterten Modell. Der Median der Messwerte und der 2. Simulation stimmen überein. Während bei der ersten Simulation die Spannweite der Daten für die relative Feuchte unterschätzt wird, so wird sie in der 2. Simulation eher überschätzt, was auch an der Lage des Maximums deutlich wird. Werden die Ausreißer nach oben ausgeklammert, zeigt sich vor allem bei der Betrachtung des 1. und des 99. Quantils wie auch bei den beiden Quartilen die Güte der Kalibrierung für die relative Luftfeuchte bei der 2. Simulation.

Tabelle 11: Statistische Lageparameter von Temperatur und relativer Luftfeuchte der Messungen und der verschiedenen Varianten der Simulation des Türkischen Saals im Königshaus auf dem Schachen, 1. und 2. Simulation und Messdaten vom 1.10.2006 bis 30.9.2007, 3. Simulation und Messdaten vom 1.10.2010 bis 21.8.2011. Bewertung der Übereinstimmung **Hervorragend** / **Akzeptabel** / **Gering** nach den vorgeschlagenen Kriterien für Lageparameter (S. 92).

	Min.	P1	1. Quartil	Median	3. Quartil	P99	Max.	Range
<b>Jahr 2006/2007</b>								
<b>relative Luftfeuchte [% r.F.]</b>								
<b>Messung</b>	34,5	<b>42,2</b>	55,7	<b>60,8</b>	65,4	<b>74,8</b>	77,5	<b>43,0</b>
<b>1. Sim</b>	35,6	<b>40,6</b>	50,0	<b>54,4</b>	58,8	<b>67,5</b>	71,9	<b>36,3</b>
<b>2. Sim</b>	38,3	<b>40,6</b>	55,9	<b>60,3</b>	64,1	<b>76,4</b>	88,8	<b>50,5</b>
<b>Temperatur [° C]</b>								
<b>Messung</b>	-10,4	<b>-7,1</b>	1,5	<b>6,4</b>	11,25	<b>19,6</b>	23,3	<b>33,7</b>
<b>1. Sim</b>	-9,9	<b>-5,9</b>	3,3	<b>8,2</b>	13,4	<b>21,5</b>	25,9	<b>35,8</b>
<b>2. Sim</b>	-12,9	<b>-8,3</b>	1,3	<b>6,4</b>	11,4	<b>21,3</b>	25,2	<b>38,1</b>
<b>Jahr 2010/2011</b>								
<b>relative Luftfeuchte [% r.F.]</b>								
<b>Messung</b>	42,8	<b>50,3</b>	59,8	<b>63,3</b>	68,5	<b>81,4</b>	87,7	<b>45,0</b>
<b>3. Sim</b>	35,9	<b>41,6</b>	56,3	<b>61,6</b>	65,6	<b>75,6</b>	82,0	<b>46,1</b>
<b>Temperatur [° C]</b>								
<b>Messung</b>	-13,0	<b>-10,5</b>	-1,0	<b>4,6</b>	10,1	<b>19,8</b>	22,9	<b>35,9</b>
<b>3. Sim</b>	-15,3	<b>-12,6</b>	-1,5	<b>4,5</b>	9,8	<b>20,3</b>	24,1	<b>39,4</b>

Aufschlussreich ist die Betrachtung der Lageparameter der 3. Simulation. Die Abbildung der relativen Luftfeuchte durch das Modell erscheint hier trotz der deutlich höheren Schwankungen zwischen Simulation und Messwerten (Bild 28) auf den ersten Blick hinreichend gut. Bei der Analyse der Daten werden diese beiden Aspekte nicht sichtbar. Median und Spannweite der relativen Luftfeuchte sind gut abgebildet, die Simulation liegt insgesamt um ca. 5 % r.F. unterhalb der Messung. Bei der Temperatur zeigt sich eine höhere Spreizung der Daten rund um den Median, der gut abgebildet wird.

### 6.1.7 Test auf Schadensfunktionen

Im Königshaus auf dem Schachen existieren, wie die konservatorischen Untersuchungen von [Holl 2008] zeigen, nur wenige Schäden. Ein Kriterium, das immer wieder zur Beurteilung der Güte eines Raumklimas herangezogen wird, sind kurzfristige Schwankungen, siehe z. B. [ASHRAE 2007]. Anstelle einer Schadensfunktion wird daher die Simulation in Bezug auf die korrekte Abbildung der täglichen Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte überprüft. Dabei wird von einem festen Tagesintervall ausgegangen und die Spannweite betrachtet. Die in Kapitel 6.2 beschriebene Methode der gleitenden Schwankungsbreite macht zwar höhere Fluktuationen sichtbar, für den reinen Ver-

gleich zweier Datensätze ist die Auswertung mit der tägliche Schwankungsbreite ausreichend.

### Vergleich der täglichen Schwankungsbreite

In einer statistische Auswertung des Raumklimas werden die täglichen Schwankungsbreiten der relativen Luftfeuchte in Simulation und Messung ermittelt und verglichen. Dazu wurde der Mess- und Simulationszeitraum Oktober 2006 bis Oktober 2007 herangezogen.

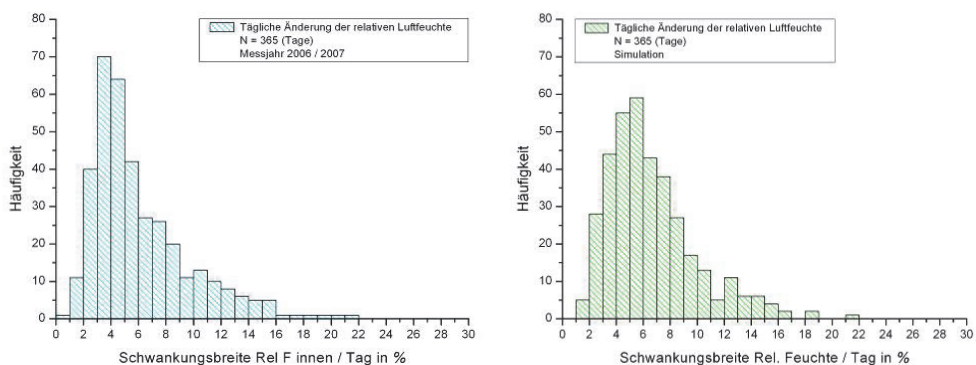


Bild 29: Histogramme der Schwankungsbreite der relativen Feuchte innerhalb eines Tages im Jahr 2006/2007 in Messung (links) und 2. Simulation (rechts) nach [Wehle 2010].

Zur Bestimmung der Häufigkeiten der täglichen Schwankungen wird eine Klassenbreite von 1 % r.F. festgesetzt (siehe auch Tabelle B 2). Die täglichen Schwankungsbreiten von Messung und Simulation stimmen bei Betrachtung der Histogramme gut überein (siehe Tabelle B 1 und Bild 29). Erst durch die detaillierte Auswertung und Gegenüberstellung der einzelnen Klassen und Wertebereiche zeigt sich die tatsächliche Güte der Abbildung der kurzfristigen Schwankungen.

Die in Kapitel 5.3 vorgeschlagenen Kriterien für die Genauigkeit der Vorhersage von Ereignissen mit einer Quote von 0,75 bis 1,5 für „akzeptabel“ und 0,95 bis 1,10 für „hervorragend“ erfüllt die 1. Simulationen in 2 von 4 Fällen (Tabelle 12, grün hinterlegt). Wird nur der Bereich höherer Schwankungen betrachtet, so werden die Bewertungskriterien durch die 2. Simulation nahezu erfüllt. Grundsätzlich ermöglicht diese Form der Auswertung eine Einschätzung der Genauigkeit der Abbildung in unterschiedlichen Werte-Bereichen. So ist der Bereich unter 10 %  $\Delta$  r.F./d für die Entwicklung von Schäden durch mechanische Spannungen weniger relevant als der Bereich größer 10 %  $\Delta$  r.F./d. In der Auswertung zeigt sich deutlich, dass die Schwankungsbreite mit dem unveränderten Modell bei der 3. Simulation zu hoch ist, der Bereich über 10 %  $\Delta$  r.F./d

wird darin zu mehr als 100 % überschätzt, der Bereich über 15 %  $\Delta$  r.F./d um mehr als 500 %. Das deutet darauf hin, dass entweder die Feuchtepuffernden Eigenschaften des Raums nicht richtig abgebildet werden oder aber die Luftwechselrate in der Simulation stark überschätzt wird. Im Prozess der Kalibrierung müssen diese beiden Punkte in einem nächsten Schritt geprüft werden.

Tabelle 12: Anzahl N der Änderungen der relativen Luftfeuchte innerhalb eines Tages im Türkischen Saal für die beiden Simulationszeiträume und Quote der Vorhersage  $Q_v$  der Simulationen bezogen auf die Messdaten. Bewertung der Quote der Übereinstimmung in die Kategorien **Hervorragend** / **Akzeptabel** / **Gering** nach den vorgeschlagenen Kriterien aus Kapitel 5.3. Die Anzahl der Ereignisse zur Berechnung der Vorhersagequote  $Q_v$  für Ereignisse  $> 15\%$   $\Delta$  r.F./d liegt unter der geforderten Stichprobengröße von 20 und ist daher nur mit Einschränkungen zur Bewertung heranzuziehen (grau hinterlegt).

<b>Änderung <math>\Delta</math> r.F./d</b>	<b>N (Messung) 2006/2007</b>	<b>N (1. Sim) 2006/2007</b>	<b>N (2. Sim) 2006/2007</b>	<b>N (Messung) 2010/2011</b>	<b>N (3. Sim) 2010/2011</b>
$\leq 5\%$ r.F.	186	126	124	201	112
$Q_v$		0,68	0,67		0,56
$> 5\%$ r.F.	179	239	241	123	212
$Q_v$		1,34	1,35		1,72
$> 10\%$ r.F.	53	51	65	25	58
$Q_v$		0,96	1,23		2,32
$> 15\%$ r.F.	11	6	12	2	13
$Q_v$		0,55	1,09		6,50

Die Schwankungen der relativen Luftfeuchte im Königshaus innerhalb eines Tages liegen die meiste Zeit unterhalb 15 % r.F. Änderung pro Tag. Der gute Erhaltungszustand der Ausstattung im Schachenhäuser unterstützt damit die These aus neueren Erkenntnissen von [Bratasz 2010] und [Mecklenburg 2010a], dass Änderungen in diesem Bereich weitestgehend unkritisch für gefasste Holzoberflächen sind.

### **6.1.8 Zusammenfassung**

Durch die genauere Ermittlung der Eingabeparameter und eine feinere Kalibrierung wurde das Ergebnis gegenüber der 1. Simulation deutlich verbessert. Das kalibrierte Modell der 2. Simulation kommt der Realität sehr nahe, wie die Vergleiche der statistischen Lageparameter und die Abbildung der täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte zeigen. Insgesamt stimmen Simulationsergebnisse und Messwerte gut überein, was für die Richtigkeit der zugrunde gelegten Eingabeparameter spricht.

Die Validierung mit dem Datensatz von 2010/2011 zeigt, dass die Kalibrierung zwar insgesamt erfolgreich war, der Luftwechsel und damit der Einfluss des Außenklimas jedoch bei der 2. Simulation überschätzt worden war. Die 3. Simulation zeigt damit auch die Dominanz des Luftwechsels als Eingabeparameter für Schwankungsbreite des Raumklimas und die Wichtigkeit der Klimamessung vor Ort durch eine Wetterstation oder einen zwangsbelüfteten Sensor.

Die Untersuchungen im Königshaus auf dem Schachen zeigen, dass ein stabiles Raumklima entscheidend zur Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung historischer Gebäude beiträgt. Trotz des extremen Bergklimas verfügt das Gebäude über ein relativ stabiles Raumklima innerhalb bestimmter Grenzen und es treten nur wenige klimatisch bedingte Schäden auf. Dies ist zum einen dem geringen Luftwechsel infolge einer dichten Gebäudehülle aufgrund der Haus-in-Haus Konstruktion geschuldet, zum anderen durch die Feuchtespeicherung der Materialien der Innenausstattung. Durch die Simulationen konnte gezeigt werden, dass die feuchtepuffernden Materialien einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität des Raumklimas haben, wie der Vergleich von Messung und Simulation des Innenraumklimas ohne Einfluss der Feuchtepufferung zeigt (Bild 30).

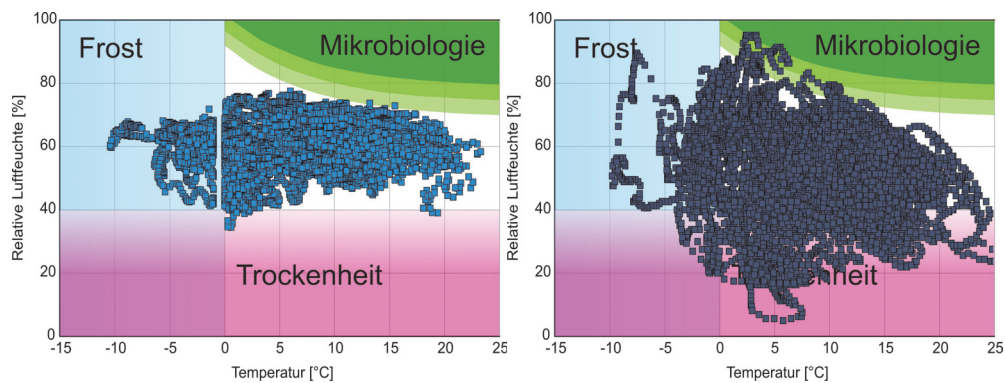


Bild 30: Das Raumklima im Türkischen Saal von Oktober 2006 bis Oktober 2007. Der Vergleich zwischen Messung (links) und der 1. Simulation des Raumes ohne Berücksichtigung der Feuchtepufferung der Materialien (rechts) zeigt die Wirkung auf die Klimastabilität durch die Reduzierung von Klimaschwankungen.

Ein weiterer Grund für das günstige Raumklima ist neben der Baukonstruktion das Fehlen von jeglicher Beheizung oder Klimatisierung. Die Problematik, die mit dem Heizen von Räumen in der kalten Jahreszeit verbunden ist und aufgrund von zu geringer relativer Feuchte zu Schäden an den Ausstattungsgegenständen führt, ist hier nicht relevant. Die Folge sind allerdings tiefe Temperaturen bis unter den Gefrierpunkt im Winter. Auch lange Frostperioden scheinen den am Schachen verwendeten Kunstmaterialien keine größeren Schäden zuzufügen. Verglichen mit dem Erhaltungszustand sind diese tiefen Temperaturen offensichtlich weniger schädlich für die Objekte als zu hohe relative Luftfeuchte oder starke Feuchteschwankungen. Hinzu kommt, dass das Königshaus nur vier Monate im Jahr für die Öffentlichkeit zugänglich ist. In der restlichen Zeit sind die Fenster mit Läden verschlossen und das Gebäude gegen die Einwirkungen von Klima und Licht geschützt. Die Klimamessungen und Simulationsergebnisse zeigen, dass die Führungen mit auf 30 Personen begrenzter Besucherzahl nur eine geringe Auswirkung auf das Raumklima im Türkischen Saal haben.

Nur ein kalibriertes und validiertes Modell mit präzise erhobenen Raumklima- und Wetterdaten kann für die im Rahmen des EU Projektes „Climate for Culture“ geplanten Vorhersagen für in Folge des Klimawandels veränderte Innenraumbedingungen verlässliche Ergebnisse liefern, sonst überwiegen zu hohe Unsicherheiten.



## 6.2 Schloss Linderhof

Im Rahmen des Forschungsprojektes »Klimastabilität historischer Gebäude« wurden detaillierte Untersuchungen zu Baukonstruktion, Nutzung, Lüftung und Raumklima an Schloss Linderhof durchgeführt, siehe [Bichlmair 2011a], [Bichlmair 2010] und [Bichlmair 2011b]. Ziel ist es, anhand der Analyse des Raumklimas eine Risikoabschätzung für die originale Ausstattung von Schloss Linderhof zu erarbeiten und in der Folge Konzepte für eine Verbesserung des Raumklimas zu entwickeln. Dazu wird eine Gebäudesimulation von Teilbereichen des Schlosses durchgeführt, um die Wirkung verschiedener Maßnahmen abschätzen zu können, insbesondere für das Paradeschlafzimmer. Die Qualität der Simulationen wird mit den neu entwickelten Kriterien bewertet. Mit dem validierten Modell werden Szenarien und Falluntersuchungen zum Besuchereinfluss, Lüftung und Beheizung im Paradeschlafzimmer durchgeführt und hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Klimastabilität diskutiert.

### 6.2.1 Hintergrund und Baugeschichte

Schloss Linderhof wurde durch den bayerischen König Ludwig II. in den Jahren 1868 bis 1886 erbaut. Inmitten der bayerischen Voralpen liegt das Schloss auf ca. 950 m NN über dem Meeresspiegel zwischen Garmisch und Füssen. Umgeben von der Parklandschaft steht es relativ offen in dem ansonsten bewaldetem Tal- und Berggelände (Bild 31). Das Schloss wurde kurz nach dem Tod von König Ludwig II. im Jahr 1886 zur Besichtigung für Besucher freigegeben.

Die relative Luftfeuchte hängt in unbeheizten Gebäuden im Wesentlichen von der Feuchteproduktion durch innere Quellen (wie Besucher) sowie der Belüftung des Gebäudes ab. Beides sind wichtige Aspekte für Linderhof. Um das Schloss und sein Raumklima besser zu verstehen, werden zunächst die wesentlichen Randbedingungen der Baukonstruktion, Nutzung durch Besucher, Belüftung und vorherrschende Klimata untersucht und bewertet. In einem nächsten Schritt werden diese Daten in die Gebäudesimulation integriert und das Simulationsmodell des Paradeschlafzimmers in WUFI®-Plus näher erläutert. Anschließend werden die Berechnungen aus der Simulation mit den gemessenen Raumklimadaten verglichen. Daraus folgend wird die Güte des Simulationsmodells diskutiert. Mit dem validierten Rechenmodell und den festgelegten Parametern werden weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Besucher und des Luftwechsels durchgeführt. Die Simulationen dienen der Erstellung eines Konzeptes zur Verbesserung des Raumklimas.

## 6.2.2 Grundlagenermittlung

Für das Verständnis des Raumklimas im Schloss wie auch für die Simulation des Gebäudes ist eine genaue Kenntnis über den konstruktiven Aufbau und verwendete Materialien erforderlich. Die Außen- und Innenwände sind aus Ziegelmauerwerk aufgebaut. Auf der Raumseite ist in jedem Raum im Obergeschoss eine zumeist vollflächige Holzkonstruktion mit einem Abstand von einigen Zentimeter vorgesetzt. Auf dieser flächigen Holzkonstruktion sind vergoldete Schnitzereien, Farbfassungen und weitere Dekorationen wie Tapissereien aufgebracht. Auf den als Holzkonstruktion ausgeführten und verputzten Gewölbedecken sind in den Prunkräumen auf der Rauminnenseite oft Deckenbilder, wie in Bild 31 rechts zu sehen. Die Bodenkonstruktion des Obergeschosses besteht aus massiven Holzbalken, die mit einer Kiesschüttung im Fehlboden verschlossen ist. An der Unterseite im Erdgeschoss ist größtenteils Putz aufgebracht. Die entsprechenden feuchtetechnischen Kennwerte der im Schloss verbauten historischen Materialien für die Simulation stammen aus der Datenbank der Software WUFI® und dem Bericht zum Königshaus am Schachen [Wehle 2011].

Die Fenster sind aus der Bauzeit erhalten und überwiegend Einfachfenster. Im Paradeschlafzimmer sind die Fenster als Kastenfenster mit zwei Flügeln in Einfachverglasung ausgeführt und schließen mit engem Abstand dicht ab. Vor den Fenstern befindet sich auf der Rauminnenseite ein innerer Holz-Klappladen, der täglich nach Ende der Öffnungszeiten geschlossen wird. Vor allen Fenstern mit Ausnahme des Paradeschlafzimmers sind zusätzlich als Lichtschutz Vorhänge angebracht, die auch bei geöffneten Fenstern meist geschlossen bleiben. Außen verfügt das Schloss über einen Außenlichtschutz in Form von weiß-blau gestreiften Markisen, die 2004 nach originalem Vorbild rekonstruiert wurden.

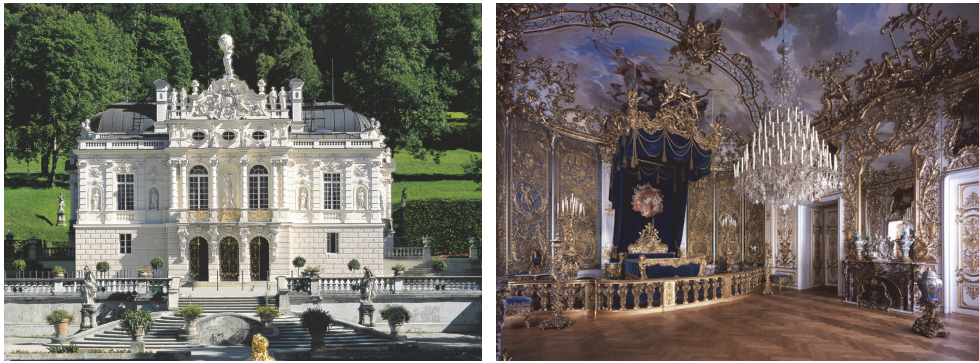


Bild 31: Links die Vorderansicht von Schloss Linderhof mit Haupteingang, rechts das königliche Schlafzimmer mit dem Paradebett (Bilder: Bayerische Schlösserverwaltung).

### **Nutzung Schloss Linderhof**

Die Nutzung von Schloss Linderhof als Museum hat aus bauphysikalischer Sicht einen erheblichen Einfluss auf interne Feuchtelasten (wie Besucher) und den Luftwechsel, und damit auf den Einfluss des Außenklimas.

### **Besucher, Aufenthaltsdauer, Profile für Wärme- und Feuchteabgabe**

Schloss Linderhof ist bis auf fünf Tage ganzjährig für Besucher geöffnet, die meisten kommen im Sommer. Die Öffnungszeiten sind im Sommerhalbjahr von 8 bis 18 Uhr, im Winterhalbjahr von 10 bis 16 Uhr. Im dem Jahreszeitraum 12 / 2009 bis 12 / 2010 kamen 450.756 Besucher nach Linderhof. Während in den Wintermonaten von Dezember bis Februar die geringsten Besucherzahlen mit durchschnittlich 299 Besucher pro Tag zu verzeichnen sind, kommen in den Sommermonaten von Juli bis September durchschnittlich 2391 Personen täglich.

Die Besucher beeinflussen maßgeblich das Raumklima, indem sie Wasserdampf, Wärme und Kohlendioxid an die Raumluft abgeben. Zur mengenmäßigen Bestimmung der Emissionen wurde die Aufenthaltsdauer der Besucher gemessen. Für das Paradeschlafzimmer wurde die tatsächliche Anwesenheit mit 4,7 Minuten/Besucher ermittelt. Anhand der Besucherzahlen, der Aufenthaltsdauer und der nach VDI Richtlinie 2078, 1996 zugrunde gelegten Feuchte- und Wärmeabgabe pro Person wurden detaillierte stündliche Emissionsprofile für das Simulationsjahr erstellt.

### **Lüftung, Luftwechselrate und Luftwechselprofil**

Das Schloss wird im Sommer ab 7.00 Uhr durch das Personal aufgeschlossen. Es werden in der Regel alle Fenster zur Stoßlüftung bis 8.00 Uhr geöffnet.

Mit Beginn der Besuchszeit wird dann durch die Schlossführer nach Bedarf bzw. eigenem Ermessen weiter gelüftet. Für die Frischluftversorgung der vielen Besucher wird in den Sommermonaten intensiver gelüftet. Das hohe Besucheraufkommen im Sommer verursacht damit indirekt einen erhöhten Luftwechsel gegenüber den Wintermonaten mit nur geringem Besucheraufkommen. Das bedeutet, dass im Sommer bzw. an wärmeren Tagen unter Umständen alle Fenster im Obergeschoß über den ganzen Tag geöffnet sind. In Bild 32 sind die Fenster, die zur Lüftung verwendet werden, eingezeichnet. Einzig im Paradeschlafzimmer werden die Fenster nie geöffnet.

Zur Erfassung des tatsächlich vorhandenen Luftwechsels wurde mit der passiven homogenen Spurengasmethode DIN ISO 16000-8, 2008, die Luftwechselrate im Paradeschlafzimmer und angrenzenden Räumen gemessen. Es wurde jeweils im Sommer und im Winter über einen Zeitraum von 2 Wochen während des normalen Besucherbetriebes die Luftwechselrate als Durchschnittswert gemessen. Die Werte sind bemerkenswert niedrig (siehe Tabelle 13), trotz teilweise im Sommer täglich bis zu 11 Stunden geöffneter Fenster. Ein Grund dafür sind sicher die Vorhänge zum Lichtschutz, die im Sommer immer trotzdem vor den Fenstern geschlossen sind.

Tabelle 13: Mit der Tracergasmethode ermittelte sowie für die Simulation verwendete Luftwechselraten im Paradeschlafzimmer. Im Sommer fand eine zusätzliche Tag/ Nacht Messung statt.

Außenluftwechsel	Tag [h <sup>-1</sup> ]	Nacht [h <sup>-1</sup> ]	Durchschnitt [h <sup>-1</sup> ]
Messwerte (Sommer)	0,37	0,15	0,26
Messwerte (Winter)	-	-	0,13
Simulation (Sommer)	0,50	0,10	0,26
Simulation (Winter)	0,20	0,10	0,13

Die Windintensität der Luftwechsellmessung im Sommer vom 6. bis 22. September 2010 war nur gering und wurde an der Wetterstation mit durchschnittlich 1,85 m/s gemessen, basierend auf stündlichen Mittelwerten. Dies entspricht einer mittleren Beaufort Windstärke zwischen 1 und 2 oder einer „leichten Brise“. Als Maximum der Windgeschwindigkeit wurde 3,31 m/s gemessen, Windstärke 3, entsprechend einer „schwache Brise“. Bei höheren Windgeschwindigkeiten stellen sich höhere Luftwechselraten ein [Kilian 2004].

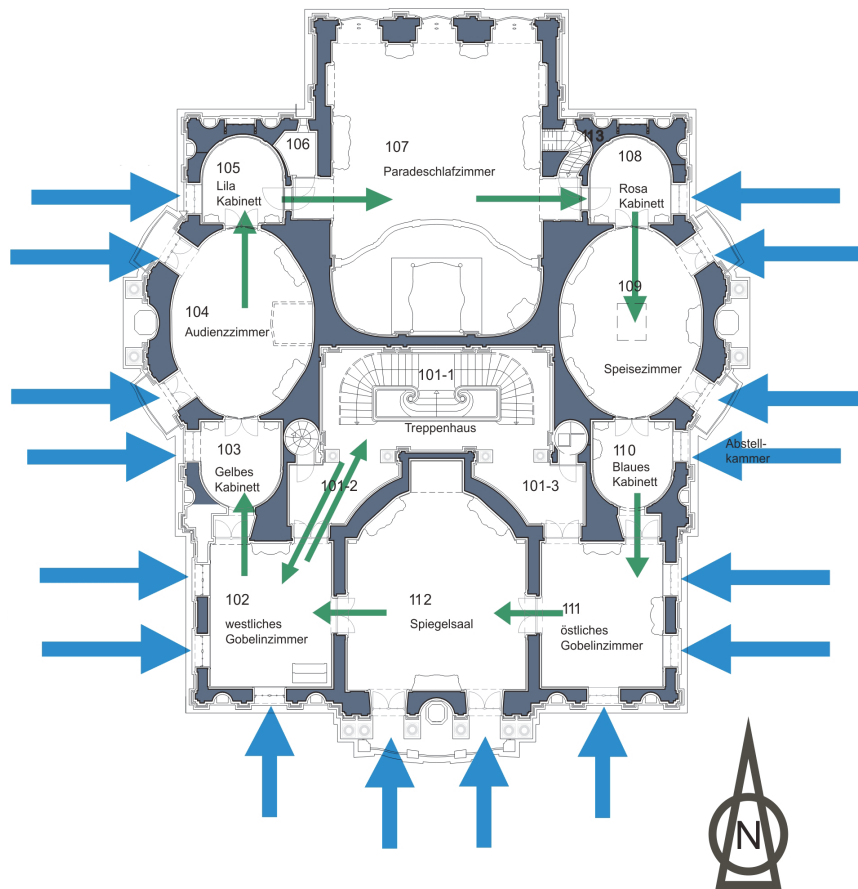


Bild 32: Obergeschoss mit Führungsrouten und Lüftungsmöglichkeiten im Grundriss nach [Bichlmair 2011b]. Die grünen Pfeile zeigen den Weg entlang der Führungsrouten, die blauen Pfeile die zur Lüftung verwendeten Fenster. (Planmaterial Bayerische Schlösserverwaltung).

### 6.2.3 Klima

Das Raumklima im Schloss wird vor allem durch die Besucher und das Außenklima beeinflusst. Hier wird exemplarisch das Raumklima im Paradeschlafzimmer beschrieben, die Ergebnisse sind weitestgehend übertragbar auf die anderen Prunkräume. Weitere Analysen sind im IBP-Bericht zu Schloss Linderhof [Bichlmair et al 2011b] enthalten.

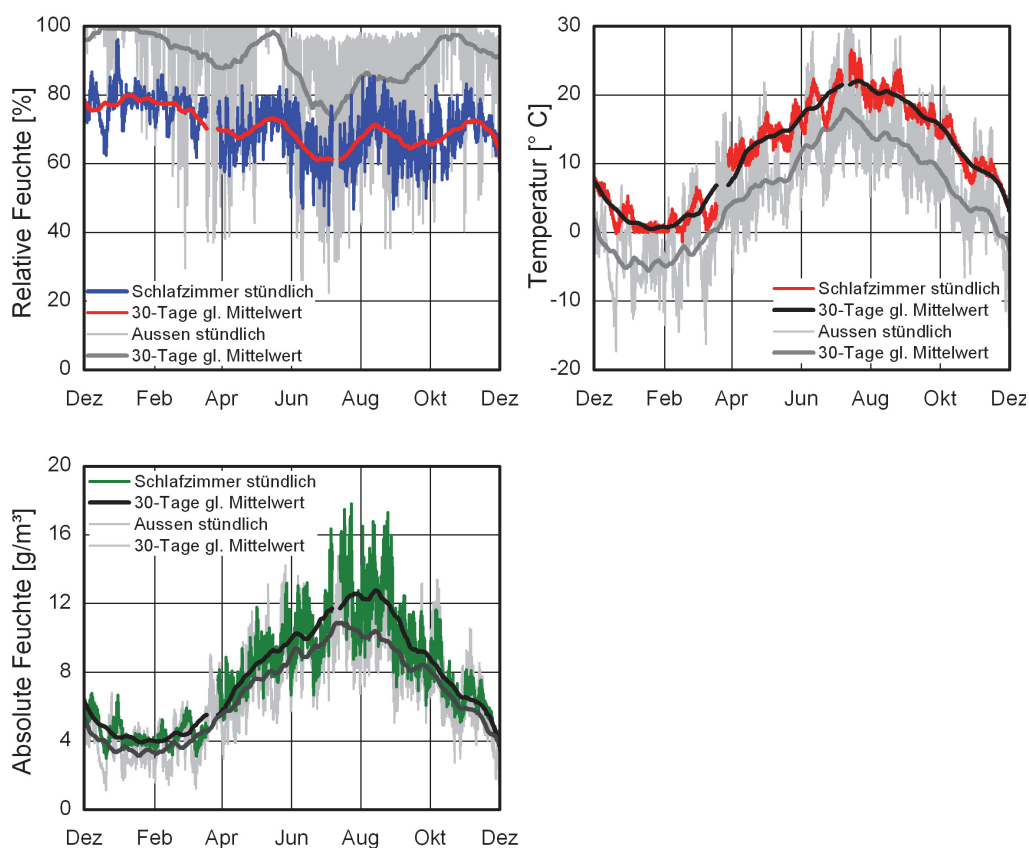


Bild 33: Gemessene relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer und Außenklima in Linderhof von 12/2009 bis 12/2010. [Bichlmair 2011b] Die Betrachtung der gleitenden 30-Tage Mittelwerte zeigt, dass die Temperatur und auch die absolute Luftfeuchte durch den Einfluss der Besucher im Schloss im Mittel höher als die Werten des Außenklimas liegen.

### Raumklima im Paradeschlafzimmer vs. Außenklima

Die Klimamessungen in Linderhof begannen im Februar 2008. Seit Dezember 2009 werden stündliche Messdaten in fast allen Räumen gemessen. Im Folgenden werden die Klimadaten für das Paradeschlafzimmer im Kontext des Außenklimas für den Zeitraum 12/2009 bis 12/2010 näher betrachtet. Das Außenklima geht als Randbedingung in die Simulation mit ein. Das gemessene Raumklima wird als Referenz zum Simulationsergebnis verwendet, um das rechnerische Modell zu kalibrieren und zu validieren.

Die Raumluftfeuchte im Paradeschlafzimmer liegt über das Jahr betrachtet auf hohem Niveau, der Median der relative Feuchte ist bei 72 % r.F., das bedeutet, dass die Feuchte im Raum die Hälfte der Zeit oberhalb dieser Marke liegt. Die Innentemperatur des unbeheizten Raums folgt der Außentemperatur und reicht von -1,4 °C bis 26,5 °C im stündlichen Mittel. Das Jahresmittel der Innentem-

peratur beträgt 11,4 °C und ist damit um ca. 5,9 Kelvin höher im Vergleich zum Außenklima. An der absoluten Luftfeuchte ist deutlich der Einfluss der Besucher ablesbar. Die absolute Luftfeuchte liegt innen über den ganzen Jahreszyklus über den Außenwerten, was auf zusätzliche Feuchtequellen im Innenraum – die Besucher – rückschließen lässt (Bild 33).

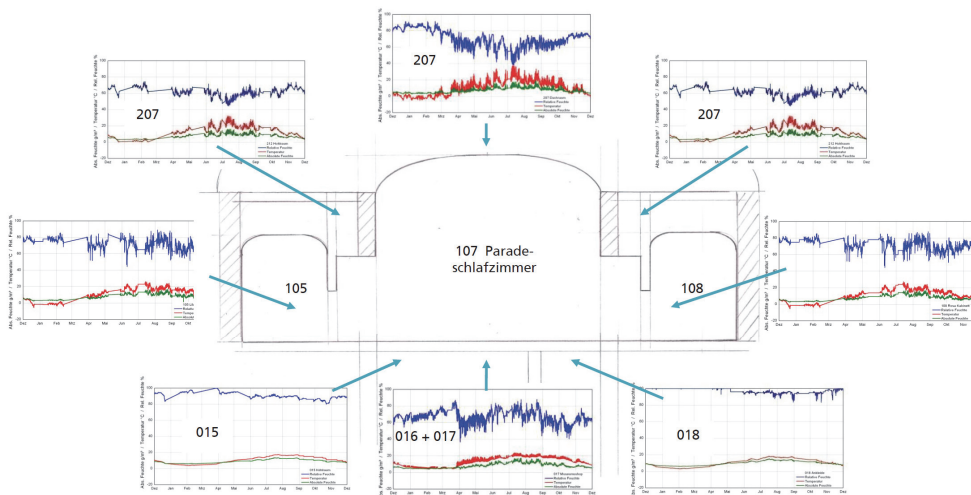


Bild 34: Schnittansicht mit den Klimata der angrenzenden Räume zum Paradeschlafzimmer als Eingabedaten für die Simulation, Messdaten zur relativen und absoluten Luftfeuchte sowie Temperatur. Bereiche mit Messausfällen werden konstant interpoliert und sind vom Ergebnis der Simulation als ungültige Bereiche ausgenommen. Der vertikale Schnitt zeigt die Unterschiede in den Schwankungsbreiten von Temperatur und relativer Luftfeuchte zwischen den Stockwerken, nach [Bichlmair 2011a].

Zusätzliche wurden an den angrenzenden Räumen zum Paradeschlafzimmer die Klimadaten zur relativen Feuchte und Temperatur erfasst und für die Simulation aufbereitet (Bild 34). Insgesamt wurden neben dem Außenklima zehn angrenzende Raumklimata als Randbedingung aufbereitet und in der Simulation verwendet.

### **Bewertung des Raumklimas im Kontext der Präventiven Konservierung**

Temperatur und relative Feuchte sind als Streudiagramm bzw. Punktwolke im Kontext eines Einteilungsschemas dargestellt (Bild 35) und als Wertepaar zu dem jeweiligen Messzeitpunkt aufgetragen. Insgesamt lässt sich das hohe Feuchteniveau hier gut erkennen. In dem Histogramm der Temperaturverteilung ist entsprechend die Anzahl der Stunden mit einem Intervall von 1 Kelvin aufgetragen.

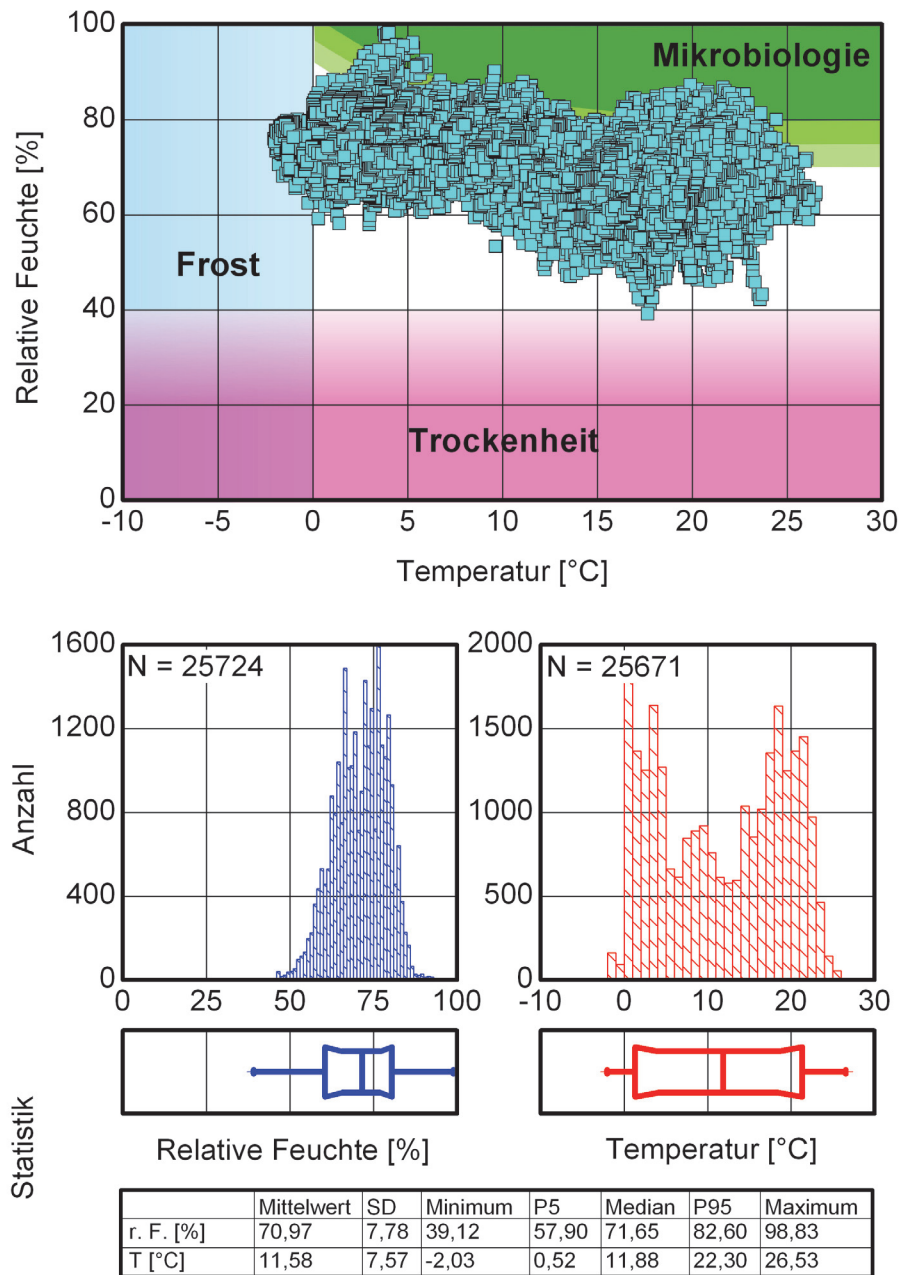


Bild 35: Alle Messwerte im Raum 107 Paradeschlafzimmer als Streudiagramm sowie als Histogramm und Boxplot für relative Feuchte und Temperatur sowie eine Tabelle mit statistischen Werten für den Messzeitraum von über 3 Jahren, vom 1. Februar 2008 bis 1. Juni 2011. Im Histogramm der Temperaturverteilung sind relativ wenige Werte zwischen 6 und 17 °C. Dies deutet auf einen raschen Übergang im Frühjahr und Herbst hin.

Die hier angegebenen statistischen Werte beziehen sich auf den kompletten Messbereich vom 1. Februar 2008 bis 1. Juni 2011. Der gesamte Zeitraum umfasst 29185 stündliche Werte. Wegen Messausfällen können sich Einschränkungen in der Aussagekraft der Diagramme ergeben.



## Besucherkomfort und Schwüle

Wie in Bild 36 zu erkennen ist, werden in dem betrachteten Messjahr die Grenzwerte für als schwül definierte Luft häufig überschritten. Die untere Grenze beginnt nach [Steadman 1979] bei einem Wasserdampfpartialdruck von 1600 Pa. Die entspricht einem absoluten Wassergehalt der Luft von circa  $12 \text{ g/m}^3$ . Aus den Klimadiagrammen lassen sich mit diesem einfachen Kriterium schnell die Zeiträume mit Schwüle identifizieren. Im Diagramm wurden zwei weitere Grenzlinien für als schwül empfundenen Luft angegeben, die nach [Scharlau 1943], die bei 1800 Pa liegt und sowie nach [Fiedler 1995], die erst oberhalb von  $18 \text{ °C}$  beginnt.

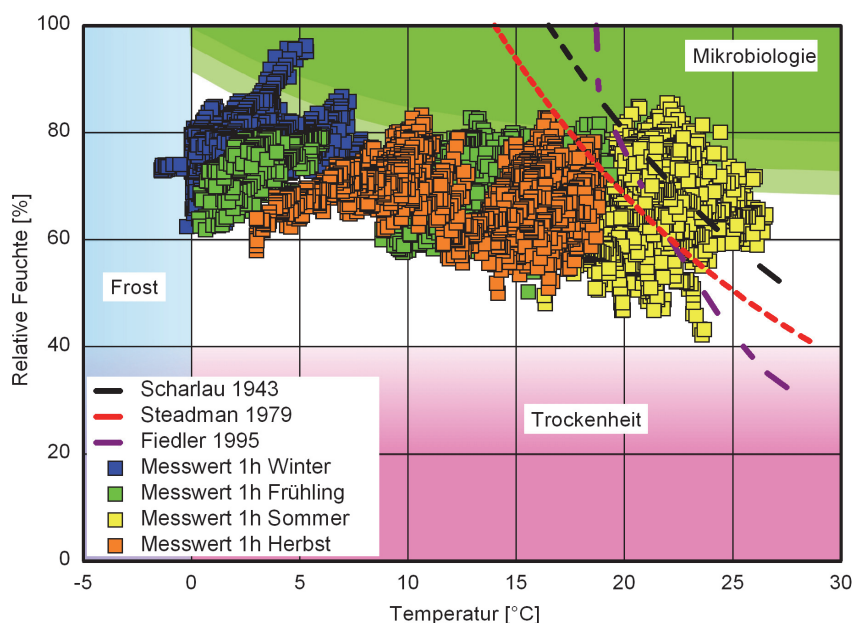


Bild 36: Streudiagramm der Stundenwerte von Temperatur und relative Feuchte nach den Jahreszeiten von 1. Dezember 2009 bis 30. November 2010 sowie unterschiedliche Schwülekriterien nach [Bichlmair 2011b]. Die Wertepaare rechts der Grenzen werden von Menschen als schwül empfunden. Besonders im Sommer wird die Grenze temperaturbedingt oft überschritten. Während der Öffnungszeiten ergeben sich 597 Stunden nach dem Kriterium von [Steadman 1979].

Eine Auswertung des Messzeitraumes von Juni 2009 bis Juni 2010 ergab für diesen Zeitraum mit dem Kriterium nach [Steadman 1979] insgesamt 1295 Stunden, die über der Schwülegrenze von  $12 \text{ g/m}^3$  lagen. Betrachtet man nur die Zeiträume während der Öffnungszeiten, ergeben sich immer noch 597 Stunden. Dies entspricht in etwa 80 Tagen an denen Schwüle vorkommt. Im Sommer werden die meisten Stunden mit schwüler Luft erreicht. In diesen für die Besucher unangenehmen Bedingungen liegt auch der Grund für das verstärkte Lüften des Schlosses, das wiederum die Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte in den Prunkräumen verstärkt.

## Schwankungen der relativen Feuchte

Ein direkter Vergleich der zwei größten Räume im Obergeschoss zeigt einen ähnlichen jahreszeitlichen Verlauf mit etwas geringeren Schwankungsbreiten im Winter und größeren in den Sommermonaten (Bild 37). Im Paradeschlafzimmer sind diese in den Sommermonaten stärker ausgeprägt.

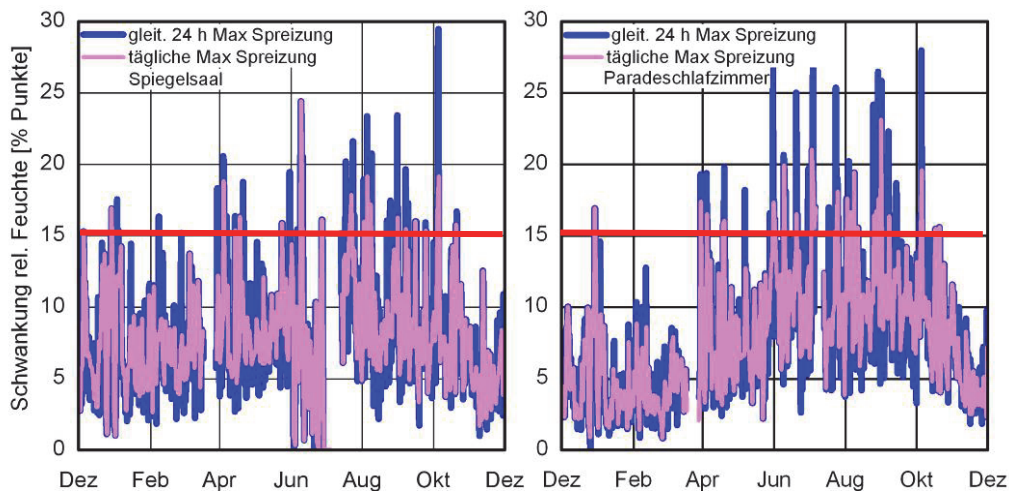


Bild 37: Tägliche (pink) und maximale (blau) Schwankungen in einem Zeitraum von 24 Stunden der gemessenen relativen Feuchte im Spiegelssaal (links) und im Paradeschlafzimmer (rechts). Die kritische Schwankungsbreite von 15 % Punkten r.F. wird vor allem im Sommerhalbjahr häufiger überschritten, im Mittel an jedem dritten Tag, einmal in der Woche sogar 20 % bzw. 25 % r.F. Änderung. Abgebildet ist der Zeitraum vom 1. Dezember 2009 bis 1. Dezember 2010. [Bichlmair et al. 2012]

Hier scheint sich der Besuchereinfluss deutlicher bemerkbar zu machen als im Spiegelssaal. Teilweise fallen einzelne extreme Schwankungen zeitlich zusammen, was auf eine starke Änderung des Außenklimas in diesem Zeitraum zurückzuführen ist, da die Räume im Schloss entgegengesetzt angeordnet sind und durch je vier weitere Räume getrennt sind.

### 6.2.4 Hygrothermische Gebäudesimulation

Um das Raumklima und die Wechselwirkungen mit Besuchern und Außenklima nachzuvollziehen, wurde eine hygrothermische Gebäudesimulation mit der Software WUFI®-Plus durchgeführt. Die Simulation des Paradeschlafzimmers ist dabei als extrem komplex zu betrachten, da nicht nur die unterschiedlichen, gealterten Materialien als Eingabeparameter mit einfließen, sondern auch die nur zum Teil bekannte Baukonstruktion von Wänden und Decken und zahlreiche Klimata, die den Raum mit beeinflussen.

## Gebäudemodell Paradeschlafzimmer

Die Abbildung der Geometrie des Paradeschlafzimmers ist aufgrund von Einschränkungen bei der Software nur bedingt realitätsnah möglich. So sind bei der Eingabe z. B. keine runden Flächen möglich. Diese können zwar fast beliebig durch Polygone angenähert werden, jedoch steigt der Eingabeaufwand dadurch unverhältnismäßig an. In dem hier vorgestellten Modell werden die realen gerundeten Flächen daher vereinfacht als Schrägen abgebildet. Bild 38 zeigt das in den Berechnungen verwendete Modell mit den Flächenunterteilungen. Zu jeder einzelnen Fläche werden in der Software die jeweiligen Aufbauten sowie die angrenzenden Klimata zugeordnet. Die nicht gefüllten Flächen, angrenzend zum Paradeschlafzimmer, stellen die Umrissse des Schlosses und die Kabinette dar.

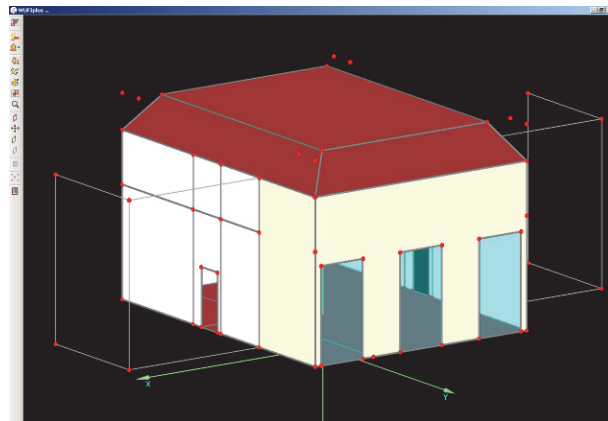


Bild 38: In die Software WUFI®-Plus implementiertes Gebäudemodell des Paradeschlafzimmers. Die hellblauen Flächen stellen die Fenster auf der Nordseite dar. [Bichlmair 2011a]

Das Rechenprinzip der Software beruht auf einer eindimensionalen Bauteilberechnung über die jeweiligen Flächen mit zonaler (raumweiser) Bilanzierung. Inhomogenitäten der Wand bzw. der Bauteildicken wie auch Wärmebrücken werden im Modell nicht mit abgebildet. Bei der Übertragung der Ist-Maße auf das Simulationsmodell besteht prinzipiell die Problematik mit der Zuordnung der Konstruktionsflächen der Wände und Decken zu den Maßen des Modells. Die Konstruktionsflächen und unterschiedliche Bauteildicken wurden, soweit es sinnvoll möglich war, gleichmäßig aufgeteilt. Die tatsächlichen Flächen wurden deshalb möglichst genau erfasst, um eine flächen- und volumentreue Abbildung in dem vereinfachten Simulationsmodell zu erhalten. Ebenso unbekannt sind die tatsächlichen Übergangsbedingungen der Oberflächen und die tatsächlichen Materialeigenschaften, insbesondere der oberflächennahen Schichten. In der Simulationssoftware kann auf die Oberfläche eine hypothetische dampfbremsende Schicht mit einem bestimmten  $s_d$ -Wertes aufgebracht werden. In der ersten Simulation erfolgt die Berechnung mit einem einheitlichen  $s_d$ -Wert

von 0,328 m auf allen Oberflächen bis auf das Material Brokatseide. Für die Kalibrierung des Modells wird der Einfluss der Feuchtepufferung damit getestet, so wird der Wert in Variante 7 für alle Materialien auf 0 m gesetzt, in Variante 8 auf 0,5 m und in der optimierten Simulation auf 0,328 m.

### 6.2.5 Kalibrierung des Modells

Zum Testen des Modells bzw. der Parameter werden die Eingabedaten variiert und deren Auswirkungen auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation in Variantenrechnungen überprüft. Auf diese Weise wird das Modell iterativ kalibriert. Insgesamt wurden 9 Varianten zur ersten Ausgangssimulation durchgeführt und bei [Bichlmair 2011] detailliert beschrieben. Mittels dieser Varianten fand eine kontinuierliche Annäherung der simulierten Werte an die gemessenen Werte statt. Variante 9 wird in [Bichlmair 2011] als „optimierte Simulation“ definiert mit denjenigen Parametern, die das am besten angepasste Ergebnis im Vergleich zu den Messdaten liefert.

Tabelle 14: Übersicht der durchgeführten Varianten der Simulation des Paradeschlafzimmers mit den zugeordneten Profilen und Oberflächenparametern [Bichlmair 2011].

Simulation	Profil Außenluft	Profil Innere Quellen	Profil Interzonale Luft	Material / sd-Wert
Ausgangssimulation	Konstant	Konstant	-	Ausgangswert
Variante 1	Saisonal	Saisonal	-	Ausgangswert
Variante 2	Saisonal	Stündlich	-	Ausgangswert
Variante 3	Stündlich	Saisonal	-	Ausgangswert
Variante 4	Stündlich	Stündlich	-	Ausgangswert
Variante 5	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Ausgangswert
Variante 6	Stündlich	Stündlich	Stündlich	Ausgangswert
Variante 7	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Min Pufferung
Variante 8	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Max Pufferung
Optimierte Simulation	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Optimierter Wert

Die optimierte Simulation zeigt mit der relativen Feuchte in den Teilbereichen 1, 3, 5 und 6 bei Betrachtung des Liniendiagramms Bild 39 eine gute Übereinstimmung zu den Messdaten. Teilbereich 2 ist in der Simulation eher zu trocken, Teilbereich 4 zu feucht. Während in den Wintermonaten die Simulationsergebnisse häufig zu niedrige Werte aufweisen, sind die Werte im Frühsommer häufig zu hoch. Die Gründe für die Abweichungen in den Teilbereichen 2 und 4 konnten nicht geklärt werden.

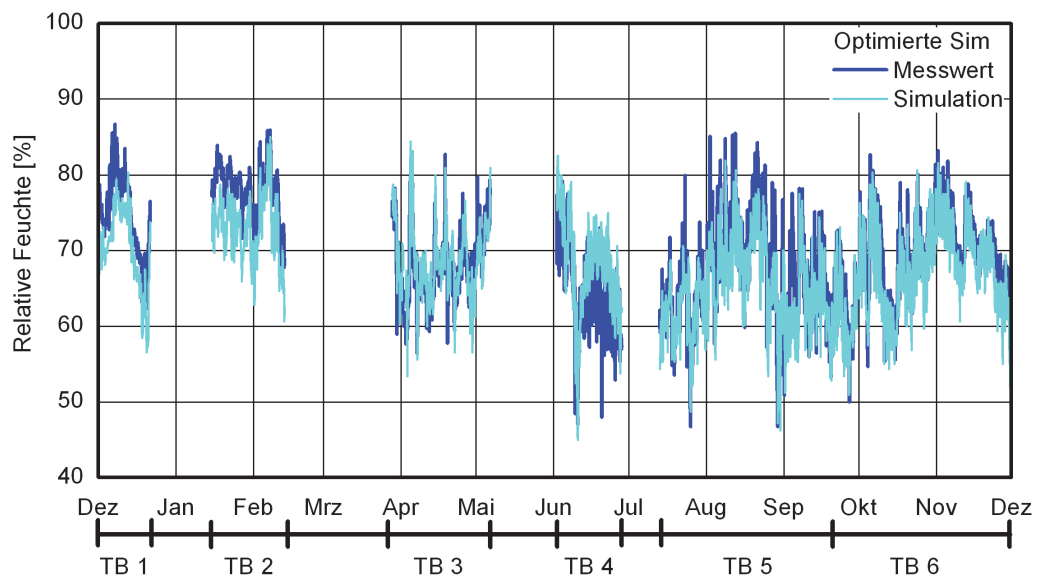


Bild 39: Vergleich der relativen Feuchte im Raum Paradeschlafzimmer der optimierten Simulation mit den verifizierten Messdaten, eingeteilt in Teilbereiche 1 bis 6 (TB) von 12/2009 bis 12/2010. Von August bis September wird die relative Luftfeuchte innen in der Simulation unterschätzt. [Bichlmair 2011b]

### 6.2.6 Statistische Bewertung

Die einzelnen Schritte der Kalibrierung des Modells bis zur optimierten Simulation im Vergleich zu den Messwerten wird an Hand von statistischen Kenngrößen beschrieben.

Zunächst werden die Mess- und Simulationsdaten auf Normalverteilung geprüft und die Korrelationskoeffizienten bestimmt. Dabei zeigt sich eine kontinuierliche Verbesserung des Simulationsmodells durch die Kalibrierung. Allerdings ist die als optimierte Simulation ausgewählte nicht diejenige mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten (vgl. Tabelle 15). Variante 8 der Simulation zeigt die besten Werte für die Korrelation. Betrachtet man jedoch die Datengesamtheit, so wird klar, dass die „optimierte“ Simulation die Werte im Hochfeuchtebereich, der für die Präventive Konservierung von besonderem Interesse ist, vor allem aber die Schwankungen und den Datenumfang besser darstellt (siehe Bild 40 und Tabelle 16).

Tabelle 15: Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Bravis-Pearson sowie Test der Messwerte und Simulationsdaten aus dem Paradeschlafzimmer auf Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov, Normalverteilung der Daten bei einem Signifikanzlevel  $\alpha < 0,05$ . Die „optimierte“ Simulation entspricht nicht derjenigen mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten.

Simulation	Parameter	Test auf Normalverteilung	Korrelationskoeffizienten	
			Pearson $r_{xy}$	Spearman $r_{sp}$
Messdaten	r.F. [%]	0,035	-	-
Messdaten	T [°C]	0,083	-	-
Ausgangssim.	r.F. [%]	0,064	0,746	0,730
Ausgangssim.	T [°C]	0,082	0,995	0,993
Variante 1	r.F. [%]	0,055	0,741	0,726
Variante 2	r.F. [%]	0,051	0,740	0,720
Variante 3	r.F. [%]	0,049	0,739	0,721
Variante 4	r.F. [%]	0,055	0,723	0,705
Variante 5	r.F. [%]	0,048	0,742	0,724
Variante 6	r.F. [%]	0,034	0,780	0,781
Variante 7	r.F. [%]	0,032	0,787	0,789
Variante 8	r.F. [%]	0,053	0,802	0,815
Optimierte Sim.	r.F. [%]	0,032	0,775	0,775
Optimierte Sim.	T [°C]	0,081	0,994	0,991

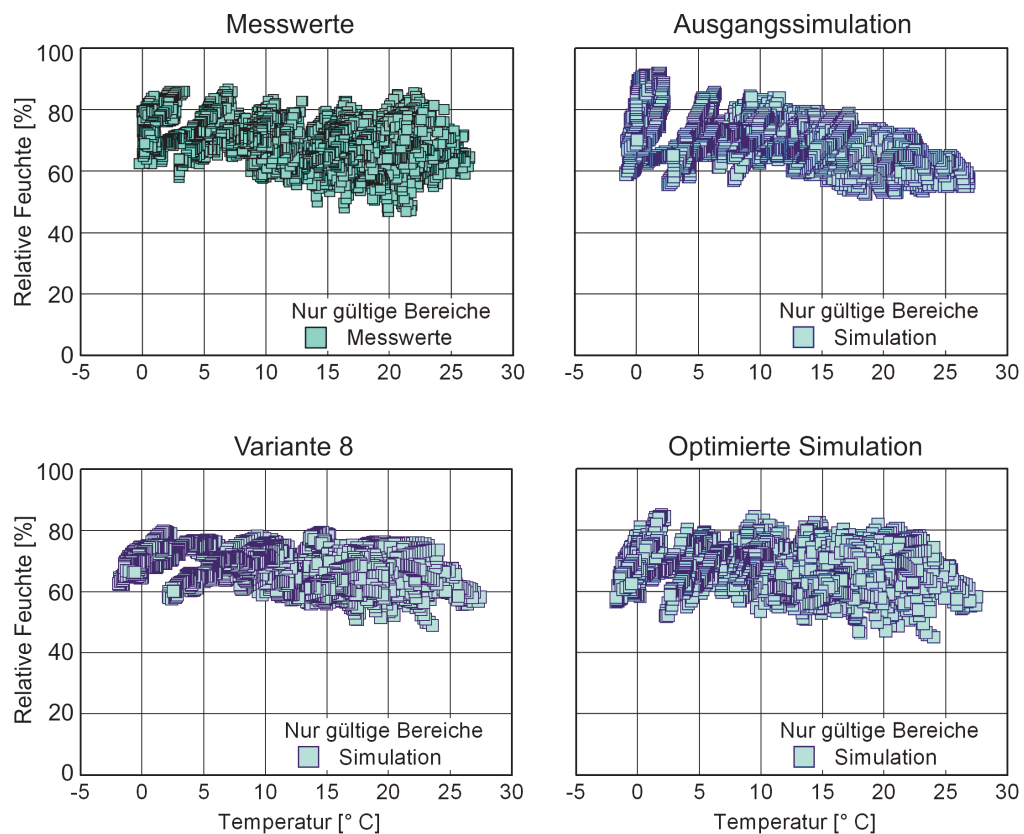


Bild 40: Vergleich der unterschiedlichen Varianten der Simulation mit den gültigen Messwerten für den Zeitraum vom 1. Dezember 2009 bis 1. Dezember 2010, Streudiagramm der Stundenwerte. Variante 8 mit maximaler Feuchtepufferung erreicht den höchsten Korrelationskoeffizienten, stellt aber die Datengesamtheit nicht optimal dar.

Noch deutlicher werden die Gründe für die Festlegung der „optimierten“ Simulation bei Vergleich der Dichtefunktionen (Bild C 3 und Bild C 19) sowie bei der Betrachtung der statistischen Lageparameter (vgl. Tabelle 16). Insbesondere die Spannweite (*Range*) der relativen Luftfeuchte sowie die Maxima und Minima sind im Vergleich zu den anderen Varianten der Simulation gut bzw. sehr gut abgebildet. Allerdings ist der Temperaturbereich schlechter abgebildet als bei der Ausgangssimulation.

Generell zeigen nahezu alle Varianten zur Kalibrierung der Simulation eine hohe Übereinstimmung mit dem gemessenen Raumklima. Alle Simulationen mit Ausnahme der Ausgangssimulation und der oben beschriebenen Variante 8 erfüllen alle in Kapitel 5.2 vorgeschlagenen strengen Bewertungskriterien für die Lageparameter. Über die Hälfte der Bewertungen erreicht die Kategorie „Hervorragend“ für die Übereinstimmung. Dies zeigt die Güte der Eingabeparameter und der getroffenen Annahmen für das Modell. Die Lageparameter sind grafisch in Anhang C, Bild C 1 bis Bild C 20 in der Form von Boxplots dargestellt.

Tabelle 16: Statistische Lageparameter von Temperatur und relativer Luftfeuchte der Messung, der Ausgangs- (A Sim) und der optimierten Simulation (O Sim) des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof sowie der verschiedenen Varianten zur Kalibrierung des Modells, nur gültige Bereiche der Simulation. Bewertung der Übereinstimmung **Hervorragend** / **Akzeptabel** / **Gering** nach den vorgeschlagenen Kriterien für Lageparameter (S. 92).

	Min.	P1	1. Quartil	Median	3. Quartil	P99	Max.	Range
<b>relative Luftfeuchte [% r.F.]</b>								
Messung	46,7	<b>54,8</b>	64,5	<b>69,4</b>	74,5	<b>83,4</b>	86,7	<b>40,0</b>
A Sim	52,5	<b>55,6</b>	63,8	<b>68,4</b>	73,8	<b>89,4</b>	91,9	<b>39,4</b>
O Sim	45,0	<b>53,8</b>	63,4	<b>67,8</b>	71,9	<b>80,0</b>	85,0	<b>40,0</b>
Sim 1	45,9	<b>53,1</b>	63,1	<b>67,5</b>	72,5	<b>85,6</b>	90,6	<b>44,7</b>
Sim 2	45,0	<b>53,1</b>	62,5	<b>66,6</b>	71,3	<b>81,9</b>	85,6	<b>40,6</b>
Sim 3	44,4	<b>53,1</b>	62,5	<b>66,3</b>	71,3	<b>81,9</b>	86,3	<b>41,9</b>
Sim 4	45,6	<b>52,8</b>	63,1	<b>67,5</b>	73,1	<b>85,0</b>	90,0	<b>44,4</b>
Sim 5	44,4	<b>53,1</b>	62,5	<b>66,9</b>	71,3	<b>81,9</b>	86,3	<b>41,9</b>
Sim 6	44,7	<b>54,1</b>	63,4	<b>67,8</b>	71,9	<b>79,7</b>	84,4	<b>39,7</b>
Sim 7	45,0	<b>54,4</b>	63,4	<b>67,8</b>	71,9	<b>79,7</b>	84,4	<b>39,4</b>
Sim 8	49,1	<b>56,4</b>	64,1	<b>68,4</b>	71,9	<b>77,5</b>	79,8	<b>30,8</b>
<b>Temperatur [° C]</b>								
	Min.	P1	1. Quartil	Median	3. Quartil	P99	Max.	Range
Messung	-0,2	<b>0,1</b>	7,8	<b>13,9</b>	18,3	<b>25,1</b>	26,5	<b>26,7</b>
A Sim	-0,9	<b>-0,3</b>	7,5	<b>13,2</b>	17,9	<b>25,1</b>	26,9	<b>27,8</b>
O Sim	-1,7	<b>-1,0</b>	7,3	<b>13,1</b>	18,0	<b>24,9</b>	27,5	<b>29,3</b>
Sim 1	-1,1	<b>-0,6</b>	7,3	<b>13,4</b>	18,3	<b>25,7</b>	28,2	<b>29,3</b>
Sim 2	-0,9	<b>-0,5</b>	7,4	<b>13,6</b>	18,8	<b>25,8</b>	28,3	<b>29,3</b>
Sim 3	-0,9	<b>-0,5</b>	7,4	<b>13,6</b>	18,8	<b>25,8</b>	28,3	<b>29,2</b>
Sim 4	-0,9	<b>-0,5</b>	7,2	<b>13,4</b>	18,3	<b>25,6</b>	28,2	<b>29,1</b>
Sim 5	-0,9	<b>-0,5</b>	7,4	<b>13,6</b>	18,8	<b>25,8</b>	28,3	<b>29,2</b>
Sim 6	-1,7	<b>-1,0</b>	7,3	<b>13,1</b>	18,0	<b>24,9</b>	27,5	<b>29,3</b>
Sim 7	-1,7	<b>-1,0</b>	7,4	<b>13,1</b>	17,9	<b>24,8</b>	27,4	<b>29,1</b>
Sim 8	-1,9	<b>-1,1</b>	7,3	<b>13,1</b>	17,9	<b>24,9</b>	27,5	<b>29,3</b>

### 6.2.7 Test auf Schadensfunktionen

Wie für das Schachenhaus werden für das Paradeschlafzimmer von Schloss Linderhof die Häufigkeiten der Änderungen der relativen Luftfeuchte betrachtet. In Bild 41 wird die stündlich gleitende 24 h Schwankungsbreite der relativen Feuchte verglichen. Es zeigt sich bei Vergleich der beiden Liniendiagramme eine gute Übereinstimmung der Simulationswerte mit den Schwankungsbreiten der Messwerte. Die höchsten Schwankungsbreiten werden in der Simulation weitgehend erreicht.



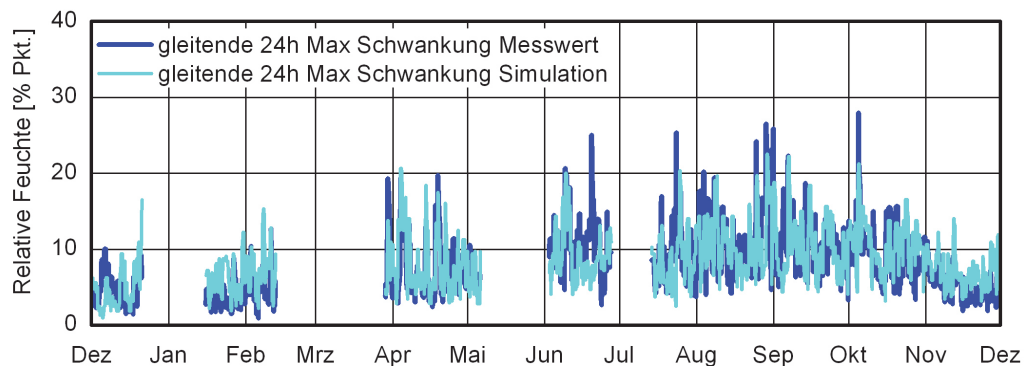


Bild 41: Vergleich der maximalen Schwankung der relativen Feuchte innerhalb 24 Stunden mit stündlich gleitendem Intervall im Paradeschlafzimmer der optimierten Simulation mit den verifizierten Messdaten [Bichlmair 2011b].

Tabelle 17: Anzahl N der Änderungen der relativen Luftfeuchte innerhalb 24 Stunden im Paradeschlafzimmer für die optimale Simulation im Vergleich zwischen festem und gleitendem Intervall sowie Quote  $Q_v$  der Vorhersage der Simulationen bezogen auf die Messdaten. Bewertung von  $Q_v$  in die Kategorien **Hervorragend** / **Akzeptabel** / **Gering**. Die Wiedergabe Änderungen  $> 15\%$  r.F. innerhalb des festen 24 Stunden Intervalls verfehlt die Bewertung „Akzeptabel“ nur knapp. Die Anzahl der Ereignisse zur Berechnung der Vorhersagequote  $Q_v$  für Ereignisse  $> 15\%$  r.F. liegt unter der geforderten Stichprobengröße von 20 und ist daher nur mit Einschränkungen zur Bewertung heranzuziehen (grau hinterlegt).

Änderung $\Delta$ r.F. / 24 h	N (Messung)	N (Opt. Sim)	N (Messung)	N (Opt. Sim)
	fest	fest	gleitend	gleitend
$\leq 5\%$ r.F.	68	44	1451	886
$Q_v$		0,65		0,61
$> 5\%$ r.F.	183	207	4569	5134
$Q_v$		1,13		1,12
$> 10\%$ r.F.	80	79	2011	2000
$Q_v$		0,99		0,99
$> 15\%$ r.F.	23	17	531	398
$Q_v$		0,74		0,75
$> 20\%$ r.F.	4	5	138	106
$Q_v$		1,25		0,77

Bei der Auswertung fällt auf, dass die Vorhersagequoten für beide Verfahren extrem nah beieinander liegen, ausgenommen den Bereich der Schwankungen oberhalb 20 % r.F./d, die deutlich seltener und damit schwerer vorherzusagen sind. Der klare Vorteil der gleitenden Schwankungsbreite liegt in der Erfassung extremer Ereignisse, die über einen Kalendertag hinausgehen (vgl. Tabelle C 2).

### **Fazit**

Die optimierte Simulation erfüllt bei 4 von 5 bewerteten Lageparametern das Kriterium „hervorragend“. Auch die Schwankungen der relativen Feuchte, die für eine Risikoabschätzung ausschlaggebend sind, werden über den kompletten Simulationszeitraum hinreichend gut abgebildet, sowohl mit der gleitenden 24 Stunden Mittel als auch bei der Betrachtung des festen Tagesintervalls. Die Simulation kann damit über weite Bereiche als gut an die Messwerte angepasst angesehen werden.

## **6.2.8 Variantenrechnung mit dem Simulationsmodell**

Bei den Raumklimauntersuchungen in Schloss Schönbrunn bei Wien stellt [Kippes 1999] fest, dass dort der Außenluftwechsel einen wesentlich größeren Einfluss auf das Innenklima ausübt als die Emissionen der Besucher. Als Maßnahme zur Entkopplung des Außenklimas wurde für Schloss Schönbrunn ein Lüftungskonzept vorgeschlagen, das die Abdichtung der Fenster beinhaltet, um zu hohe Luftwechsel durch die ursprüngliche Querlüftung zu vermeiden, in Kombination mit der Zuführung vorkonditionierter Luft. Die Wirkung einer Abdichtung soll am Beispiel von Schloss Linderhof überprüft werden und stellt auch hier die Grundlage für ein späteres Konzept mit geregelter Belüftung dar.

### **Simulation einer Änderung der Belüftung**

Es erfolgt eine neue Berechnung des Raumklimas im Paradeschlafzimmer mit geänderter Dichtigkeit des Gebäudes als Annahme für ständig geschlossene Fenster. Durch den dadurch stark verringerten Außenluftwechsel soll eine maximale Entkopplung zum Außenklima erreicht werden. Die Luftwechselrate wird ganzjährig mit dem Wert der Wintermessung von  $0,13 \text{ h}^{-1}$  angenommen. Eine Unterscheidung in Tag und Nacht erfolgt nicht. Die Variante mit verringertem und konstantem Luftwechsel einerseits mit den Messwerten, andererseits mit Simulation 4 mit realitätsnahen Luftwechselprofil (gemäß Tabelle 13) verglichen. Damit wird sichergestellt, dass in der Simulation der reine Einfluss der Besucher sichtbar gemacht wird, ohne die Unwägbarkeiten der Messung, die durch die täglich unterschiedliche Nutzung des Schlosses entstehen.

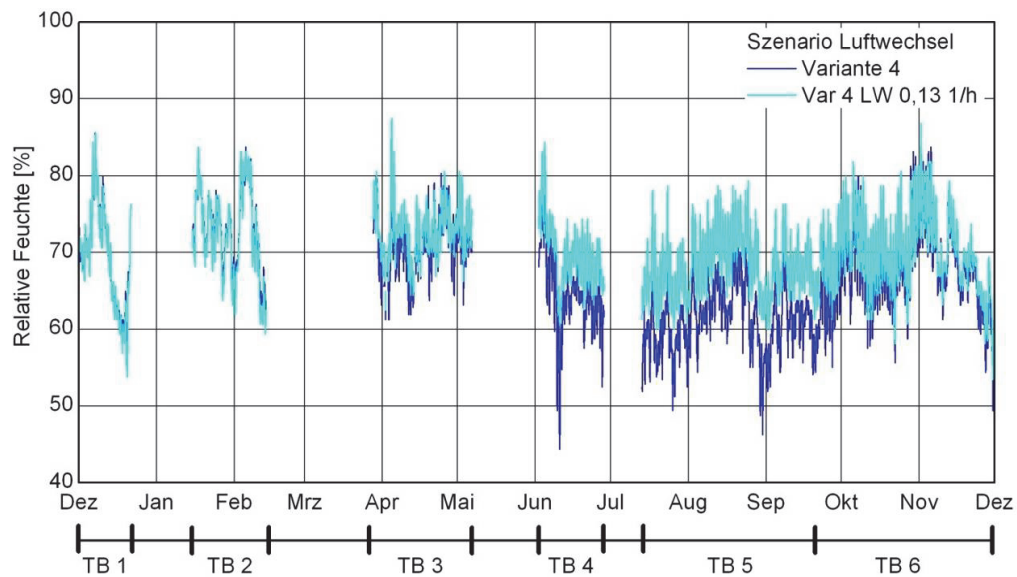


Bild 42: Relative Luftfeuchte im Paradeschlafzimmer, Simulation mit realem Luftwechsel und eines Szenarios geschlossener Fenster mit verringertem konstanten Luftwechsel von  $n=0,13 \text{ h}^{-1}$  für den Zeitraum Dezember 2009 bis Dezember 2010. Die relative Luftfeuchte nimmt bei verringerter Luftwechselrate über die Sommermonate durch die von den Besuchern eingetragene Feuchtebelastung erheblich zu. [Bichlmair 2011b]

Gegenüber der Variante 4 mit einem realistischen Luftwechselprofil steigt die relative Luftfeuchte im Schloss durch die Reduzierung der Luftwechselrate auf den konstanten Wert  $0,13$  deutlich an (vgl. Bild 42). Ab dem Frühsommer bleibt durch den Einfluss der Besucher das höhere Niveau der relativen Luftfeuchte bis zum Herbst bestehen. Dadurch wird die saisonale Schwankung mit den sonst etwas trockeneren Sommermonaten verringert. Der absolute Wassergehalt der Luft steigt jedoch in den Sommermonaten im erheblichen Maße zusammen mit der Anhebung der relativen Feuchte an, (siehe Bild 43, rechts).

Die Bedingungen für Besucher werden durch das hohe Schwüle-Potenzial, beginnend ab  $12 \text{ g/m}^3$  nach [Steadman 1979], der nun sehr feuchten Luft nochmals deutlich verschlechtert. Der Gehalt des Kohlendioxids steigt sehr stark an, wie in Bild 43, linker Graph, zu erkennen ist. Die Werte der Kohlendioxidkonzentration steigen auf über  $4000 \text{ ppm}$ . Die Luftqualität sinkt damit deutlich ab. Gemäß DIN EN 13799, 2007 wird die Luftqualität bereits ab  $1400 \text{ ppm}$  als schlecht eingestuft.

Die Simulation des dichten Gebäudes zeigt den erheblichen Einfluss der Besucher auf das Raumklima in Linderhof, wenn die Reduzierung von Feuchte und  $\text{CO}_2$  durch den Außenluftwechsel verringert würde.

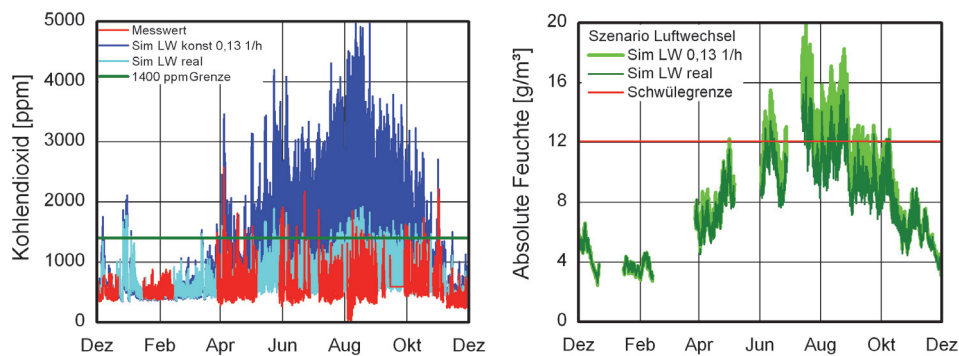


Bild 43: Kohlendioxidkonzentration und absoluter Feuchtegehalt der Luft im Paradeschlafzimmer, Messwerte bei realistischem Luftwechsel und Simulation eines Szenarios geschlossener Fenster mit verringertem konstanten Luftwechsel von  $n=0,13 \text{ h}^{-1}$  für den Zeitraum Dezember 2009 bis Dezember 2010. Die Simulation zeigt, dass eine Abdichtung des Gebäudes ohne zusätzliche, gesteuerte Lüftung zu einem starken Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration über die Grenze von 1400 ppm (grüne Linie links) und zu höherer absoluter Feuchte und Schwüle nach [Steadman 1979] (rote Linie rechts) im Innenraum führen würde. [Bichlmair 2011b]

## 6.2.9 Maßnahmeempfehlungen und Zusammenfassung

Zur Verbesserung des Raumklimas für die Erhaltung der Ausstattung wird ein mehrstufiges Lüftungskonzept vorgeschlagen, das neue Ansätze zur präventiven Konservierung aufgreift. Von einer Klimatisierung, mit ganzjährigem konstanten Klima oder in engen gleitenden Grenzen, wird abgeraten. Vielmehr geht es um eine Reduzierung der Extremereignisse mit dem Einsatz möglichst geringer Mittel und Eingriffe in die historische Bausubstanz. Dies bedeutet bereits eine erhebliche Verbesserung der Bedingung für die langfristige Erhaltung.

Empfohlen wird die Reduzierung der Schwankungen der relativen Feuchte im gleitenden von der Jahreszeit abhängigen Temperaturniveau. Das Niveau der relativen Feuchte sollte dabei weitestgehend dem mittleren historischen Klima entsprechen, allerdings ohne die extrem hohen Feuchtebereiche und ohne die derzeitigen, hohen Kurzeitschwankungen. Dazu ist eine Be- und Entlüftung des Obergeschosses mit einer mechanischen Lüftungsanlage, die in mehreren Stufen etabliert werden kann, erforderlich. Die mechanische Lüftung soll die freie Fensterlüftung überwiegend ablösen. Eine Be- und Entlüftung der Räume, nahe am derzeitigen hauptsächlich durch freie Fensterlüftung erzeugten Klima, erfordert dabei einen wesentlich geringeren Energieeinsatz als eine „Vollklimatisierung“. Das generelle Klima im Schloss wird im Wesentlichen nicht verändert.

Dadurch führt ein Ausfall der technischen Anlage oder zusätzliche Lüftung über die Fenster, z. B. bei nicht ausreichender Luftversorgung, zu keinen größeren Klimaschwankungen oder Klimaänderungen als derzeit vorhanden.

Die Auswertung der erhobenen Klimadaten und die Simulation des Parade-schlafzimmers zeigen, dass im Wesentlichen zwei Faktoren für das Raumklima in Schloss Linderhof maßgeblich sind:

1. Die Wirkung des Außenklimas auf die Innenräume über den Luftwechsel
2. Die Feuchteproduktion durch die Besucher, die im Sommer zu verstärktem Lüften und damit verstärktem Einfluss des Außenklimas führt

Das Raumklima steht eng mit dem Außenklima in Zusammenhang. Die Besucher haben einen erheblichen Einfluss auf die Feuchte und Temperatur im Schloss, sowohl direkt durch die Abgabe von Wärme und Feuchte, als auch indirekt, da ohne jegliche Klimatechnik derzeit die einzige Möglichkeit zur Verbesserung des Raumklimas in intensivem natürlichem Lüften besteht. Dieses Lüften führt zu den beschriebenen verstärkten Schwankungen.

Daraus ergeben sich zwei vorrangige auf das Klima bezogene Schadensprozesse, die in der Simulation richtig abgebildet sein müssen:

1. Hohe relative Feuchte in Kombination mit hohen Temperaturen, die zum einen den Komfort der Besucher stark einschränken (Schwüle), die aber auch zum anderen eine erhöhte Gefährdung der Kunstwerke durch Quellvorgänge der Materialien wie auch durch Mikroorganismen bedeutet.
2. Starke und vor allem häufige Kurz- und mittelfristige Schwankungen der relativen Luftfeuchte, die ein dauerndes Quellen und Schwinden der Kunstmaterialien verursachen, das über die Zeit zur Ablösung von Vergoldungen und Malschichten führt und damit zu einem langsamen aber kontinuierlichen Verfall beiträgt.

Die Bewertung zeigt die Güte der Simulation sowohl in Hinblick auf die Abbildung der Realität an Hand der statistischen Lageparameter als auch die gute Wiedergabe des relevanten Schadenprozesses infolge der kurz und mittelfristigen Schwankungen des Raumklimas.

Zur Verbesserung des Raumklimas wird ein mehrstufiges Lüftungskonzept vorgeschlagen, das neue Ansätze zur Präventiven Konservierung aufgreift. Von einer Klimatisierung, mit ganzjährig konstantem Klima oder in engen gleitenden Grenzen, wird abgeraten. Vielmehr geht es um eine Reduzierung der Ext-

remereignisse mit dem Einsatz möglichst geringer Mittel und Eingriffe in die historische Bausubstanz. Dies bedeutet bereits eine erhebliche Verbesserung der Bedingung für die langfristige Erhaltung. Erst dadurch ergibt sich ein hohes Maß an Planungssicherheit und Kulturgüterschutz für weitere mögliche Schritte entsprechend dem hohen denkmalpflegerischen Anspruch der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen.

### 6.3 Torhalle Lorsch

Die Torhalle in Lorsch (Bild 44) aus dem 9. Jahrhundert n. Chr. ist eines der herausragendsten Beispiele für karolingische Architektur in Deutschland. Auch aus der Sicht der Bauphysik ist das Gebäude interessant, da es sich um einen einzelnen, sakralen Raum oberhalb eines Tordurchgangs handelt, der damit mit Ausnahme von zwei Aufgängen an den Seiten komplett vom Außenklima umgeben ist. Aufsteigende Feuchte ist damit als zusätzliche Feuchtequelle auszuschließen. Ziel der Simulation ist die Entwicklung eines neuen Klimakonzeptes für die Torhalle [Kilian 2012], die derzeit unklimatisiert ist.



Bild 44: Die Torhalle Lorsch aus dem 9. Jahrhundert n. Chr., UNESCO Weltkulturerbe, besteht aus einem einzelnen, sakralen Raum oberhalb eines Tordurchgangs mit zwei turmartigen Aufgängen.

### 6.3.1 Baugeschichte

Zur Baugeschichte der „Torhalle“ oder auch „Königshalle“ ist wenig konkretes bekannt, es gibt zahlreiche Thesen zu Datierung und Erbauer. Neuere Forschungen datieren eher in die 2. Hälfte des 9. Jahrhunderts. *„Mit der Funktionsbestimmung der „Königshalle“ sind sogar noch größere Unsicherheiten verbunden. Als von der Architektur römischer Triumphbögen inspiriertes Denkmal des durch Karl den Großen wiederbelebten lateinischen Kaisertums, als Stätte des Gerichts, als Ort herrscherlicher Aufenthalte ist das Gebäude ebenso diskutiert worden wie zuletzt als Bibliothek und schließlich gar als ins Architektonische übertragener Schrein für die öffentliche Ausstellung der im Kloster gehüteten Reliquien. Am meisten Plausibilität dürfte aber derzeit die von Achim Hubel erörterte Möglichkeit für sich beanspruchen, dass die Lorscher „Königshalle“ dem Beispiel einer vergleichbaren Baulichkeit in St. Emmeram (Regensburg) aus dem Umfeld Ludwigs des Deutschen für das nicht zuletzt ja auch liturgisch begangene Ereignis und Zeremoniell des Herrscherempfangs nachgebildet und ausgestattet worden sein dürfte.“* [Schefers 2011]. Ende des 17. Jahrhunderts wurde die „Königshalle“ unter Kurfürst Franz Lothar v. Schönborn, dem Mainzer Erzbischof, einer neuen Nutzung als Kapelle zu seiner kleinen Jagdresidenz zugeführt. Der Fußboden des Obergeschoßes wurde dazu ausgebrochen, die Arkadenbögen wurden vermauert und geschlossen. *„Erst die Rückbaumaßnahmen Friedrich Behns (1935 abgeschlossen) gaben dem Gebäude seine auch heute wieder zu erlebende, spätmittelalterliche Form zurück, mit dem Glockentürmchen als Reminiszenz an die neuzeitliche Kapellennutzung.“* [Schefers 2011]

### Geschichte der Untersuchungen und Intermezzo Klimatisierung

In den 1980er und 90er Jahren arbeiteten hier im Rahmen des BMFT Sonderforschungsbereichs „Steinzerfall“ zahlreiche Forscher an kunsthistorischen, aber vor allem auch an kunsttechnologischen und konservatorischen Fragen. Die Torhalle Lorsch ist daher eines der am besten untersuchten und dokumentierten historischen Gebäude in Deutschland. Die Wand und Deckenaufbauten, alle Gesteine und Mörtel sind umfassend erfasst, analysiert und dokumentiert, u. a. bei [Böttger 1997] und [Hessisches Landesmuseum 1993].

Vor allem die noch zum Teil bauzeitlichen historischen Putze und Wandmale-reifragmente machen den Wert der Innenoberflächen aus. In den Untersuchungen der 1980er und 90er Jahre wurde eine erhebliche Salzbelastung im Putz und Mauerwerk der Torhalle Lorsch festgestellt. Es handelt sich dabei um Ammoniumnitrat, eingebracht vor allem durch Taubenkot. Im Verlauf eines

Jahres ändern sich die Feuchte- und Temperaturzustände immer wieder so ungünstig, dass es zu wiederholtem in Lösung gehen und Auskristallisieren von Salzen in der Wand kommt. Dies führt, wie auch in den früheren Forschungsberichten beschrieben, zu fortschreitenden Schäden wie Abplatzungen und Absandungen des Putzes und der Malschicht.

Ziel der früheren Untersuchungen war neben der Entwicklung von Methoden zur Restaurierung der Wandmalerei und Steinoberflächen die Ausarbeitung eines nachhaltigen Konzeptes für die Präventive Konservierung in Form einer Klimaregelung für die Torhalle. Das Fraunhofer IBP führte dazu in den Jahren 1984 bis 1985 Klimamessungen durch. Das Ergebnis war, dass das Raumklima generell in einem Bereich hoher Feuchte lag [Kießl 1986]. Um einem Abbau der Malereien entgegen zu wirken wurde damals empfohlen, eine geregelte Lüftung einzubauen, um die Feuchte im Raum zu reduzieren. Dabei wird die absolute Feuchte innen und außen verglichen und bei günstigen Bedingungen trockene Luft in den Innenraum durch einen Ventilator eingebracht. Begleitende Messungen von 1991 bis 1992 zeigten ein positives Ergebnis in dieser Hinsicht. Diese Auswertungen wurden 1995 in [Kießl 1995] publiziert und das erfolgreiche Konzept beschrieben. Womit die Forscher allerdings nicht gerechnet hatten, war ein Restaurator der Hessischen Schlösserverwaltung, der schon 1993 den Stecker gezogen hatte, weil er der Anlage nicht vertraute.

Dieses Beispiel ist typisch dafür, dass die Entwicklung von Konzepten allein nicht ausreichend ist. Erfolgskontrolle, die Einbindung aller Zuständigen vor Ort und regelmäßige Wartung einer solchen Anlage sind der einzige Garant dafür, dass entwickelte Lösungen auch dauerhaft und nachhaltig sein können. Dazu gehört unbedingt die regelmäßige Kalibrierung solcher Anlagen, da Sensoren über die Jahre an Genauigkeit einbüßen und „driften“ [Brown 1994]. So kann eine zu Beginn gut funktionierende Klimaregelung im Zweifelsfall über die Zeit mehr Schaden anrichten, als dass sie nutzt.

### **Problemstellung**

Das Raumklima wird seit 2008 erneut von der Hessischen Schlösserverwaltung gemessen. Mittels hygrothermischer Gebäudesimulation sollen die Möglichkeiten und Grenzen einer neuen geregelten Lüftung ausgelotet und verschiedene alternative Konzepte mit untersucht werden. Ziel ist es, Schwankungen des Klimas zu reduzieren und die Salze in der Wand unterhalb bzw. oberhalb der Grenzfeuchte Kristallisation bzw. Hydratation zu halten, um Schäden durch wiederkehrende Wechsel zu vermeiden.



### 6.3.2 Grundlagenermittlung

Der Bau ist zweigeschossig, im unteren Teil ist eine Durchgang zum Hof der Klosterkirche mit drei großen Portalen mit Rundbögen. Darüber befindet sich die eigentliche „Torhalle“, ein Raum mit acht kleinen Rundbogenfenstern, der zu beiden Seiten der Durchfahrt über Treppentürme erreichbar ist. Die Türme sind oben und unten durch undichte Holztüren geschlossen. Unter dem steilen Dach schließt der Raum nach oben in einem Tonnengewölbe ab, die Dachbalken sind sichtbar. Die Innenwände sind zum Teil mit bauzeitlichen Verputzen mit Wandmalereien gestaltet. Die Fassade ist in einer bunten *opus reticulatum* Technik nach römisch antikem Vorbild mit farbigen Natursteinen gestaltet.

Durch die Vielzahl von Untersuchungen in den 1980'ern und 90er Jahren, u.a. durch das Fraunhofer IBP, konnte auf viele im Labor bestimmte Materialkennwerte als Eingabedaten für die hygrothermische Gebäudesimulation zurückgegriffen werden. Diese Kenndaten fanden im Simulationsmodell bei der Konstruktion der Wand- und Bodenaufbauten der Torhalle Verwendung.

### 6.3.3 Klima

#### Außenklima

In Bild 45 sind die Temperatur und relative Feuchte des Außenklimas in Lorsch als graue Linien dargestellt. Im Jahr 2008 zeigt sich ein gemäßigtes Klima. Die Außentemperaturen sinken im Winter selten unter 0 °C und nie unter -10 °C.

Die relative Feuchte des Außenklimas schwankt stark, im Sommer kommen zum Teil tägliche Schwankungen im Rahmen von < 40 % r.F. bis 100 % r.F. vor. Im Winter liegt das Niveau insgesamt etwas höher bei ca. 60 - 80 % r.F. bis zu 100 % r.F.

#### Raumklima

Das Raumklima wurde von 2008 bis 2011 immer wieder für kleinere Zeiträume gemessen. Durch die freie Belüftung der Torhalle verläuft das Raumklima gedämpft mit dem Außenklima. Auf Bild 45 (links) ist zu erkennen, dass die Raumtemperatur der Außentemperatur folgt und in deren oberen Bereich verläuft. Die relative Feuchte (rechts) liegt meist unterhalb der Außenluftfeuchte.

Insgesamt liegt die relative Feuchte in der Torhalle im Sommer zwischen 40-80 % r.F., zeitweise aber auch deutlich unter 40 % r.F. Im Winter kann es feuchter werden mit Bereichen von 80 % bis 100 % r.F.

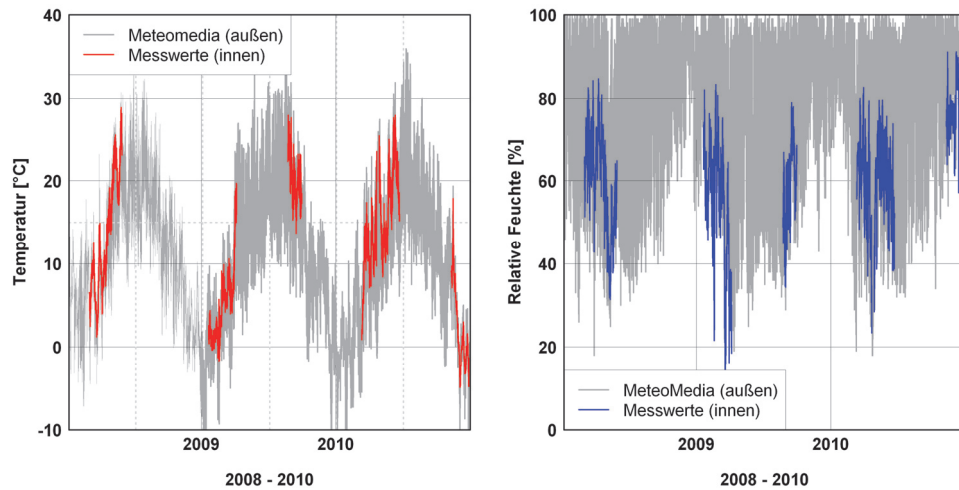


Bild 45 Gemessenes Klima in Torhalle Lorsch und außen von der Wetterstation in Bensheim.

### 6.3.4 Hygrothermische Gebäudesimulation

Die Torhalle Lorsch wurde mit der Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus als hygrothermisches Raummodell nachgestellt.

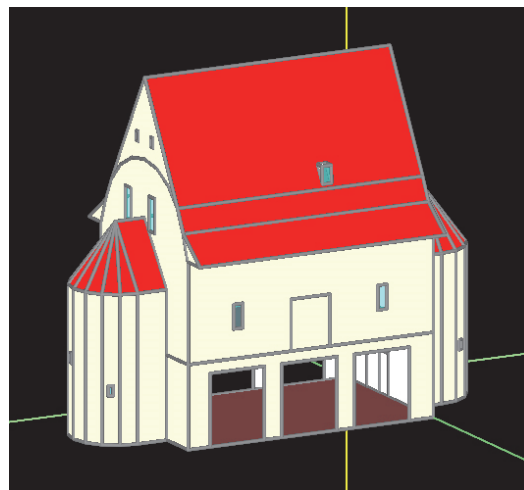


Bild 46: Grafische Darstellung des rechnerischen Modells der Torhalle Lorsch in der Simulationssoftware WUFI® Plus.

## Randbedingungen / Eingaben

Ausgehend von Besucherstatistiken der letzten 10 Jahre der Verwaltung der staatlichen Schlösser und Gärten Hessen, wurde für das Jahr 2008 ein generisches Besucherprofil erstellt. Für jeden Tag und für jede Stunde zwischen 10 und 16 Uhr wurden Faktoren ermittelt, welcher Anteil der gesamten Jahresbesucherzahl zu dieser Stunde in der Torhalle anwesend ist. Montags ist die Torhalle Lorsch für Besucher geschlossen. Die Besucher geben je nach Jahreszeit unterschiedliche Mengen von Wärme und Feuchte in den Raum ab [Wagener 2012]. Kubatur und Materialien wurden entsprechend den vorliegenden Planunterlagen und Analysen früherer Forschungsprojekte in das Modell eingegeben (Bild 46).

## Wetterdaten

Vor Ort wurde das Außenklima lediglich durch einen einfachen Datenlogger aufgezeichnet, der nicht ausreichende Informationen liefert, um mit diesen Daten das Raumklima zu simulieren. Daher werden für die Simulation Wetterdaten der Wetterstation der Firma Meteomedia aus dem 5 km entfernten Bensheim verwendet. Um die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen, wurden die Datensätze zu Temperatur und relativer Feuchte miteinander verglichen. Die beiden Datensätze liegen für den an der Torhalle Lorsch gemessenen Zeitraum im Winter 2007/2008 gut zusammen.

## Lüftungsprofil

In den früheren Forschungsvorhaben wurde der Luftwechsel  $n$  mit der Blower-Door-Methode die Luftdichtigkeit gemessen und auf den Infiltrationsluftwechsel bei normalen Druckbedingungen umgerechnet (Tabelle 18).

Tabelle 18: Luftwechselraten der Torhalle Lorsch bei unterschiedlichen Randbedingungen nach [Kiebl 1986].

Randbedingungen	Luftwechsel $n$ [ $h^{-1}$ ]
geschlossene Türen	0,40
Türen abgedichtet	0,14
Türen und Fenster abgedichtet	0,06

Nach einem Interview mit einer Mitarbeiterin der Hessischen Schlösserverwaltung wurde deutlich, dass derzeit weder eine geregelte Lüftung noch ein Lüftungskonzept vorliegen. Die Fenster und Türen werden von allen Mitarbeitern während der aktuellen Messperiode und auch heute nach persönlichem Gutdünken geöffnet und wieder geschlossen. Ein detailliertes Lüftungsprofil konnte für die Simulation daher nicht erstellt werden, es wurde jedoch zwischen Sommer- und Winterfall unterschieden.

### **Kalibrierung des Modells**

Im Laufe des Kalibrierungsprozesses wird die Simulation immer wieder überprüft und einzelne Parameter geändert. Da die früheren Messungen nur Momentaufnahmen wiedergeben, ist es möglich und notwendig, eine gewisse „Dynamik“ in Einstellungsmöglichkeiten, wie den Luftwechsel oder die Besucher- chermenge, zu bringen. Dies bedeutet, wie oben beschrieben, keinen starren, sondern einen saisonal angepassten Luftwechsel zu implementieren. Dieser lässt sich ohne durchgängige Messung eines kompletten Jahres aber nicht realitätsnah bestimmen, sodass iterativ per Hand das bestmögliche Ergebnis (in der sinnvollen Umgebung der Messergebnisse) bestimmt werden muss. Ähnlich verhält es sich mit den Besucherzahlen. Auch hier gibt es nur gemittelte statistische Auswertungen, sodass überschlägig für sechs Führungen am Tag, sechs Tage die Woche, Faktoren bestimmt wurden, welchen Anteil diese Führung an der Jahresbesucherzahl hat. Auch die internen Wärme- und Feuchtelasten, die die Besucher erzeugen, wurden iterativ abgeschätzt.

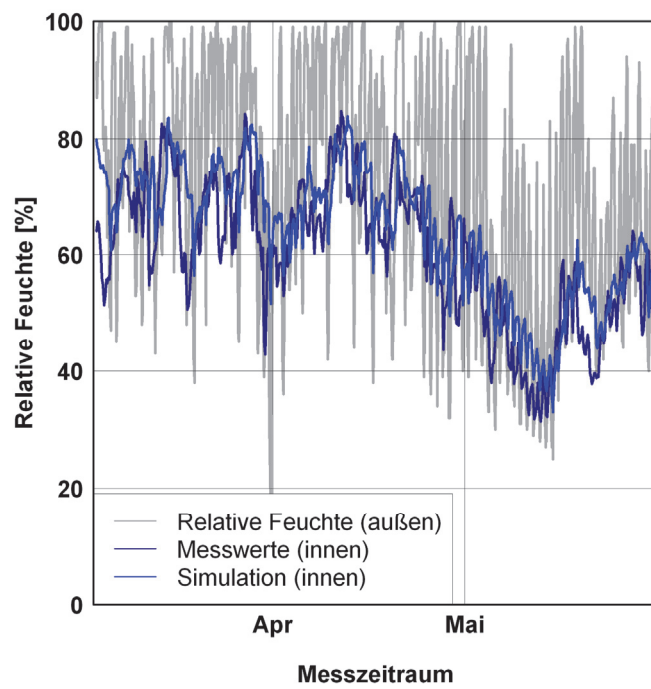


Bild 47: Relative Feuchte außen und in der Torhalle Lorsch für den Zeitraum der Modellkalibrierung von Anfang März bis Ende Mai 2008.

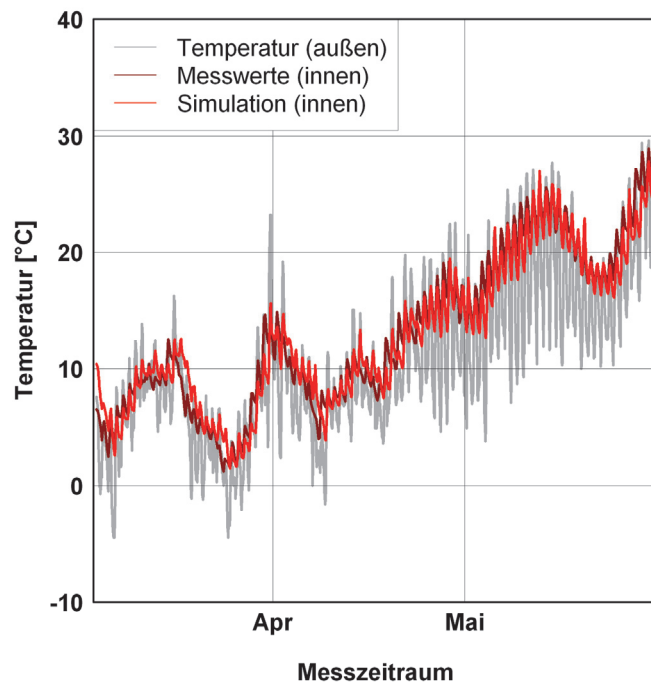


Bild 48: Temperatur außen und in der Torhalle Lorsch für den Zeitraum der Modellkalibrierung von Anfang März bis Ende Mai 2008.

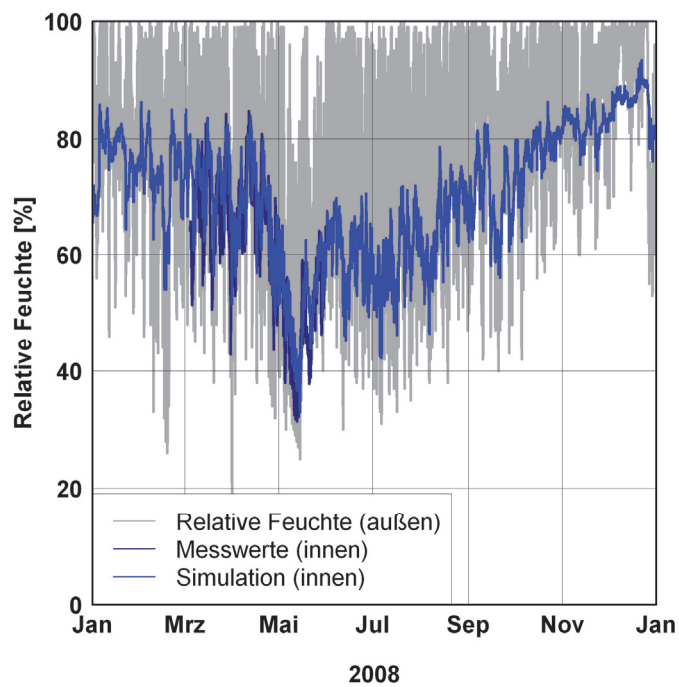


Bild 49: Relative Feuchte außen und in der Torhalle Lorsch für das Jahr 2008, Messung und Simulation. Messdaten innen liegen nur von Anfang März bis Ende Mai 2008 vor.

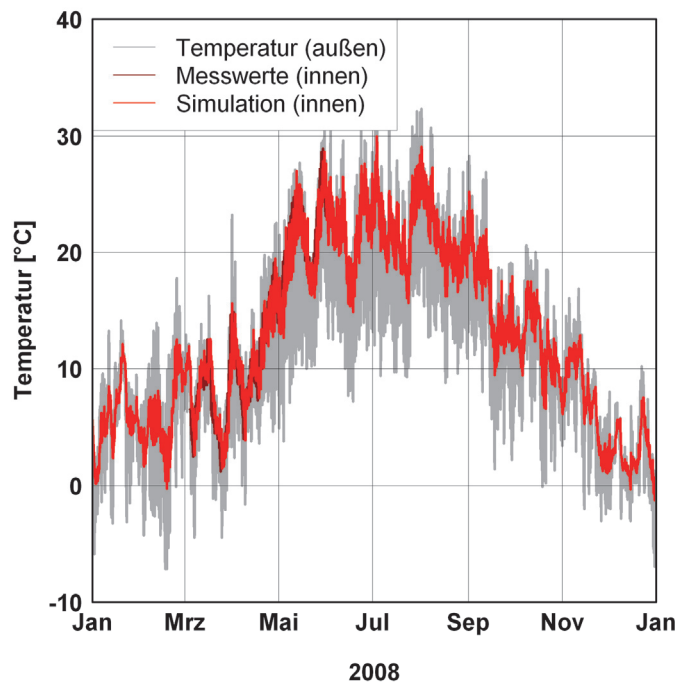


Bild 50: Temperatur außen und in der Torhalle Lorsch für das Jahr 2008, Messung und Simulation. Messdaten innen liegen nur von Anfang März bis Ende Mai 2008 vor.

### 6.3.5 Statistische Bewertung

Eine Besonderheit stellt bei der Bewertung der Simulation zur Torhalle in Lorsch die nur in geringer Zahl und in stark reduziertem Umfang vorliegenden Messdaten dar, die nur für den Zeitraum 5. März 2008 bis 31. Mai 2008 existieren. Das Modell wurde mit diesen Daten kalibriert und anschließend für ein gesamtes Jahr berechnet.

Wegen der kurzen Messphase liegen keine normalverteilten Daten für die Temperatur vor. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman zeigt eine gute Übereinstimmung für die Temperatur und eine geringe bis mittlere für die relative Luftfeuchte (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Korrelationskoeffizienten nach Spearman und Bravis-Pearson sowie Test der Messwerte und Simulationsdaten aus der Torhalle Lorsch auf Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov, Normalverteilung der Daten bei einem Signifikanzlevel  $\alpha < 0,05$ . Daten des Zeitraums der Modellkalibrierung vom 5. März 2008 bis 31. Mai 2008, 4-Stunden-Werte (N = 527).

Simulation	Parameter	Test auf Normalverteilung	Korrelationskoeffizienten	
			Pearson $r_{xy}$	Spearman $r_{sp}$
Messdaten	r.F. [%]	0,048	-	-
Messdaten	T [°C]	0,109	-	-
Simulation	r.F. [%]	0,084	0,808	0,777
Simulation	T [°C]	0,098	0,975	0,970

Die statistischen Lageparameter zeigen, dass die Simulation generell die Realität gut abbildet. Minimum und Maximum sind in der Simulation richtig dargestellt und auch der gesamte Datenumfang wird gut wiedergegeben (Tabelle 20). Insgesamt liegt die relative Luftfeuchte im mittleren Bereich in der Simulation etwas höher als in der Realität, wie auch in den QQ-Plot (Bild 51 und Bild 52) bzw. in den Dichtefunktionen (Bild D 1 und Bild D 2) deutlich sichtbar ist. Der Median der Simulation weicht um 5,5 % r.F. von den gemessenen Werten ab. Die Wiedergabe der Temperatur durch die Simulation ist für den Zeitraum der Modellkalibrierung durchgängig „Hervorragend“.

Tabelle 20: Statistische Lageparameter von Temperatur und relativer Luftfeuchte der Messung und der Varianten der Simulation der Königshalle in Lorsch, Zeitraum der Modellkalibrierung, 5. März 2008 bis 31. Mai 2008. Bewertung der Übereinstimmung **Hervorragend** / **Akzeptabel** / **Gering** nach den vorgeschlagenen Kriterien für Lageparameter (S. 92).

	<b>Minimum</b>	P1	P25	<b>Median</b>	P75	P99	<b>Maximum</b>	<b>Range</b>
	<b>relative Luftfeuchte [% r.F.]</b>							
Messung	<b>31,4</b>	32,5	51,8	<b>60,8</b>	69,8	82,5	<b>84,7</b>	<b>53,3</b>
Simulation	<b>34,2</b>	37,8	55,6	<b>66,3</b>	72,7	83	<b>83,4</b>	<b>49,1</b>
	<b>Temperatur [° C]</b>							
	<b>Minimum</b>	P1	P25	<b>Median</b>	P75	P99	<b>Maximum</b>	<b>Range</b>
Messung	<b>1,2</b>	1,9	7,9	<b>12,2</b>	19	27,4	<b>28,9</b>	<b>27,7</b>
Simulation	<b>1,6</b>	2,2	8,2	<b>12,1</b>	18,3	26,9	<b>28,6</b>	<b>27</b>

Eine statistischer Vergleich der beiden Datensätze erfolgt hier zusätzlich und beispielhaft mit den sogenannten Ferro-Hypothesen (siehe Kapitel 2.3.2, S. 66). Da  $H_0$  die optimale Übereinstimmung zwischen den beiden Datensätzen darstellt, sind Hypothesenlinien nahe an  $45^\circ$  erstrebenswert. Es ist gut zu erkennen, dass dies vor allem bei der Temperatur gelungen ist (Bild 52). Aber auch die Datensätze der relativen Feuchte liegen nahe an  $45^\circ$ , die relative Feuchte in der Simulation liegt durchweg um ca. 5 % r.F. höher als die der Messung, wie der QQ-Plot (Bild 51) zeigt. Der QQ-Plot wird am besten durch die Hypothese  $H_L$  (Location) und  $H_{LS}$  (Location, Scale) beschrieben (Bild 51, links). Das bedeutet, dass die Abweichung vornehmlich einen Unterschied in der Lage zur Ursache hat, in der Kombination mit einer Verschiebung der Größe des Datenumfangs. Dies wird durch die Dichtefunktion (Bild D 1) bestätigt.



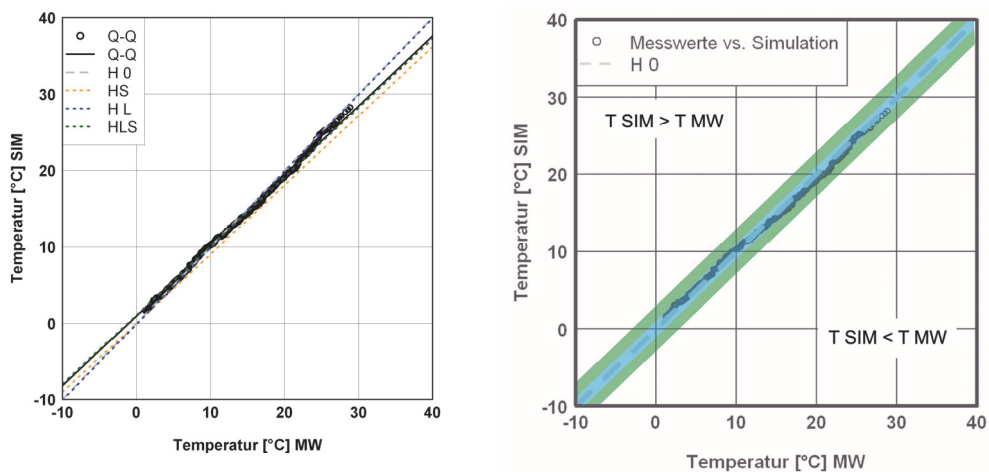


Bild 51: Links: Darstellung der Ferro-Hypothesen für die gemessene und die simulierte Temperatur für den Zeitraum der Modellkalibrierung. Rechts: Bewertung der Abweichung von Messung und Simulation mittels QQ-Plot, **Hervorragend** für Abweichung  $\leq \pm 1$  °C, **Akzeptabel** für  $\leq \pm 3$  °C. Die Temperatur wird durch die Simulation über nahezu den gesamten Wertebereich „Hervorragend“ wiedergegeben.

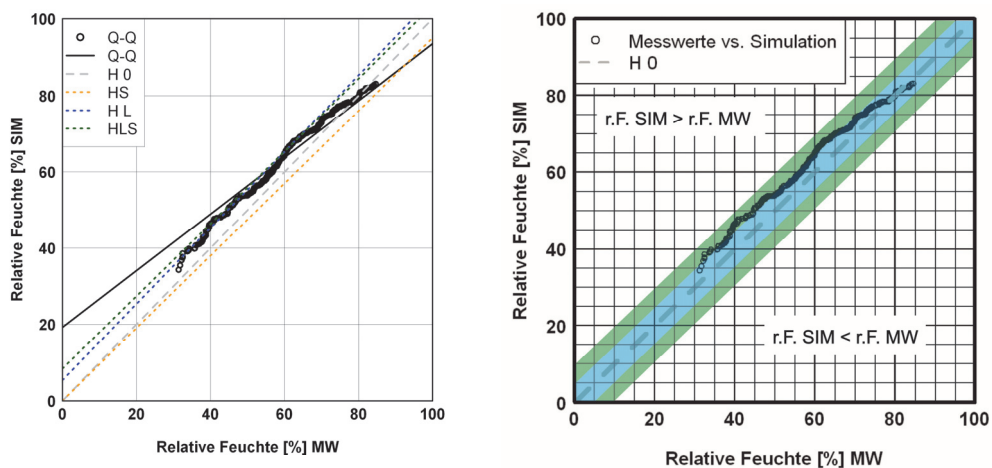


Bild 52: Links: Darstellung der Ferro-Hypothesen für die gemessene und die simulierte relative Feuchte für den Zeitraum der Modellkalibrierung. Der QQ-Plot wird am besten durch HL und HLS beschrieben. Rechts: Bewertung der Abweichung von Messung und Simulation mittels QQ-Plot, **Hervorragend** für Abweichung  $\leq \pm 5$  % r.F., **Akzeptabel** für  $\leq \pm 10$  % r.F. Die relative Feuchte liegt in der Messung insgesamt zu hoch, ist aber über den gesamten Wertebereich „Akzeptabel“ wiedergegeben.

### 6.3.6 Test auf Schadensfunktionen

In den Untersuchungen der 1980'er und 90'er Jahre [Hessisches Landesmuseum 1993] wurde eine erhebliche Salzbelastung im Putz und Mauerwerk der Torhalle Lorsch festgestellt. Es handelt sich um Ammoniumnitrat, eingebracht vor allem durch Taubenkot.

Für dieses Salz lässt sich die temperaturabhängige Deliqueszenzfeuchte, also der Punkt des Übergangs zwischen flüssiger und kristalliner Phase, mit einem einfachen Modell [Nieveler 1998] berechnen. Vergleicht man die kalibrierten Simulationswerte mit der Deliqueszenzfeuchte in Bild 53, so wird deutlich, dass ca. die Hälfte aller Messpunkte oberhalb dieser Grenzfeuchte und die andere Hälfte darunter liegt. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich im Laufe eines Jahres die Feuchte- und Temperaturzustände so ungünstig ändern, dass es zu wiederholtem in Lösung gehen und Auskristallisieren von Salzen in der Wand kommt. Dies führt, wie auch in den früheren Forschungsberichten beschrieben, zu fortschreitenden Schäden wie Abplatzungen und Absandungen des Putzes und der Malschicht.

Um diesen Schadensmechanismus und dessen Auswirkungen genauer zu beschreiben, wurden für die Mess- und Simulationsdaten die Salzkristallisationswechsel berechnet. Ein Wechsel beschreibt den Übergang der Raumluftkonditionen von einem Milieu, in dem Salze kristallisieren zu einem Milieu, in dem Salze in Lösung gehen und umgekehrt.

In Bild 53 und Bild 54 ist der Kalibrierungszeitraum von Anfang März bis Ende Mai 2008 dargestellt, in Bild 55 die Kristallisationswechsel für den gesamten Simulationszeitraum 2008. Diese Abbildungen zeigen die berechnete Differenz zwischen der Deliqueszenzfeuchte und der relativen Feuchte im Innenraum, zudem zeigt die rote Linie die Salzkristallisationswechsel an.

Im Messzeitraum wurden 42 Salzkristallisationswechsel berechnet, im gleichen Simulationszeitraum 38 Wechsel vorhergesagt. Der Vorhersagequotient  $Q_V$  ergibt sich damit zu:

$$Q_V = \frac{N_{Sim}}{N_{MW}} = \frac{38}{42} = 0,905 \quad (8)$$

Das entspricht einer Genauigkeit der Vorhersage durch die Simulation von über 90 % und erfüllt damit die in Kapitel 5.3 aufgestellten Kriterien für die Vorhersage von Schadens-Ereignissen. Im gesamten Simulationszeitraum für das Jahr 2008 wurden insgesamt 203 Salzkristallisationswechsel berechnet.

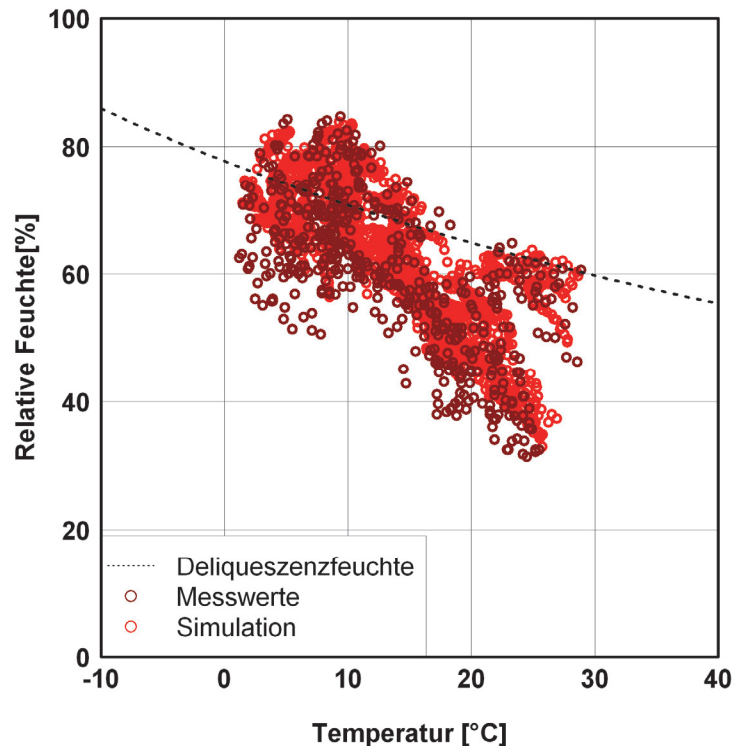


Bild 53: Streudiagramm der Temperatur und der relativen Feuchte in der Torhalle Lorsch für den Zeitraum der Modellkalibrierung von Anfang März bis Ende Mai 2008. Messung und Simulation in Bezug auf die Deliqueszenzfeuchte (DRF), die die Grenze zwischen Kristallisation und in Lösung gehen des Ammoniumnitrats  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  angibt.

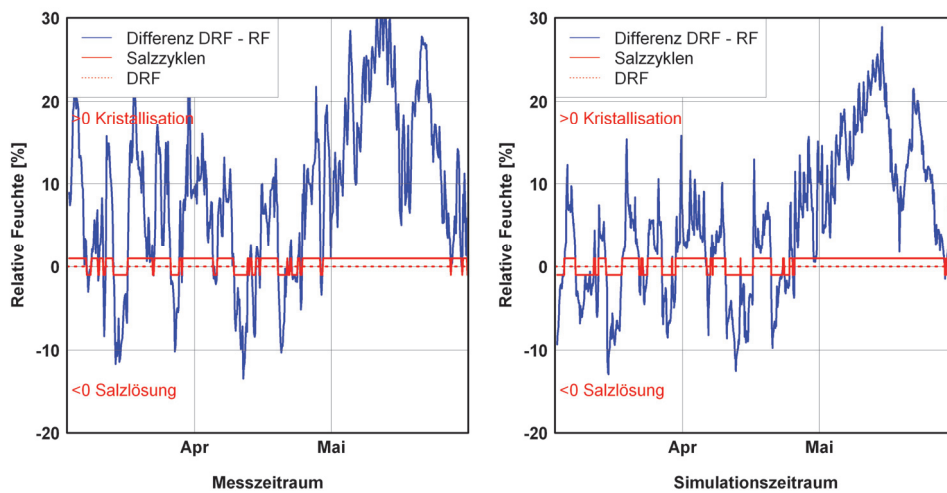


Bild 54: Differenz zwischen der Deliqueszenzfeuchte von Ammoniumnitrat und der gemessenen Raumlufteuchte und der simulierten Raumlufteuchte in der Torhalle Lorsch für den Zeitraum der Modellkalibrierung im Vergleich.

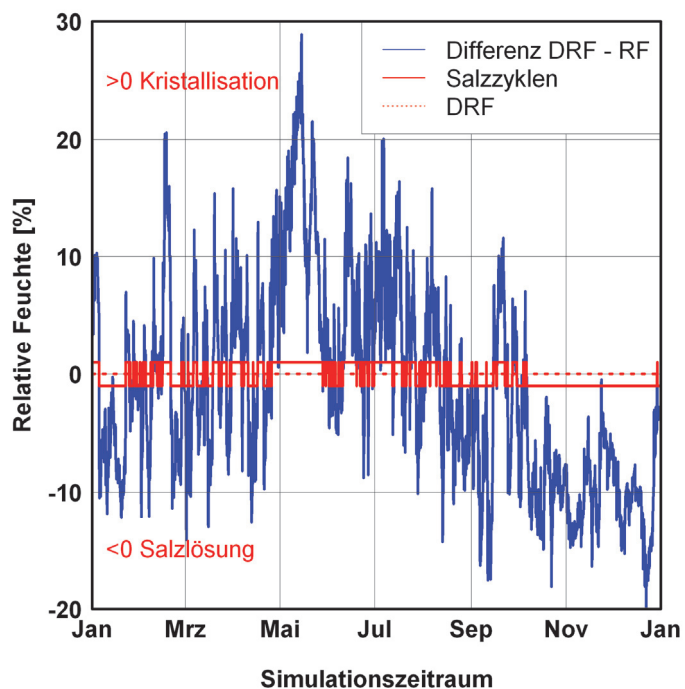


Bild 55: Differenz zwischen der Deliqueszenzfeuchte von Ammoniumnitrat und der simulierten Raumlufffeuchte in der Torhalle Lorsch für das gesamte Jahr 2008.

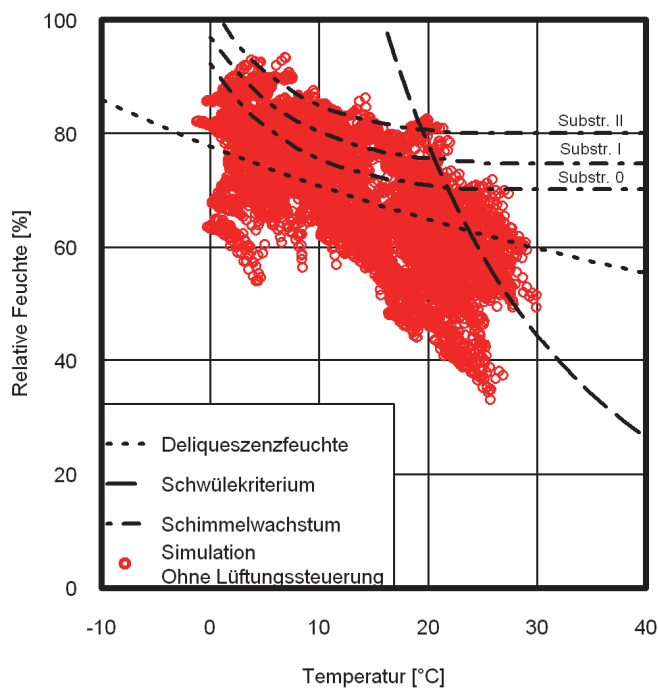


Bild 56: Streudiagramm für Temperatur und relative Luftfeuchte im Simulationsjahr 2008. Ungefähr die Hälfte der Stundenwerte liegt oberhalb der Deliqueszenzfeuchte, dies lässt auf zahlreiche Phasenwechsel der bauschädlichen Salze schließen. Einige Stunden im Jahr sind die Bedingungen für ein Schimmelpilzwachstum günstig, ebenso gibt es einige Stunden Schwüle.

### 6.3.7 Variantenberechnung

Zur Entwicklung eines neuen Klimakonzeptes für die Torhalle in Lorsch wurden vier unterschiedliche technische Lösungsansätze betrachtet. Das ursprüngliche Konzept aus den 1990er Jahren war eine geregelte Belüftung [Kiebl 1995], bei der absolute Feuchte innen und außen verglichen werden und bei für die Trocknung der Raumluft günstigen Bedingungen mechanisch gelüftet wird. Als zweiter Ansatz wurde „Conservation Heating“ [Blades 2011], [Schellen 2011] betrachtet, bei dem mittels mobiler Heizkörper mit hygrostatischer Regelung die relative Luftfeuchte durch das Anheben der Innenraumtemperatur reduziert wird. Als dritter und vierter Ansatz wurde die Be- und Entfeuchtung über mobile Geräte durch Simulation mit WUFI® Plus untersucht.

Tabelle 21: Phasenwechsel pro Jahr für die Variantenberechnungen mit den unterschiedlichen Klimakonzepten.

Simulation	Phasenwechsel [a <sup>-1</sup> ]
Ausgangssimulation	203
Conservation Heating	6
Kontrollierte Lüftung	208
Entfeuchtung	0
Befeuchtung	8

Die Variantenrechnungen [Kilian 2012] ergeben, dass im Fall der Torhalle Lorsch mit ihrer Problematik von Salzen im Mauerwerk eine geregelte Lüftung das falsche Konzept ist, da sich dadurch die Schwankungen der relativen Luftfeuchte um den Deliqueszenzpunkt nicht reduzieren, sondern eher noch verstärken (Tabelle 21). Die drei anderen Varianten schaffen ein kontrolliertes Klima, wobei im Fall einer Befeuchtung die Salze in Lösung gehalten werden, jedoch das Risiko für die Aktivität von Mikroorganismen steigt. Entfeuchtung stellt aus Sicht der Präventiven Konservierung die sicherste Variante dar.

Tabelle 22: Errechneter Energieverbrauch der untersuchten Klimakonzepte.

Simulation / Variante	Energieverbrauch [kWh/a]
Conservation Heating	18.714
Kontrollierte Lüftung	325
Entfeuchtung	829
Befeuchtung	37

Mit der Variantenrechnung wurde auch der Energieverbrauch zwischen geregelter Lüftung, Be- und Entfeuchtung sowie Conservation Heating, also dem Beheizen zur Reduzierung der Luftfeuchte gegenübergestellt, siehe Tabelle 22 und Bild 57. Dabei wurde handelsübliche Klimatechnik zu Grunde gelegt. Es wird deutlich, dass Conservation Heating circa um den Faktor 20 mehr Energie verbraucht als die Variante für Entfeuchtung, die auch wegen Vermeidung von Schimmelpilzwachstum die sicherste Option zur Schadensvermeidung darstellt.

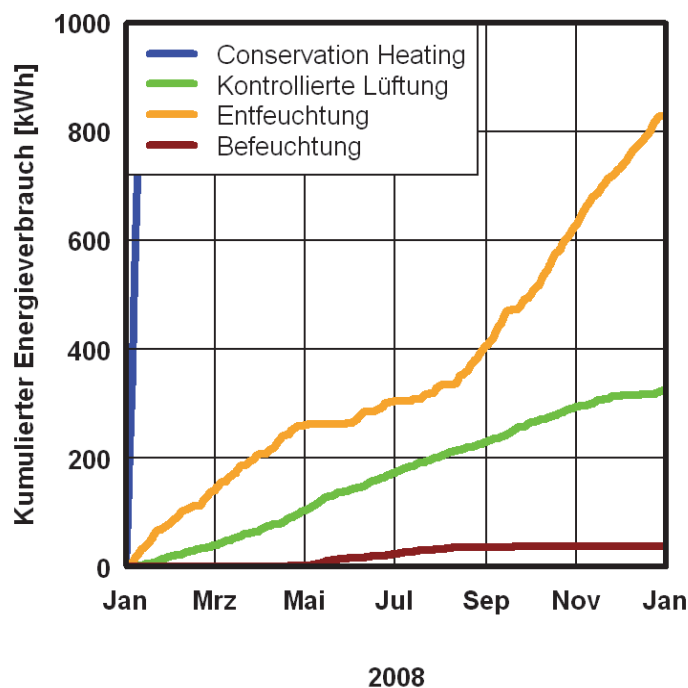


Bild 57: Kumulierter Energieverbrauch für das Jahr 2008 für die verschiedenen Simulationen bei einem konstanten Luftwechsel von  $0,4 \text{ h}^{-1}$ . Der Energieverbrauch der Befeuchtung steigt nur im Sommer leicht an, wo hingegen die Kurve der Entfeuchtung hauptsächlich in den übrigen Jahreszeiten ansteigt. Die kontrolliert Lüftung ist das ganze Jahr über aktiv und verbraucht dementsprechend Strom. Der Jahres-Energieverbrauch des Conservation Heating liegt mit ca. 18.700 kWh weit über den übrigen Konzepten.

### 6.3.8 Zusammenfassung

Das Beispiel der Torhalle Lorsch zeigt die Möglichkeiten auf, die ein kalibriertes Simulationsmodell für die Planung von Maßnahmen in Hinblick auf die Präventive Konservierung wie auch auf andere Aspekte, z. B. den Energiebedarf, bringt. Der Kalibrierungszeitraum für das Modell war dabei extrem kurz, sodass eine umfangreichere Validierung mit einem weiteren Datensatz, der aktuell von

2011 bis 2012 gemessen wird, noch aussteht. Da zur Kalibrierung ein Zeitraum im Frühling und Frühsommer gewählt wurde, also eine Übergangsjahreszeit mit kalten und warmen Außenbedingungen, wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse die Realität hinreichend genau widerspiegeln. In Hinblick auf die generelle Abbildung der Realität stößt das Modell durch verschiedene Unsicherheiten, vor allem was die Nutzung und Lüftung angeht, an seine Grenzen, erfüllt aber die aufgestellten Kriterien mit Ausnahme des mittleren Bereichs der relativen Luftfeuchte trotz allem gut bis sehr gut. Die Abbildung der Schadensfunktionen ist hinreichend genau, um entsprechende Aussagen in den Variantenrechnungen möglich zu machen. Grundsätzlich ist eine breitere Datengrundlage wünschenswert, um eine bessere Einschätzung der Genauigkeit des Modells für den Jahresverlauf zu erhalten.

## 7 Einflussfaktoren auf die Klimastabilität

Mittels hygrothermischer Gebäudesimulation können unterschiedliche Einflüsse auf die Klimastabilität in historischen Gebäuden wie die Feuchtepufferung von Innenraummaterialien, die Luftwechselrate oder der Einfluss der Besucher untersucht werden. Ist ein Modell hinreichend gut kalibriert, ist es anhand von Variantenbetrachtungen und Sensitivitätsanalysen möglich, die Relevanz einzelner Parameter auf das Raumklima zu bestimmen. Dies wird gezeigt an den Beispielen des Königshauses am Schachen, der Torhalle in Lorsch und des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof.

### 7.1 Feuchtepufferung

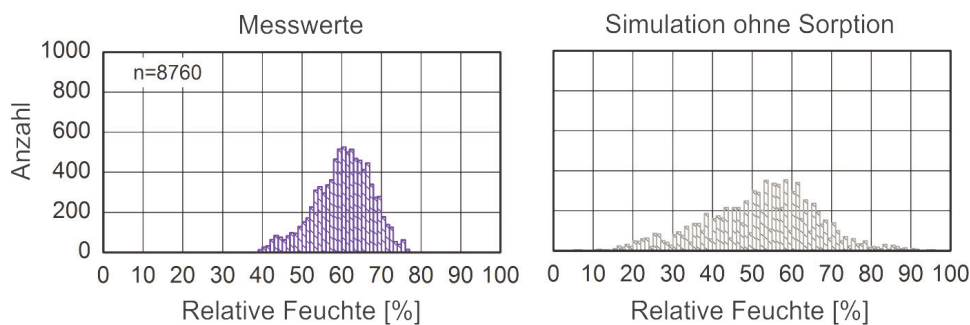


Bild 58: Histogramme von Stundenwerten der relativen Luftfeuchte im Türkischen Saal im Königshaus am Schachen, Messwerte und Simulation, mit und ohne Feuchtepufferung, erste Simulation, 1.10.2006 bis 30.9.2007. Das Histogramm der simulierten relativen Feuchte unter Ausschluss der Sorption der Innenraumoberflächen ist deutlich flacher und breiter, was eine höhere Varianz des Raumklimas ausdrückt. Die Spannweite der relativen Luftfeuchte verdoppelt sich.

Die Feuchtepufferung von Materialien hat einen entscheidenden Einfluss auf die Klimastabilität. Am Beispiel des Königshauses auf dem Schachen ist dies mittels der hygrothermischen Gebäudesimulation gut nachvollziehbar. Wird bei sonst gleichen Randbedingungen der Einfluss der Sorption in der Simulation ausgeschaltet, so wird deutlich, dass die relative Feuchte in Räumen mit geringer Luftwechselrate durch die Feuchtepufferung erheblich stabilisiert wird (Bild 58). Im Schachenhaus reduziert die Feuchtepufferung die Schwankungsbreite des Raumklimas über das Jahr betrachtet auf die Hälfte. Während die gemess-



sene Spannweite für das Jahr 2006/2007 bei 43 % r.F. liegt, so wäre sie größer als 80 % r.F. ohne den Einfluss der Feuchtpufferung.

Am Beispiel der Torhalle in Lorsch wurde mit hygrothermischer Gebäudesimulation für einen verputzten, nicht klimatisierten historischen Raum, eine Variantenbetrachtung für die Feuchtpufferung mittels des Programms WUFI® Plus durchgeführt. Dazu wurde die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  der Innenraumoberflächen variiert. Diese bestimmt die Geschwindigkeit der Sorption durch die oberflächennahen Materialien. Ein hoher  $s_d$ -Wert bedeutet dabei einen höheren Widerstand für Adsorptions- und Desorptionsprozesse. Es zeigt sich, dass bereit wenige Zentimeter ausreichen, um den Effekt der Feuchtpufferung erheblich zu reduzieren (Bild 59, links), was besonders deutlich bei einer niedrigen Luftwechselrate wird, hier  $n = 0,1 \text{ h}^{-1}$ . Führt man dieselbe Variantenrechnung für  $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$  oder  $n = 1 \text{ h}^{-1}$  durch (Bild 59, rechts), nimmt der Einfluss der Feuchtpufferung auf die Klimastabilität maßgeblich ab. Der Luftwechsel mit der Außenluft bestimmt das Raumklima stärker.

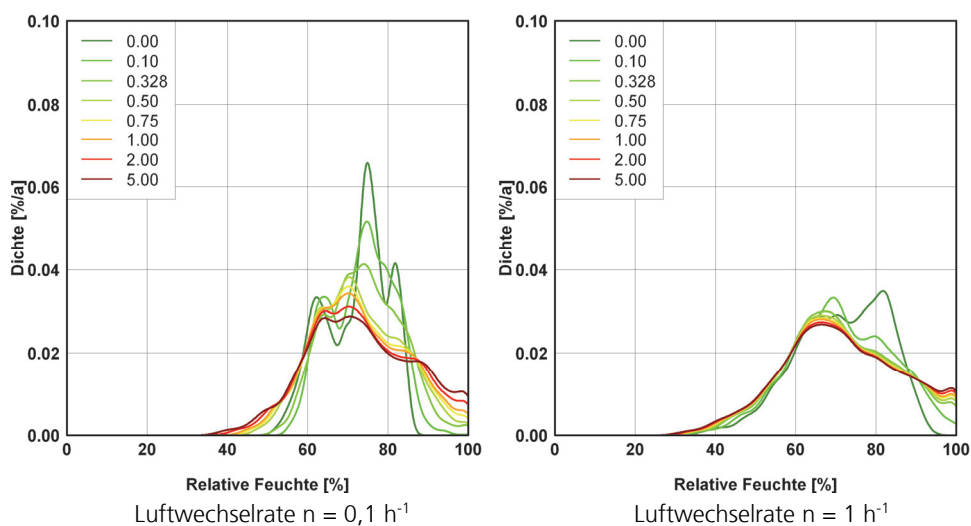


Bild 59: Variation der diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  [m] der Innenraumoberflächen der Torhalle Lorsch mittels WUFI® Plus. Links: Bei einer niedrigen konstanten Luftwechselrate von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Feuchtpufferung. Rechts: bei einer konstante Luftwechselrate von  $1 \text{ h}^{-1}$  hat die Feuchtpufferung nur mehr einen geringen Einfluss auf die Breite der Dichtefunktion. Das Raumklima wird vorherrschend durch die Infiltration der Außenluft bestimmt.

## 7.2 Luftwechsel

Dieselbe Variantenbetrachtung wie für die Feuchtepufferung wird am Beispiel der Torhalle Lorsch auch für die Luftwechselraten durchgeführt. Dabei wird die Luftwechselrate von 0 bis zu  $15 \text{ h}^{-1}$  in dem kalibrierten Simulationsmodell (vgl. Kapitel 6.3.4) variiert und jeweils ein ganzes Jahr mit einer konstanten Luftwechselrate gerechnet. Die real gemessene Luftwechselrate der Torhalle liegt im Mittel bei  $0,4 \text{ h}^{-1}$  (siehe Tabelle 25), variiert aber mit den Umweltbedingungen und der Nutzung. Bild 60 zeigt den erheblichen Einfluss der Luftwechselrate auf die Stabilität des Innenraumklimas. Dabei ist festzustellen, dass für einen Raum der Größe und Kubatur der Königshalle bereits im unteren Bereich der Luftwechselrate mit  $n < 0,5 \text{ h}^{-1}$  ein erheblicher Einfluss auf die Schwankungsbreite des Raumklimas zu erkennen ist, insbesondere bezogen auf die relative Luftfeuchte. So bedeutet eine Luftwechselrate von  $1 \text{ h}^{-1}$  gegenüber einer Luftwechselrate von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  für den betrachteten Fall fast eine Verdoppelung der jährlichen Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte (siehe Tabelle 23), ein Unterschied der für die Frage nach dem Schadensrisiko entscheidend sein kann (vgl. Kapitel 2.1, Bild 8, S.40).

Tabelle 23: Auswirkung des Luftwechsels auf die Spannweite (*Range*), Minima und Maxima der relativen Luftfeuchte am Beispiel der Torhalle Lorsch, ermittelt durch Simulation von Varianten der Luftwechselrate  $n$  bei konstanten Randbedingungen.

Luftwechsel $n \text{ [h}^{-1}\text{]}$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	5
Min r.F. [%]	65	55	48	37	35	33	30
Max r.F. [%]	86	87	89	92	94	98	100
Range r.F. [%]	21	32	39	55	59	63	70

Der Einfluss auf die Temperatur ist deutlich geringer und macht sich letztendlich hauptsächlich in einer Reduzierung des Einflusses solarer Wärmegewinne auf das Raumklima bemerkbar, die in einer Verschiebung der Schwankungsbreite in Richtung geringerer Temperaturen sichtbar wird (Bild 61). Auffällig ist, dass hier der Einfluss der Luftwechselrate erst ab  $n > 2 \text{ h}^{-1}$  stark zunimmt.

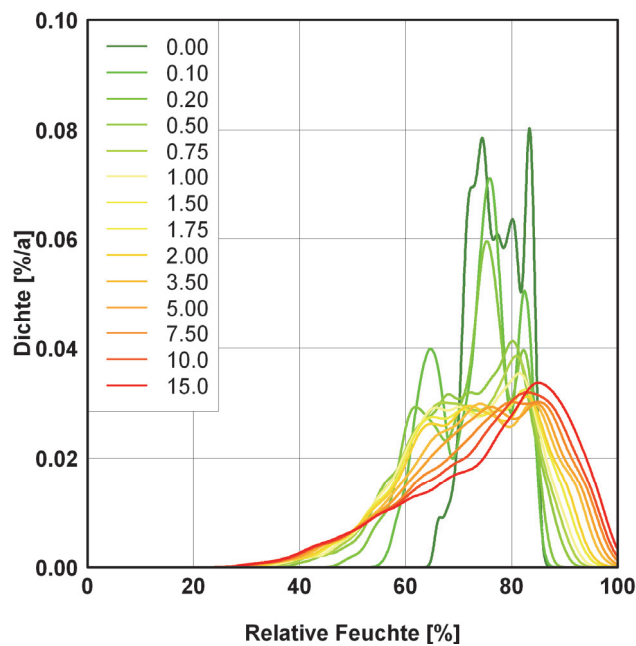


Bild 60: Simulierte Dichtefunktion des Jahresverlaufs der relativen Luftfeuchte in der Königshalle in Lorsch bei der rechnerischen Variation der Luftwechselrate von  $n = 0$  bis  $n = 15 \text{ h}^{-1}$  mit der Software WUFI® Plus. Gerade bei den geringen Luftwechselraten unter  $0,5 \text{ h}^{-1}$  ist ein erheblicher Einfluss auf die Breite der Dichtefunktion und damit auf die Klimastabilität des Raums zu erkennen.

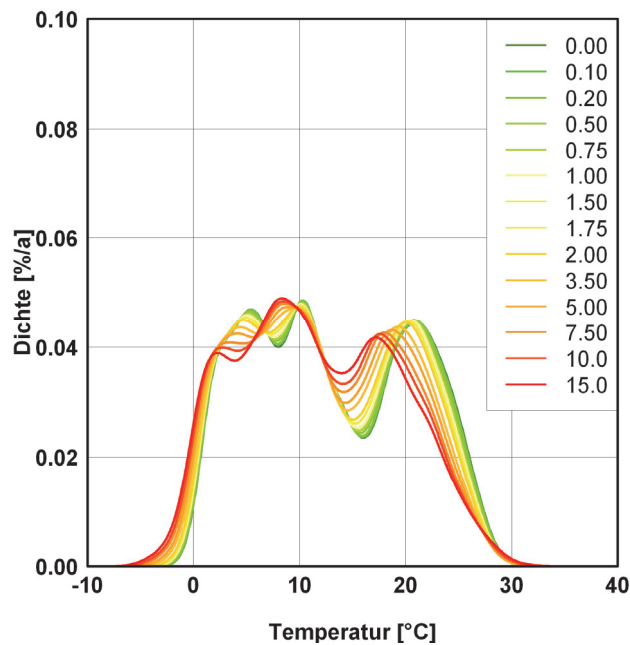


Bild 61: Simulierte Dichtefunktion der Temperatur in der Königshalle in Lorsch bei der rechnerischen Variation der Luftwechselrate von  $n = 0$  bis  $n = 15 \text{ h}^{-1}$  mit der Software WUFI® Plus. Die geringen Luftwechselraten unter  $1 \text{ h}^{-1}$  haben nur wenig Einfluss auf die Breite der Dichtefunktion der Temperatur. Erst bei hohen Luftwechselraten von  $n > 2 \text{ h}^{-1}$  werden die solaren Wärmegewinne des Gebäudes durch die erhöhten Masseströme erheblich reduziert.

Änderungen der Gebäudedichtigkeit in den Bereichen des Luftwechsels, in denen sich historische Gebäude bei geschlossenen Türen und Fenstern normalerweise im Mittel befinden, zwischen  $n = 0,2 \text{ h}^{-1}$  und  $n = 1 \text{ h}^{-1}$  (siehe Tabelle 25), haben also bei unbeheizten Gebäuden auf die thermische Performance kaum einen Einfluss, dafür aber einen umso höheren auf die relative Luftfeuchte und damit auf die generelle Klimastabilität und die Bedingungen für die Erhaltung.

[Kippes 1999] bewertet den Luftwechsel  $n = 1 \text{ h}^{-1}$  als den Idealzustand in historischen Gebäuden, den frühere Baumeister bewusst oder unbewusst für Ihre Bauten geschaffen hätten. Die Einschätzung für alte Häuser mit Sammlungen nach [Holmberg 1997] gibt folgende, sehr allgemeine Einteilung (siehe Tabelle 24). Nachdem gerade für die relative Luftfeuchte der Bereich der größten Änderungen in Hinblick auf die Klimastabilität unterhalb dem Luftwechsel von  $n = 1 \text{ h}^{-1}$  stattfindet, ist fraglich, ob eine derartige Abstufung sinnvoll ist, oder ob nicht eher eine feinere Unterscheidung im Bereich der niedrigen Luftwechsel bzw. eine fallweise Betrachtung zielführender ist.

Tabelle 24: Einschätzung der Luftwechselrate für Museen und Sammlungen in historischen Gebäuden nach [Holmberg 1997].

Air changes per hour	Holmberg grade	Present status
< 0,5	A	excellent
< 1,0	B	good
< 2	C	moderate
< 5	D	poor
< 10	E	very bad

[Larsen 2011] beschreibt für die Klimatisierung historischer, unbeheizter Gebäude den Zusammenhang zwischen Energieverbrauch für die Entfeuchtung, dem Zielbereich der relativen Luftfeuchte und der Luftwechselrate. Je höher der Zielbereich der relativen Luftfeuchte gewählt wird und je geringer die Luftwechselrate ist, desto geringer ist letztendlich der Energieverbrauch, um das Klima auf einem konstantem Level zu halten.

Für die Anna Amalia Bibliothek in Weimar (vgl. Kapitel 2.2.4, S. 54), die vor der Brandkatastrophe 2004 trotz einer mittleren Luftwechselraten von  $0,8 \text{ h}^{-1}$  im Jahresverlauf eine Schwankungsbreite von gerade einmal 15 % r.F. aufwies, hätte bereits allein eine Erhöhung der Luftdichtigkeit ausgereicht, um in Bezug

auf die relative Luftfeuchte ein „Museums-klima“ der Klasse AA nach [ASHRAE 2007] zu erreichen. Die relative Luftfeuchte in der Bibliothek wird – wenn man von den Besuchern und anderen internen Feuchtequellen absieht – in ihrem Niveau vorherrschend aus dem Verhältnis der Innentemperatur zur mittleren absoluten Luftfeuchte außen bestimmt und in ihrer Amplitude durch die Luftwechselrate und die extrem hohe Feuchtepufferung.

Tabelle 25: Typische mittlere Luftwechselraten historischer Gebäude und eines Depots bei geschlossenen Türen und Fenstern, Anna Amalia Bibliothek Weimar, gemessen 1997 vor dem Brand, nach [Eckermann 2002], St. Renatus nach [Kilian 2004], Schloss Schönbrunn nach [Kippes 1999], Skokloster Schloss nach [Broström 2010], Läckö Schloss nach [Holmberg 1999], Gebäude in Dänemark nach [Larsen 2011].

Gebäude	Luftwechsel $n$ [ $h^{-1}$ ]
Värlöse, temporäres Depot in einem ehemaligen Flugzeughangar / Bunker, Dänemark	0,05
Kippinge Kirche, Dänemark	0,1
Torhalle Lorsch	0,1 – 0,4
Königshaus auf dem Schachen	0,3 – 0,4
Schloss Linderhof	0,1 – 0,5
St. Renatus, Lustheim	0,2 – 0,6
Schloss Skokloster, Schweden	0,4 – 0,6
Anna Amalia Bibliothek, Weimar	0,8
Liselund Herrenhaus, Dänemark	ca. 1
Schloss Schönbrunn, Wien, Österreich	ca. 1
Schloss Läckö, Schweden	0,5 – 1,5

## Fazit

Diese Ergebnisse der Variantenrechnungen bestätigen, dass dem Luftwechsel bei der Kalibrierung der Simulation eine maßgebliche Rolle beikommt. Vor dem Hintergrund der Präventiven Konservierung ist eine hohe Dichtigkeit bei Ge-

bäuden anzustreben, um kurzfristige und jährliche Schwankungen der relativen Luftfeuchte möglichst gering zu halten, da diese für eine Vielzahl von Schadensprozessen verantwortlich sind. Dabei muss aber die Frage nach Feuchtequellen im Raum mit berücksichtigt werden, da der Infiltrationsluftwechsel auch dazu beiträgt, überschüssige Feuchte aus Räumen abzutransportieren.

### 7.3 Außenklima, Besucher und andere Einflüsse

Dass Besucher einen erhebliche Einfluss auf das Raumklima haben, insbesondere wenn sie sich in großer Zahl auf relativ kleiner Fläche drängen, zeigt das Beispiel von Schloss Linderhof im Sommer. In Bild 62 ist die absolute Luftfeuchte im Paradeschlafzimmer Ludwig II für den Verlauf eines Jahres dargestellt. Die absolute Luftfeuchte eignet sich besser als die relative Luftfeuchte zum Vergleich des Einflusses des Außenklimas auf den Innenraum, da sie nicht von der Temperatur abhängig ist. Bei Vergleich der Messwerte „außen“ und aus dem „Paradeschlafzimmer“ wird zunächst deutlich, dass die absolute Feuchte innen der absoluten Feuchte außen folgt. Zusätzlich gibt es noch einen positiven Offset, der vor allem im Sommer sichtbar wird. Das bedeutet zusätzliche Feuchtequellen im Raum. Dass es sich dabei tatsächlich um die Besucher handelt, zeigt die Simulation. Die Variante mit Besucherprofil und variablen Luftwechsel beschreibt die gemessene absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer gut.

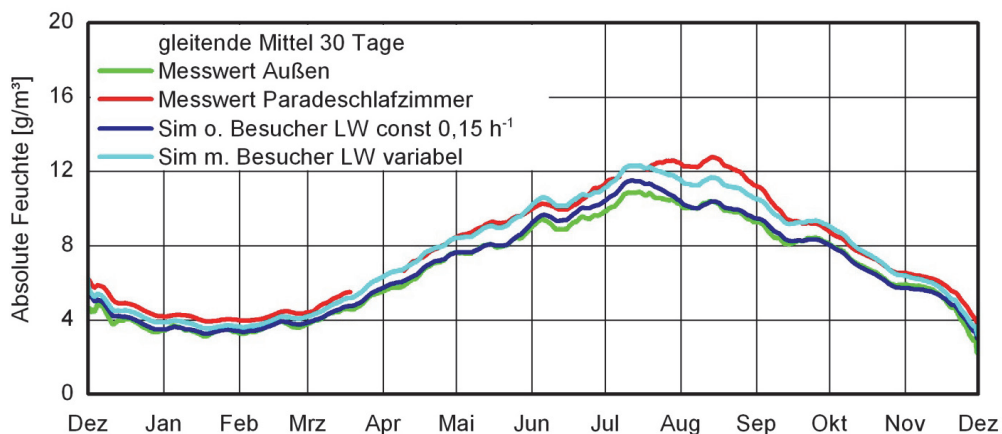


Bild 62: Absolute Feuchte des Außenklimas und der Messwerte im Paradeschlafzimmer mit der optimierten Simulation und einem Szenario ohne Einfluss der Besucher im gleitenden Mittel von 30 Tagen, 1. Dezember 2009 bis 1. Dezember 2010, nach [Bichlmair 2011].

Die Simulationsvariante ohne Besucher mit konstant geringem Luftwechsel zeigt, dass in diesem Fall die absolute Feuchte alleine durch den Infiltrationsluftwechsel und den Austausch mit dem Außenklima bestimmt würde.

Entgegen der Ergebnisse von [Kippes 1999] spielt der Einfluss der Besucher in Hinblick auf das Raumklima je nach Größe und Nutzung also durchaus eine wichtige Rolle für die Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, sowohl der direkte Einfluss als Quelle von Temperatur und Feuchte als auch der indirekte über die Erfordernis an Frischluft. Das Beispiel der beiden Bauten König Ludwig II. Schloss Linderhof und Königshaus auf dem Schachen zeigt die Wirkung der Besucher auf das Raumklima und die Erhaltung. Das Königshaus auf dem Schachen, das nur 5 Monate im Jahr für Besucher zugänglich ist und nur über einen 3-stündigen Fußmarsch erreichbar ist, hat deutlich besser erhaltene Oberflächen als Schloss Linderhof. In Linderhof wirken sich die Besucher auf 2-fache Weise aus. Zum einen direkt durch die Abgabe von Feuchte und Temperatur, zum anderen indirekt in der Verstärkung des notwendigen Luftwechsels, um einigermaßen komfortable Bedingungen für die Nutzung aufrecht zu erhalten, was zu einem verstärkten Einfluss des Außenklimas und damit zu höheren kurzzeitigen Schwankungen des Raumklimas führt.

### **Fazit**

Besucher haben sowohl direkt als Quellen von Feuchte, Temperatur und CO<sub>2</sub> einen Einfluss als auch indirekt, durch den Bedarf an frischer Luft, der bei dem Beispiel von Schloss Linderhof zu erhöhten Luftwechselraten im Sommer und damit zu geringerer Klimastabilität führt.

Zusammenfassend lässt sich zu den Einflussfaktoren feststellen, dass das Raumklima in unbeheizten historischen Gebäuden – wenn man Besucher und sonstige Feuchtequellen einmal außer Acht lässt – maßgeblich durch den Austausch mit dem Außenklima über den Luftwechsel sowie durch die thermische und hygri sche Trägheit des Raums bestimmt wird. Die mittlere Temperatur innen und die mittlere absolute Luftfeuchte außen bestimmen somit das mittlere Niveau der relativen Luftfeuchte. Die Amplitude der Schwankungen von Temperatur und Feuchte hängt bei unklimateisierten Räumen (ohne Einfluss von Besuchern und sonstigen Quellen) allein von der Luftwechselrate, der thermischen Trägheit und der Feuchtepufferung ab.

## 8 Bewertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die grundlegende Methode zur individuellen Ableitung von Gütekriterien für die hygrothermische Simulation im Kontext der Präventiven Konservierung bewertet und die Anwendbarkeit der Bewertungskriterien am Beispiel der Fallstudien geprüft. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationen werden gegenübergestellt, neue Erkenntnisse zur Klimastabilität historischer Gebäude und zur Simulation historischer Gebäude aufgezeigt.

### **Bewertung der Methode zur individuellen Ableitung von Gütekriterien für die hygrothermische Simulation**

Die Bewertungskriterien basieren auf einer umfassenden Analyse der bekannten Schadensprozesse für das materielle Kunst- und Kulturgut.

Es wurden Anforderungen an die Kriterien auf dieser Basis eingeführt sowie eine systematische Bewertung für Simulationsergebnisse in 2 Stufen. Einerseits muss die Abbildung der Realität generell hinreichend genau sein, andererseits die der relevanten Schadensfunktionen. Die festgelegten Kriterien sind streng und orientieren sich an den Simulationsergebnissen, die einen hohen Stand der Technik darstellen. Darüber hinaus müssen aber je nach Anwendungsfall ggf. gesonderte Kriterien aufgestellt werden, in Hinblick auf die vorherrschenden Schadensprozesse, Spezifika des Raumklimas oder der Nutzung. Dafür bietet die vorliegende Arbeit eine methodische Herangehensweise.

Zur Auswahl passender statistischer Methoden wurden einerseits einfache Kennwerte betrachtet, andererseits komplexere Methoden wie Hypothesentests. Bei der Anwendung zeigt sich, dass Ein-Zahlenwerte wie die Korrelationskoeffizienten nach Pearson oder Spearman sich nur in geringem Maß für die Beurteilung der Übereinstimmung von Simulation und Messung eignen, wie das Beispiel der Variantenbetrachtung bei der Kalibrierung der Simulation des Paradeschlafzimmers von Schloss Linderhof deutlich macht. Die als „optimal“ ausgewählte Simulation hat einen geringeren Korrelationskoeffizient als vier weitere Varianten, bildet aber die Gesamtheit der Daten deutlich besser ab. Die Variante, die die beste Korrelation aufweist, bildet Realität und Schadensfunktionen am schlechtesten ab. Die Korrelationskoeffizienten eignen sich deshalb nur zu sehr generellen Aussagen über die Güte der Kalibrierung einzelner Varianten und müssen immer im Kontext weiterer Kriterien betrachtet werden.



Als komplexere, mathematische Methode wurden die sogenannten Ferrothesen betrachtet, die in der Klimawandelsimulation zur Klärung der Ursachen von Abweichungen verschiedener Datensätze eingesetzt werden. Insgesamt ist der Informationsgewinn durch die Hypothesentests nach Ferro für den Vergleich simulierter Raumklimadaten nur gering. Daher wurde die Methode nicht weiter verfolgt.

Letztendlich wurden daher zur Beschreibung der Übereinstimmung von Datensätzen solide und auch durch Laien leichter verständliche Kenngrößen gewählt. Vor allem die Quantile lassen eine robuste Bewertung zu, da sie unabhängig von der statistischen Verteilung der Klimadaten angewendet werden können. Die grafischen Darstellungen wie QQ-Plot, Boxplot und Liniendiagramme mit gleitendem 30-Tage Mittel lassen einen einfachen und anschaulichen Vergleich zu. Einzelne Wertebereiche der Simulationen können auf diese Weise gut bewertet werden und ggf. deren Güte in der Kalibrierung gezielt verbessert werden.

Die höhere Schwankungsbreite des Raumklimas der 3. Simulation 2010/2011 im Königshaus auf dem Schachen wird allerdings allein aus den Lageparametern nicht ersichtlich, nur der Vergleich der täglichen Schwankungsbreite macht die Unterschiede deutlich. Dies unterstreicht nochmal die Notwendigkeit der parallelen Betrachtung mehrerer Kriterien und einer 2-stufigen Bewertung.

### **Bewertung der Fallstudien**

Die Fallstudien wurden entsprechend dem aktuellen Stand der Technik in der hygrothermischen Gebäudesimulation berechnet. Die Modelle wurden mit hohem Anspruch an Vollständigkeit und Genauigkeit der Eingabedaten erstellt und mit großem Aufwand in Sensitivitätsanalysen kalibriert. Da insbesondere Einflüsse des Außenklimas und der Besucher im Forschungsprojekt „Klimastabilität historischer Gebäude“ untersucht werden sollte, sind alle untersuchten Gebäude unklimatisiert. Die Bewertung der Simulation eines klimatisierten Gebäudes und der korrekten Abbildung der Funktionsweise eines Heizungssystem bzw. einer Raumlufthechnischen Anlage steht noch aus.

### **Königshaus auf dem Schachen**

Die Simulationen des Königshaus am Schachen konnte neue Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen Raumklima, Besuchern, Wetter und den Innenraumboberflächen erbringen. Das extrem stabile Raumklima am Schachenhause wird durch die geringe Luftwechselrate, die Haus im Haus Konstruktion des Gebäudes und die hohe Feuchtepufferung der Innenraummaterialien ge-

schaffen. Dies konnte in der 2. detaillierten Simulation nachvollzogen werden, indem die Oberflächenanteile der historischen Materialien in einer aufwendigen restauratorischen Bestandsaufnahme ermittelt wurden und deren hygrothermische Eigenschaften im Labor nachgestellt und gemessen wurden. Durch die Ermittlung der tatsächlichen Kenndaten erreichte die Simulation eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Klimadaten.

Insgesamt wurden 3 Simulationen für das Schachenhaus angefertigt. Die 1. vereinfachte Simulation bildet das Raumklima generell ab, jedoch mit deutlich zu warmen und zu trockenen Werten im Sommer. Die 2. Simulation bildet das Raumklima gut bis sehr gut ab, wie in der Bewertung der Lageparameter und der Schadensprozesse deutlich wird, insbesondere in Hinblick auf die täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Die 3. Simulation mit einem zweiten, unabhängigen Datensatz dient der Validierung und zeigt, dass die 2. Simulation zwar insgesamt gut kalibriert war, dass aber falsche Randbedingungen verwendet wurden. Die Schwankungen des Innenraumklimas sind bei der 3. Simulation deutlich höher. Der Hauptgrund dafür liegt in der Verwendung von Außenklimadaten eines unbelüfteten Sensors in einer Wetterhütte an einem geschützten Standort, der das Außenklima nur gedämpft aufgezeichnet hat. Für die 3. Simulation wurden Daten der Wetterstation benutzt, die 2009 am Schachen aufgestellt wurde. Diese Erkenntnis ist insbesondere wichtig für die Simulation möglicher Auswirkungen des Klimawandels. Nach Anpassung des für die 2. Simulation überschätzten Luftwechsels ergibt sich eine Verbesserung des Ergebnisses.

### **Schloss Linderhof**

Die Nachstellung des Raumklimas im Paradeschlafzimmer in Schloss Linderhof war nur durch umfangreiche Klimamessungen in allen angrenzenden Bereichen und die Ausarbeitung eines detaillierten Besucher- und Lüftungsprofils möglich. Die statistische Bewertung der einzelnen Varianten der Simulation kann die sukzessive Verbesserung des Modells bei der Kalibrierung nachvollziehen.

Bei dem Vergleich der 24 Stunden-Schwankungen der relativen Luftfeuchte wurden ein festes und ein gleitendes Intervall gegenübergestellt. Die Abbildung beider Analyseverfahren stimmt gut mit den Messwerten überein. Auch untereinander korrelieren beide Ansätze. Die Analyse der gleitenden Schwankungsbreite beschreibt jedoch einen höheren Anteil größerer Schwankungen auf, die relevant für das Fortschreiten von klimatisch bedingten Schäden sind.

Das Beispiel von Schloss Linderhof zeigt, dass die Bewertung „hervorragend“ für die Lageparameter aus technischer Sicht auch bei hochkomplexen Fragestel-

lungen zu erreichen ist. Das Simulationsmodell von Linderhof bietet eine wichtige Grundlage für die Planung zukünftiger Maßnahmen zur Präventiven Konservierung in Hinblick auf eine Stabilisierung des Raumklimas.

### **Torhalle Lorsch**

Die Herausforderung bei der Simulation der Torhalle Lorsch war die geringe Datenbasis für die Kalibrierung des Modells, die trotzdem erfolgreich durchgeführt werden konnte. Zukünftige Messungen in Lorsch werden dies nochmal nachvollziehbar machen. Für die Königshalle wurde eine Betrachtung der Kristallisationszyklen bauschädlicher Salze durchgeführt. Anhand dieser Betrachtung ist eine Bewertung der Risikoabschätzung durch die Simulation für die Präventive Konservierung möglich. Sowohl Lageparameter als auch die Vorhersage der Schadensprozesse konnten gut abgebildet werden und in der Folge mittels Variantenrechnungen verschiedene Klimakonzepte auf ihre Wirkung überprüft werden. Das Beispiel der Torhalle Lorsch zeigt, dass mit einem kalibrierten Modell, das wegen des kurzen Zeitraums der Kalibrierung erhebliche Unsicherheiten aufweist, trotzdem Vorhersagen getroffen werden können, die eine ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Maßnahmen bilden. Trotzdem sollte grundsätzlich die Simulation auf eine breitere Datenbasis gestellt werden, um eine größere Sicherheit in Bezug auf die ermittelten Aussagen zu bekommen.

### **Fazit**

Die Bewertung der Dynamik für das Königshaus am Schachen und für Schloss Linderhof macht deutlich, dass die kurz und mittelfristigen Ereignisse mit geringen Änderungen der relativen Luftfeuchte durch das Raummodell eher unterschätzt werden, die hohen Schwankungen, die besondere Relevanz für die Präventive Konservierung haben aber hinreichend gut abgebildet werden. Am Beispiel der Torhalle Lorsch wurde mit den Kristallisationswechseln von Ammoniumnitrat eine konkrete Schadensfunktion bewertet, bei der die Durchgänge der relativen Feuchte mit der temperaturabhängigen Deliqueszenzfeuchte des Salzes verglichen werden. Dabei konnte für den Zeitraum der Modellkalibrierung eine hohe Vorhersagequote von über 90 Prozent erreicht werden, die die aufgestellten Kriterien voll erfüllt. Die Betrachtung der Korrelationskoeffizienten von Messung und Simulation für die Temperatur zeigt, dass das thermische Raummodell generell eine extrem hohe Güte der Vorhersage besitzt. Die Simulation der relativen Luftfeuchte ist dagegen deutlich schwieriger wegen höherer Unsicherheiten durch die Nutzung der Gebäude, höherer Dynamik und deutlich komplexeren Transportvorgängen. Die konsequente Anwendung an allen drei Fallstudien zeigt, dass durch die Bewertung ein klares Bild über die tatsächliche

Genauigkeit der Simulation entsteht und damit ein höheres Vertrauen in die Ergebnisse.

Die Auswahl der Bewertungskriterien erfolgt pragmatisch, unter Einbeziehung der heute verfügbaren Möglichkeiten seitens der Simulation wie auch seitens der Risikobetrachtung für die Präventiven Konservierung. Die Kriterien für die Lageparameter sind deshalb praktikabel und können durch die Simulationsmodelle knapp erfüllt werden, auch Schadensfunktionen werden gut wiedergegeben. Die vorgestellten Kriterien stellen die Grundlage für eine Methodik dar, mit deren Hilfe die iterative Kalibrierung hygrothermischer Simulationsmodelle bezogen auf die spezifischen Fragestellungen der Präventiven Konservierung erfolgen kann.

### **Neue Erkenntnisse zu Raumklima und Erhaltung**

Die konservatorischen Untersuchungen am Königshaus auf dem Schachen belegen, dass niedrige Temperaturen nicht zwangsläufig zu Schäden führen. Wie [Mecklenburg 2010b] in seinen Simulationen gezeigt hat, können Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur kritisch sein, da organische Bindemittel verspröden und dann deutlich empfindlicher auf mechanische Belastung reagieren, als bei höheren Temperaturen. Bei tiefen Temperaturen können jedoch auch allein durch Spannungen im Material Schäden entstehen. Das gilt jedoch nicht für alle Materialien in gleichem Maß. Obwohl das Königshaus auf dem Schachen im Winter bis weit unter  $-10\text{ °C}$  auskühlt, sind die Gemälde und die vergoldeten Oberflächen aus konservatorischer Sicht in einem guten Zustand. Die Untersuchungen belegen insgesamt einen guten Erhaltungszustand des Türkischen Saales. Im Vergleich zu Schloss Linderhof, das durch die vielen Besucher eine erheblich stärkere Belastung erfährt und damit auch höhere Dynamik des Raumklimas aufweist, treten im Schachenhaus deutlich weniger Schäden auf. Eine quantitative Korrelation dieser Schäden zur Klimastabilität steht noch aus.

Die Simulationen zum Schachenhaus und zur Torhalle von Lorsch wie auch das Beispiel der Anna Amalia Bibliothek machen deutlich, wie hoch der Einfluss der Innenraummaterialien auf die Stabilität des Raumklimas sein kann. Die Gegenüberstellung mit der hygrothermischen Gebäudesimulation ermöglicht eine größtmögliche Realitätsnähe bei der quantitativen Abschätzung der vorhandenen Einflüsse. Vor allem Holz und textile Oberflächen wirken stark feuchtepuffernd, aber auch mineralische Oberflächen wie die in historischen Gebäuden allseits anzutreffenden Kalkputze oder Lehmputze. Diese Erkenntnisse spielen bei Planungen von Maßnahmen in historischen Gebäuden, aber auch für Museumsbauten eine wichtige Rolle.

## 9 Beurteilung der Ergebnisse

Dieses Kapitel liefert eine kritische Einordnung der Ergebnisse der Arbeit in den Kontext des aktuellen Wissensstandes und der verfügbaren Technik. Einerseits werden die Möglichkeiten und Grenzen der neuen Bewertungsmethode aufgezeigt, andererseits die neuen Erkenntnisse zur Simulation sowie zur Klimastabilität historischer Gebäude und deren Nutzen für die Präventive Konservierung.

### **Beurteilung der neuen Methode**

Die vorgestellte methodische Herangehensweise zeigt erstmals das systematische Vorgehen bei der Simulation historischer Gebäude auf und ermöglicht nun die fallspezifische, individuelle Ermittlung quantitativer Kriterien zur Bewertung der Simulations-Ergebnisse in dem besonders sensiblen Kontext der Präventiven Konservierung.

Bewertungskriterien können für den Bereich Präventive Konservierung nicht universell angegeben werden. Sie sind von einer Vielzahl von Aspekten abhängig, wie den Materialien, den vorherrschenden Schadensprozessen, dem Zustand der Artefakte, der Geschwindigkeit des Fortschritts von Schäden und nicht zuletzt vom Sicherheitsbedürfnis der Konservatoren und der Entscheidungsträger. Es wurden daher mit dieser neuen Methode keine harten Kriterien entwickelt, sondern solche, die individuell angepasst werden können und die gemäß den Bedürfnissen in interdisziplinären Projekten verhandelbar sind.

In dieser Arbeit wird erstmals eine Herangehensweise definiert, mit der diese Kriterien festgelegt und angepasst werden. Außerdem ermöglicht die Zusammenstellung eines statistischen Instrumentariums, den Vergleich von Datensätzen mit parametrischer und nichtparametrischer Statistik, um Abweichungen quantifizieren zu können. Dieses Instrumentarium erlaubt es, den Grad der Abbildung der Realität durch die Simulation wie auch die Unsicherheiten im Ergebnis genau zu bestimmen.

Die Fallstudien Schloss Linderhof, Königshaus auf dem Schachen und die Torhalle in Lorsch belegen die prinzipielle Anwendbarkeit der Methode. Sie zeigen, dass selbst hochkomplexe historische Räume wie das Paradeschlafzimmer König Ludwig II. durch die hygrothermische Gebäudesimulation für die Belange der Präventiven Konservierung hinreichend genau abgebildet werden können. Durch die vorgestellte Methode der Bewertung der aussagekräftigsten statisti-

schen Lageparameter und die Abbildung relevanter Schadensfunktionen wird eine verbesserte und genauere Kalibrierung der Modelle möglich. Mit diesen exakt kalibrierten Modellen kann die Wirkung von Maßnahmen und Risiken für Kunst- und Kulturgut in Zukunft besser abgeschätzt werden.

Genau hier liegen aber auch die Grenzen der Methode. Weiterer erheblicher, Forschungsbedarf besteht in der fehlenden quantitativen Korrelation von Schadensprozessen, Kunstwerken und Raumklima für die jeweiligen Gebäude. Mit wenigen Ausnahmen, wie z. B. der Vorhersage des Schimmelpilzrisikos durch das biohygrothermische Modell von WUFI® Bio oder das Viitanen Modell [Krus 2010], liegen bisher für die Präventive Konservierung keine quantitativen Schadensfunktionen vor, die die konkrete Festlegung von Kriterien erlauben.

### **Hygrothermische Gebäudesimulation**

Es wurde eine systematische Vorgehensweise für die Festlegung der Ziele, Ermittlung der relevanten Schadensprozesse und Bewertungskriterien für die Kalibrierung von Simulationen historischer Gebäude beschrieben sowie die für das Ergebnis relevanten Parameter aufgezeigt und nach ihrer Bedeutung gewichtet.

Da es sich bei den Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung fast ausschließlich um konkrete Fallstudien handelt, ist die Vollständigkeit und Genauigkeit der Eingabeparameter von hoher Wichtigkeit. Insbesondere die Ermittlung des Außenklimas und der Wetterdaten direkt vor Ort sind entscheidend, da das kleinräumige Außenklima wesentlich das Innenraumklima der meist unklimateisierten historischen Gebäude bestimmt.

Im Königshaus auf dem Schachen wurden für den Türkischen Saal erstmals im Rahmen konservatorischer Untersuchungen die exakten Flächenanteile und die thermischen wie auch hygri-schen Materialkennwerte einer kompletten historischen Ausstattung ermittelt und für die Bewertung der Feuchtepufferung in die Simulation mit einbezogen. Die Untersuchung des Schachenhauses ist dabei rein akademischer Natur und dient allein der Klärung des guten Erhaltungszustandes, der Ermittlung der relevanten Einflussgrößen auf das Raumklima und der Quantifizierung der unterschiedlichen Einflüsse. Dabei zeigt sich, dass das Zusammenspiel einer dichten Gebäudehülle mit feuchtepuffernden Innenraummaterialien die Grundlage für ein stabiles Raumklima bildet.

### **Neue Erkenntnisse zur Klimastabilität historischer Gebäude**

Die Bedeutung der Luftwechselrate für die Klimastabilität wurde von [Holmberg 1997], [Kippes 1999] und weiteren Autoren bereits hervorgehoben, auch die Wirkung der Feuchtepufferung ist als wichtiger Aspekt durch [Padfield 1998],

[Eckermann 2002] und andere beschrieben worden. Am Beispiel der Torhalle Lorsch wurden erstmals für ein historisches Gebäude Variantenrechnungen zu den Parametern Luftwechselrate und Diffusionsoffenheit der Oberflächen durchgeführt, um die wichtigsten Einflussgrößen auf die Klimastabilität nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit zu untersuchen. Die hohe Bedeutung des Luftwechsels für die Klimastabilität belegen die durchgeführten Simulationen erstmals quantitativ. Vor allem im Bereich geringer Luftwechselraten unterhalb  $0,5 \text{ h}^{-1}$  liegt erhebliches Potential zu Reduzierung von Feuchteschwankungen. Aufbauend auf dieser Kenntnis kann in Zukunft durch einfache, passive Maßnahmen wie das Abdichten von Fenstern und Türen oder die Schaffung geeigneter, feuchtepuffernder Massen das Raumklima in historischen Gebäuden erheblich verbessert werden.

### **Raumklima für die Präventive Konservierung**

Konservatorische Untersuchungen im Königshaus auf dem Schachen und in Schloss Linderhof belegen wiederum einen deutlichen Zusammenhang zwischen Raumklima und Erhaltung wertvoller historischer Oberflächen. Beide Gebäude wurden von König Ludwig II. erbaut, stammen somit aus der gleichen Zeit und weisen vergleichbare künstlerische Techniken und Ausstattung auf. Das für Besucher nur für vier Monate im Jahr zugängliche Königshaus auf dem Schachen ist trotz des rauen Bergklimas deutlich besser erhalten als Schloss Linderhof. Dieser Befund bestätigt die Ausgangsthese, dass ein stabiles Raumklima maßgeblichen Einfluss auf die Erhaltung der Kulturgüter besitzt. Es gilt nun diesen Befund in einem nächsten Schritt aus konservatorischer Sicht zu quantifizieren und zu bewerten und ihn schließlich mit einer breiteren wissenschaftlichen Basis zu untermauern.

## 10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur Weiterentwicklung einer Präventiven Konservierungsstrategie, die auf numerischer Simulation beruht. Die durchgeführten Untersuchungen zur Erfassung und Bewertung des Potenzials der noch relativ jungen Methode der hygrothermischen Gebäudesimulation im Bereich historischer Gebäude zeigen, dass Simulationen prinzipiell auch für den Sektor Kulturguterhaltung anwendbar sind. Diese besitzen das Potential, die Präventive Konservierung einen entscheidenden Schritt voranzubringen. Die globalen Herausforderungen wie Klimawandel, Ressourcenknappheit, Bevölkerungswachstum und Destabilisierung der Finanzsysteme erfordern verstärkt die Umsetzung der Nachhaltigkeitskriterien auch für den Erhalt des Kulturerbes – d. h. im vorliegenden Fall, dass wir Handlungsoptionen, wie wir das Kulturgut erhalten, immer mehr über Simulationen herleiten müssen, da hiermit vollkommen neue Wege für die Risikoabschätzung möglich werden und es auch finanziell nicht mehr vertretbar ist, diese Datensätze aus ins situ Untersuchungen zu generieren. Mit der Einführung der numerischen Simulation in die Präventive Konservierung wird auch ein Paradigmenwechsel eingeleitet, der in anderen Zweigen z. B. in der Klimaforschung oder Gesundheitsvorsorge schon fest etabliert ist.

Zu Beginn dieser Arbeit standen folgende Fragen: Wie funktionieren historische Gebäude klimatisch? Welches sind die relevanten Einflussgrößen und wie wirkt sich das Raumklima auf die Erhaltung von Kunstwerken aus? Als Methode zur Untersuchung dieser Fragen dient die Analyse von gemessenen Klimadaten in Kombination mit Simulationen realer historischer Gebäude. Um die notwendige Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle für die Risikobetrachtung und für die Entwicklung neuer Maßnahmekonzepte zu überprüfen, wurde eine neue Methode entwickelt, um deren Güte systematisch zu bewerten.

### **Hygrothermische Simulation historischer Gebäude**

Simulationen historischer Gebäude stellen in der Regel konkrete Fallstudien dar. Für ein individuelles Gebäude sollen die Ursachen von Schäden geklärt werden oder bauliche Änderungen, die Auswirkungen auf das Raumklima haben, beurteilt werden. Diese Form der Simulation stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Eingabedaten und die Definition der Randbedingungen.



Im Rahmen dieser Arbeit wurde folgender Ablauf für die hygrothermische Simulation eines historischen Gebäudes entwickelt:

1. Definition der Ziele der Simulation  
(Analyse der Ursachen von Schadensprozessen, Vorhersage von baulichen Veränderungen oder Nutzungsänderungen, Einfluss von Technischer Gebäudeausrüstung, Auswirkungen des Klimawandel, etc.)
2. Ermittlung der relevanten Schadensprozesse und Risiken /  
Festlegung der Bewertungskriterien in Hinblick auf Schadensfunktionen
3. Festlegung und Ermittlung der relevanten Eingangsgrößen für die Simulation (thermische und hygri sche Materialkenn daten, Baukonstruktion, Nutzungsprofile, TGA, etc.), Messung von Raum- und Außenklima
4. Durchführung, Bewertung und iterative Kalibrierung des Modells mittels Sensitivitätsanalysen und Modifikation der relevanten Parameter und Validierung
5. Simulatorische Bearbeitung der Fragestellung mit dem kalibrierten / validierten Modell / Variantenbetrachtung
6. Dokumentation des Modells und der Varianten

Die Lösung dieser komplexen Aufgabe erfordert eine starke interdisziplinäre Zusammenarbeit. Die zu untersuchende Fragestellung stammt in der Regel von der Nutzerseite, welche eine Veränderung eines Gebäudes oder seiner Nutzung plant und dafür Konservatoren und Bauphysiker für die Entscheidung mit hinzuzieht. Die Ziele der Simulation, die relevanten Schadensprozesse, die betrachtet werden sollen, und die Bewertungskriterien müssen zu Beginn gemeinsam mit allen Beteiligten definiert werden. Dies kann bzw. muss in der Regel zeitlich lange vor der eigentlichen Simulation geschehen, da dabei bereits die notwendigen Daten für die Kalibrierung und Validierung des Modells festgelegt werden.

Für die spätere Kalibrierung des Modells sollten das Raum- und das Außenklima, aber auch weitere relevante Randbedingungen der Nutzung des Gebäudes, wie das Öffnen von Türen und Fenstern, Verschattung, der Betrieb von Heizungsanlagen oder Klimatechnik, Besucherzahlen, etc. zumindest für den Zeitraum eines Jahres vor Ort detailliert erfasst, gemessen und dokumentiert werden. Auch besondere Mikroklimata, bspw. in der Nähe von Kunstwerken oder an Bauteiloberflächen, die in der Simulation mit betrachtet werden sollen, müssen dabei mit berücksichtigt werden.

Aus den anfangs definierten Zielen und Schadensfunktionen leiten sich die relevanten Eingabe-Parameter für die Simulation ab, die in der Gebäudeaufnahme bestimmt werden müssen, insbesondere die thermischen und hygri schen Kennwerte sowie die Flächenanteile der Innenraummaterialien. Diese Parameter

müssen später auch bei der Kalibrierung der Simulation berücksichtigt werden und bei Variationsrechnungen in einem realistischen Rahmen liegen. Sensitivitätsanalysen dienen der Abschätzung der Bedeutung unbekannter oder unsicherer Parameter für die Kalibrierung des Modells.

Da es sich meist um wenig dichte und unklimateisierte Gebäude handelt, wird das Raumklima über den Jahreslauf in der Regel maßgeblich durch das Außenklima bestimmt. Temperatur und absolute Luftfeuchte folgen den Außenbedingungen in gedämpfter Form. Werden interne Quellen und Senken von Temperatur und Feuchte, wie Besucher, Baufeuchte oder TGA, bei der Betrachtung ausgeklammert, so sind die beiden Faktoren, die den höchsten Einfluss auf diese Dämpfung und damit auf die Klimastabilität haben, die Luftwechselrate und die thermische und hygrische Trägheit des Gebäudes.

Für die Simulation bedeutet das einen hohen Anspruch an die Messung des Außenklimas. Die Wetterdaten sollten direkt vor Ort mit möglichst präziser Messtechnik und unter standardisierten Bedingungen erfasst werden. Die Nutzung von Wetterdaten aus weiter entfernten Standorten führt zu erheblichen Unsicherheiten im Modell. Auch die Raumklimadaten sollten für die korrekte Kalibrierung mit einem hohen Anspruch an Genauigkeit erfasst werden, sowie die Baukonstruktion und die Innenraum-Materialien quantitativ in ihren Flächenanteilen und mit ihren hygrischen und thermischen Kennwerten. Gerade im Bereich historischer Gebäude sind solche Materialkenndaten kaum verfügbar, denn bis dato wurden kaum Messungen zu den bauphysikalischen Eigenschaften und deren Streuung durchgeführt. Eine detaillierte Erfassung der Daten erfordert zudem eine genaue Kenntnis der Kunstmaterialien und der historischen Techniken.

Insgesamt ist ein Gebäudesimulationsmodell ein System von verschiedenen Parametern mit unterschiedlichem Einfluss auf das Ergebnis der Simulation. Abhängig von den Gegebenheiten und den wichtigsten Einflussfaktoren auf das Raumklima müssen diese relevanten Parameter identifiziert und möglichst realitätsnah angepasst werden.

Für die Kalibrierung des rechnerischen Modells werden neben der thermischen Masse insbesondere die Luftwechselrate und die Parameter der Feuchtespeicherfunktion sowie der Wasserdampfdiffusionswiderstand variiert, da diese den höchsten Einfluss auf den Verlauf der relativen Luftfeuchte eines Raumes haben. Für Schloss Linderhof überwiegt beispielsweise der Einfluss der Besucher als Feuchtequellen und des Luftwechsels gegenüber der Feuchtepufferung der inneren Oberflächen, während diese beim Königshaus auf dem Schachen einen erheblich höheren Einfluss auf das Raumklima und damit auf das Ergebnis der Simulation hat. Es ist darauf zu achten, dass die relevanten Einflüsse für das je-

weilige Gebäude berücksichtigt werden. Auch dürfen keine künstlichen Effekte geschaffen werden, z. B. durch unrealistische Überhöhung der Besucherzahlen bei der Kalibrierung des Modells.

Die Validierung des Modells muss mit einem zweiten, unabhängigen Datensatz erfolgen, der gesondert erhoben wurde. Erst die Validierung zeigt, ob die Kalibrierung erfolgreich und realitätsnah war. Am Ende steht die Möglichkeit, mit dem kalibrierten und idealerweise validierten Modell Variantenrechnungen durchzuführen, um die Antworten auf die zu Beginn des Prozesses aufgeworfenen Fragestellungen zu ermitteln.

### **Bewertung der Güte hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung**

Alle Simulationen stellen wegen der notwendigen Einschränkungen der Modelle immer nur eine näherungsweise Abbildung der Realität dar. So bildet auch die hygrothermische Gebäudesimulation nie vollständig die Realität ab, liefert aber ein Bild, das tendenziell die Auswirkung möglicher Maßnahmen erkennbar macht.

Beim Vergleich von Simulation und Messung wird deutlich, dass nicht jeder Tag detailliert richtig dargestellt werden kann. Es ist vielmehr wichtig, die Charakteristik des Innenraumklimas zu begreifen, nachzubilden und zu vergleichen. Gerade diese Bewertung der Charakteristik des Innenraumklimas muss durch Experten erfolgen, die sowohl die Qualität der Simulationen einschätzen können, gleichzeitig aber ein fundiertes Wissen zu Schadensmechanismen und historischen Materialien besitzen.

Um verlässliche Ergebnisse aus einer Raumklimasimulation zu gewinnen, ist es unabdingbar, Kriterien für die Genauigkeit zu definieren. Dazu muss fallbezogen die Festlegung der relevanten Vergleichsparameter für die Datensätze von Messung und Simulation in Bezug auf die statistischen Kennwerte und Schadensfunktionen erfolgen und die Festlegung der jeweiligen quantitativen Kriterien für diese Vergleichsparameter.

Aus Sicht der Präventiven Konservierung hängt die Qualität und damit der Nutzen hygrothermischer Simulationen stark von deren Genauigkeit in der Abbildung des realen Gebäudes ab. Da insbesondere Extremereignisse zu Schäden führen können – hohe Feuchte über eine längere Zeit, extrem geringe Feuchtwerte, Frost und hohe Materialfeuchte oder starke Schwankungen der relativen Luftfeuchte – ist deren korrekte Abbildung notwendig. Einen zweiten Aspekt bilden kurz- und mittelfristige Schwankungen des Klimas und deren Niveau, da diese die Voraussetzung für das Fortschreiten von Schäden in Folge

von Wechselbeanspruchungen sind wie Frost/Tauwechsel, Quellen und Schwinden oder Kristallisationswechsel von Salzen.

Der Prozess zur Bewertung erfolgt hier grundsätzlich in zwei Stufen:

1. Statistische Bewertung der Güte der Abbildung der Realität durch die Simulation / Prüfung der Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten
  - a. Bewertung der Lageparameter
  - b. Bewertung der Dynamik des Raumklimas
2. Bewertung der korrekten Abbildung der relevanten Schadensfunktionen oder weiteren Fragestellungen durch das Modell

Die Bewertung der Lageparameter und der Dynamik des Raumklimas erfolgt auf der Basis von Kriterien, die sich an den derzeitigen Möglichkeiten der hygrothermischen Gebäudesimulation orientieren und im jeweiligen Fall ggf. individuell angepasst werden müssen.

Die Bewertung bezieht sich zum einen auf allgemeine statistische Lageparameter wie Median, Spannweite der Daten sowie die Maxima und Minima, die zeigen, wie gut die Gesamtheit der Daten durch die Simulation dargestellt ist, zum anderen ist eine fallbezogene, individuelle Betrachtung notwendig, die sich an den vorliegenden Schäden und Schadensprozessen orientiert. Dabei müssen die Schadensfunktionen in Abhängigkeit von deren Schadenswirkung und Häufigkeit abgebildet werden. Als eine anschauliche und einfache Bewertung der Güte der Vorhersage von Ereignissen wurde eine Vorhersagequote gewählt, die die Häufigkeit von Ereignissen in Simulation und Messung prozentual beschreibt.

An Hand von Fallstudien werden konkrete Bewertungskriterien entwickelt und die Anwendbarkeit der neuen Methode zur Bewertung von Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung aufgezeigt. Die Fallstudien liefern darüber hinaus neue Erkenntnisse zur Klimastabilität historischer Bauten.

### **Königshaus auf dem Schachen**

Die Untersuchungen im Königshaus auf dem Schachen zeigen, dass ein stabiles Raumklima entscheidend zur Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung historischer Gebäude beiträgt. Trotz des extremen Bergklimas verfügt das Gebäude über ein relativ stabiles Raumklima innerhalb bestimmter Grenzen und es treten nur wenige klimatisch bedingte Schäden auf. Dies ist zum einen dem ge-

ringen Luftwechsel infolge einer dichten Gebäudehülle aufgrund der Haus-in-Haus Konstruktion geschuldet, zum anderen durch die Feuchtespeicherung der Materialien der Innenausstattung. Durch die Simulationen konnte gezeigt werden, dass die feuchtepuffernden Materialien einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität des Raumklimas haben. Die durchgeführte Materialkenndatenerfassung ist ein weiterer Schritt zur Bestimmung des feuchtetechnischen Verhaltens historischer Baustoffe. Vor allem die textilen Materialien und die Holzoberflächen der Ausstattung wirken sich puffernd auf Feuchtespitzen und Minimalfeuchten aus.

Die genaue Erfassung aller Eingabeparameter ist dabei die Voraussetzung dafür, dass Simulationsergebnisse und Messwerte hinreichend gut übereinstimmen. Für die Bewertung wurden die allgemeinen Lageparameter sowie die tägliche Schwankungsbreite als Indikatoren für mechanische Belastungen der Ausstattung des Türkischen Saals im Schachenhaus verwendet. Die Kalibrierung und die Validierung der verschiedenen Simulationen des Königshaus auf dem Schachen haben gezeigt, wie wichtig eine exakte Messung der Randbedingungen für die Erstellung eines realitätsnahen Modells ist. Durch die Verwendung von Wetterdaten weiter entfernter Stationen ergaben sich erhebliche Unsicherheiten im Modell. Dies ist insbesondere wichtig für die Simulation und Vorhersage der Auswirkungen von Änderungen der Wetterbedingungen, beispielsweise infolge des globalen Klimawandels. Nur ein kalibriertes und validiertes Modell mit präzise erhobenen Raumklima- und Wetterdaten kann für Vorhersagen des Klimawandels genaue Ergebnisse liefern.

### **Schloss Linderhof**

Das Paradeschlafzimmer in Schloss Linderhof wurde als komplexer historischer Raum mit zahlreichen Randbedingungen erfolgreich simuliert, wie die Bewertung zeigt. Dazu erfolgte die Erfassung der Baukonstruktion, die Erhebung der Klimadaten, die Ermittlung der Nutzerprofile als Feuchte- und Wärmequelle sowie Untersuchungen zum Luftwechsel. Der tatsächliche Luftwechsel wird durch das Gebäude, sowie durch die Gebäudenutzung bzw. das Lüftungsverhalten der Nutzer bestimmt. Zur Ermittlung der Luftwechselraten wurden zwei Messkampagnen mit einer passiven Spurengasmethode durchgeführt. Das Ergebnis zeigt trotz intensivem Lüftens im Sommer einen für historische Gebäude relativ geringen Luftwechsel zwischen  $0,1$  und  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Zusätzlich wurden weitergehende Untersuchungen anhand der Simulation durchgeführt, die zeigen dass die Besucher sowohl direkt, als Quellen von Temperatur und Feuchte, als auch indirekt wegen vermehrtem Lüftungsbedarf einen erheblichen Einfluss auf das Raumklima haben. Anhand des kalibrierten Modells wurde für Schloss Linderhof ein Klimakonzept erstellt, das über geregelte Belüftung und Entfeuch-

tung die Bedingungen für die wertvolle Ausstattung und die Besucher gleichermaßen verbessert.

### **Torhalle Lorsch**

Das Beispiel der Torhalle Lorsch zeigt die Möglichkeiten auf, die ein kalibriertes Simulationsmodell für die Planung von Maßnahmen in Hinblick auf die Präventive Konservierung wie auch auf andere Aspekte, wie den Energiebedarf, bringt. In Hinblick auf die generelle Abbildung der Realität stößt das Modell durch verschiedene Unsicherheiten, vor allem was die Nutzung und Lüftung angeht, an seine Grenzen, erfüllt aber die aufgestellten Kriterien mit Ausnahme des mittleren Bereichs der relativen Luftfeuchte gut bis sehr gut. Die Abbildung der relevanten Schadensfunktion ist hinreichend genau, um entsprechende Aussagen in den Variantenrechnungen möglich zu machen.

### **Fazit**

Generell konnte gezeigt werden, dass Simulationen dazu eingesetzt werden können, Prognosen über die Wirkung verschiedener Maßnahmen zu erstellen und um neue Erkenntnisse über die verschiedenen Einflüsse auf das Raumklima zu gewinnen. Mit einem kalibrierten Modell können Varianten gerechnet werden, beispielsweise zu Klimatisierung, Besucherströmen oder möglichen Folgen des globalen Klimawandels.

Das Raumklima historischer Gebäude wird durch zahlreiche Faktoren bestimmt. Von zentraler Bedeutung ist dabei der Luftwechsel. Messungen zeigen, dass historische Gebäude oft einen geringeren Luftwechsel als generell angenommen aufweisen. Eine Erhöhung der Luftdichtigkeit führt als passive Maßnahme zu einer Reduzierung des Einflusses des Außenklimas und damit auch zu einer Reduzierung von kurzzeitigen Schwankungen. Dies ist jedoch nur dann zulässig, wenn keine größeren, internen Feuchtelasten vorhanden sind. Die Simulation einer Abdichtung der Fenster in Linderhof zeigt, dass in der Folge die Feuchte durch die Besuchermassen stark ansteigen würde. In einem solchen Fall muss durch Klimatechnik gegengesteuert werden.

Der zweite wichtige Aspekt für die Stabilität des Raumklimas ist die Eigenschaft von Innenraummaterialien, Feuchtespitzen abzupuffern. Durch Aufnahme und Abgabe von Feuchte (Sorptions) tragen sie zu einer Reduzierung von kurzzeitigen Schwankungen erheblich mit bei, wie die Untersuchungen am Schachenhäuserhaus deutlich zeigen. Dort sind es vor allem die Textilien und Hölzer im Türkischen Saal, die Feuchte speichern. Diese Erkenntnisse können in Zukunft beispielsweise für den Museumsbau genutzt werden, aber auch für Wohngebäu-

de, wo immer mehr Wert auf ein gesundes und angenehmes Raumklima gelegt wird.

Alle Maßnahmen, die auf eine Verbesserung der Umgebungsbedingungen von Kunstwerken zielen, können unter dem Begriff der Präventiven Konservierung zusammengefasst werden. Für die Präventive Konservierung ist es in Hinblick auf das Raumklima notwendig, Extremwerte zu vermeiden und vor allem starke Schwankungen zu reduzieren. Eine allgemein gültige Aussage ist, dass Kunstwerke in ihrer Umgebung optimal erhalten bleiben, wenn das Klima möglichst konstant ist. Die entscheidende Frage ist jedoch, wie stark klimatische Schwankungen wirklich eingeschränkt werden müssen und wo genau die Grenze liegt, die eine schadensfreie, dauerhafte Erhaltung mit einem vertretbaren Einsatz von Ressourcen ermöglicht. Das Wissen über die Klimawirkungen ist immer noch sehr beschränkt. Eine Vertiefung der Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Raumklima und Schäden an Kunstwerken erscheint daher notwendig. Auch die bisher für Museen geforderten, extrem engen Klimabänder sind derzeit weltweit auf dem Prüfstand. Für historische Gebäude sind diese generell nicht anwendbar, dennoch ist eine solide wissenschaftliche Basis für die Festlegung von Zielwerten zwingend notwendig.

In Schloss Linderhof steht in den nächsten Jahren die Restaurierung der Prunkräume an. Die Verbesserung des Raumklimas ist eine entscheidende Grundlage für die Erhaltung der wertvollen Raumausstattung. Ressourcenschonenden Maßnahmen und Lösungen wie feuchtegesteuerte Temperierung, dezentraler Entfeuchtung oder geregelter Lüftung wird heute bei der Klimatisierung oft der Vorzug gegenüber Vollklimaanlagen gegeben. Letztere kommen für historische Bauwerke wegen der meist extremen Eingriffe in die originale Bausubstanz und nicht zuletzt wegen des hohen Energieverbrauchs auch aus finanziellen Gründen oft nicht in Frage. Gerade für derartige Maßnahmen sind messtechnische Untersuchungen in Verbindung mit rechnerischer Simulation zur Beurteilung der klimarelevanten Auswirkungen ein wesentliches und Schaden vermeidendes Hilfsmittel.

# 11      Ausblick

## **Hygrothermische Simulation historischer Gebäude**

Hygrothermische Simulationen realer Gebäude bedeuten heute einen erheblichen Zeitaufwand, vor allem in Bezug auf die Erhebung aller relevanten Daten, Aufbauten und Materialien. Auch bestehen bei gealterten und inhomogenen Materialzusammenstellungen und Baukonstruktionen große Unsicherheiten bei den bauphysikalischen Kenngrößen. Ziel weiterer Forschungen muss es sein, die Datenbasis zu historischen Materialien und Baukonstruktionen zu erweitern. Die hygrischen und thermischen Kenngrößen müssen bestimmt und der Einfluss von Alterung oder unterschiedlichen Techniken untersucht werden. Vor allem für Kunstmaterialien stehen bisher kaum nutzbare Daten zur Verfügung.

Darüber hinaus müssen auch Methoden einer weiterführenden indirekten und zerstörungsfreien Analyse des hygrothermischen Verhaltens der Räume oder Gebäude entwickelt werden. Dazu gehören experimentelle Methoden, aber auch Klimaanalysen mit dem Ziel der Ableitung der relevanten hygrischen und thermischen Kenngrößen. Ein derartiges Verfahren ist auch im Bereich des Neubaus sinnvoll anwendbar, beispielsweise im Kontext der Simulation von Nutzungsänderung oder zur Auslegung klimatechnischer Anlagen. Letztendlich stellt die profunde Kenntnis des hygrothermischen Verhaltens von Räumen auch die Basis für jegliche vorausschauende Steuer- und Regeltechnik dar.

Im Laufe der Arbeit hat sich die interzonale Luftströmung zwischen den Räumen als wichtige Einflussgröße für die Simulationsmodelle erwiesen. Hierzu und zur Erfassung von Strömungsmustern in historischen Gebäuden ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

Die Grenzen und Unsicherheiten in der Simulation legen nahe, bei der Risikobewertung und Ergebnisbewertung generell in Richtung eines probabilistischen Ansatzes weiter zu forschen, der eine Wahrscheinlichkeitsdichte für das Ergebnis einer Simulation angibt anstatt eines deterministischen Ergebnisses, das nur mit der Kenntnis aller Unwägbarkeiten vernünftig interpretiert werden kann. Dies ist vor allem bei Simulationen, die die möglichen Auswirkungen des globalen Klimawandels betreffen, essentiell, da hier neben den Unsicherheiten in den meteorologischen und physikalischen Vorhersagemodellen auch noch die unterschiedlichen Szenarien in die Gleichung mit einfließen.



## **Entwicklung von Bewertungskriterien**

Die in dieser Arbeit aufgestellten Bewertungskriterien ermöglichen eine grundlegende Analyse und zeigen erstmals eine systematische Herangehensweise an die Bewertung der Güte hygrothermischer Simulationen auf. Mit den vorliegenden Methoden können bisher allgemeine Lageparameter, die allgemeine Dynamik des Raumklimas und Schadensfunktionen bewertet werden. Als komplexere statistische Methode wurden bisher nur die Hypothesen Tests nach Ferro angewendet, die aber nicht die gewünschte Genauigkeit bei der Bewertung lieferten.

Bei der Betrachtung der Schwankungsbreite von Temperatur und relativer Luftfeuchte ist nicht nur die Spannweite wichtig, sondern auch die Lage der Schwankungen im Datenbereich. Um diesen Parameter mit zu betrachten sind weitere Methoden zu definieren. Zeitreihen- oder Frequenzanalysen stellen eine Möglichkeit zur Betrachtung der Amplitude und Frequenz der Änderungen von relativer Feuchte und Temperatur dar, die vorgestellte Methode in Zukunft zu erweitern und im Detailgrad der Bewertung zu erhöhen.

Die größte Hürde aus Sicht der Präventiven Konservierung stellen die weitestgehend fehlenden quantifizierbaren Schadensfunktionen und deren Korrelation zum jeweiligen historischen Gebäuden und/oder zu den Kunsttechniken dar.

## **Klimastabilität historischer Gebäude**

Aufbauend auf den Erkenntnissen zu verschiedenen Einflussgrößen auf das Raumklima historischer Gebäude muss die Entwicklung von minimalinvasiven, dezentralen oder passiven Lösungen zur Klimastabilisierung vorangetrieben werden. Vor allem die Erweiterung der Erkenntnisse zur Feuchtepufferung und deren Wechselbeziehung zum Infiltrationsluftwechsel kann bei der Entwicklung passiver Klimakonzepte Fortschritte bringen.

Sensitivitätsanalysen können in der Simulation den Einfluss bestimmter Parameter auf das Raumklima offenlegen. Da sich alle Parameter gegenseitig bedingen, muss der nächste Schritt eine umfassende Untersuchung an unterschiedlichen Baukonstruktionen darstellen, die die entsprechenden Parameter gegeneinander in Kombination prüft. Weiterer Klärungsbedarf besteht vor allem noch bei der Bewertung des Einflusses der Luftwechselrate auf die Klimastabilität historischer Gebäude wie auch bei Messmethoden, die die interzonalen Luftströme in komplexeren Raumfolgen zuverlässig über längere Zeiträume erfassen können.

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass zur Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels hochgenau kalibrierte Modelle notwendig sind, da schon geringe Unsicherheiten bei den Eingabedaten zu massiven Fehlinterpretationen führen können. Für die Betrachtung der zukünftigen Risiken ist dazu eine breit angelegte Analyse historischer Gebäude in mehreren Klimazonen notwendig.

Die wirtschaftliche Betrachtung des Nutzens einer Verbesserung des Raumklimas für die Erhaltung ist wichtig, gerade in Abgrenzung zu anderen Schadensprozessen wie Abnutzung durch Besucher oder Schäden durch Katastrophen oder eine defekte Gebäudehülle. Eine Möglichkeit stellt die Entwicklung robuster Minimalkonzepte dar, die wenig wartungsaufwendig und ohne größeren Eingriff in die Bausubstanz funktionieren. Die Grundlage für die Dimensionierung solcher reduzierter Konzepte bildet die genaue Kenntnis der sicheren Bereiche und der Risiken für Ausstattung und Kunstwerke in historischen Räumen.

### **Raumklima für die Präventive Konservierung**

Um die Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Raumklima und der Erhaltung von Kunstwerken voran zu bringen, ist eine breit angelegte Analyse von realen Kunstwerken durch Restauratoren/Konservatoren notwendig. Dazu müssen einerseits Laboruntersuchungen durchgeführt werden, auf der anderen Seite aber auch konservatorische Untersuchungen an den Gebäuden und Kunstwerken vor Ort. In einem sogenannten retrospektiven Ansatz wird der Erhaltungszustand von Kunstwerken und Ausstattung im Kontext des jeweiligen „historischen“ Klimas betrachtet und daraus Erkenntnisse abgeleitet, wie Erhaltung, Material, Technik und Klima zusammenhängen, um die tatsächlichen Risikobereiche zu ermitteln. Gerade die Königsschlösser Ludwig II. bieten hier große Chancen, da sie zum einen erst seit 125 Jahren öffentlich zugänglich sind, zum anderen aber auch eine Vielzahl unterschiedlicher, traditioneller Materialien und Kunsttechniken beherbergen, die Großteils noch keine Restaurierung erfahren haben, sodass Rückschlüsse von festgestellten Schäden auf bisherige Klimaereignisse gezogen werden können.

Die Schaffung der Datengrundlage auf konservatorischer Seite muss dabei Datensätze zu Mikroklima an den Kunstwerken, deren Techniken und deren Erhaltung über einen längeren Zeitraum von Jahren oder Jahrzehnten umfassen und eine repräsentative Auswahl von Kunsttechniken verschiedenen Alters und Erhaltungszustandes beinhalten. Bisher wird der Fokus in diesem Feld hauptsächlich auf die relative Luftfeuchte gelegt. Neuere Untersuchungen zeigen aber, dass auch die schädliche Wirkung niedriger Temperaturen mit berücksichtigt

werden müssen, die gerade in gemäßigten und kalten klimatische Regionen in unklimateisierten historischen Gebäuden eine wichtige Rolle spielen können.

Laborversuche und Simulationen können hilfreiche Einschätzungen liefern, stoßen aber meist an ihre Grenzen, wenn es um die Definition von Schäden geht und um ihre Übertragbarkeit aus einem begrenzten experimentellen Kontext auf die Realität einer unendlichen Zahl unterschiedlich gealterter Kunsttechniken und Materialien in Sammlungen, Museen und historischen Gebäuden.

Ein erster Schritt in diese Richtung ist die Zusammenfassung und Bewertung der vorliegenden Schadensfunktionen. Auf der Basis des Stand des Wissens kann die Definition und Entwicklung neuer Schadensfunktionen vorangetrieben werden, bei der die Modellbildung durch numerische Simulation, Experimente und Beobachtungen an realen Werken in realen Umgebungsbedingungen gleichwertig nebeneinander stehen sollten.

## Literaturverzeichnis

ASHRAE (2007). 2007 ASHRAE Handbook-HVAC Applications (SI).

Allegretti, O.; Raffaelli, F. (2008): Barrier Effect to water vapour of early European materials on wood panels. In: *Studies in Conservation* 53, S. 187–197.

Ashley-Smith, J. (1999): Risk assessment for object conservation. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann.

Ashley-Smith, J.; Umney, N.; Ford, D. (1994): Let's be honest - realistic environment parameters for loan objects. In: Roy, A. (Hg.): Preventive Conservation. Practice, theory and research. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Ottawa Congress. Preventive conservation: practice, theory and research. Ottawa, 12-16-September. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London (United Kingdom), S. 28–31.

BayDSchG (2003): Bayerisches Denkmalschutzgesetz – : Gesetz zum Schutz und zur Pflege der Denkmäler. BayRS 2242-1-WFK, GVBl, Stand 24. Juli 2003.

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.) (2002): Vorsorge, Wartung und Pflege, Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung. *Denkmalpflege Informationen*. München.

Bichlmair, S. (2010): Erfassung der Raumklimadaten mit Teilauswertung und Darstellung der Baukonstruktion am Schloss Linderhof. Projektarbeit Masterstudium, unveröffentlicht. Hochschule Rosenheim. Rosenheim.

Bichlmair, S. (2011a): Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof. Masterarbeit, unveröffentlicht. Hochschule Rosenheim. Rosenheim.

Bichlmair, S.; Kilian, R. (2012): A new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings. Proceedings of the Climate for Collections Conference, November 2012, München.

Bichlmair, S.; Kilian, R.; Krus, M. (2011b): Klimastabilität historischer Gebäude. Schloss Linderhof. IBP-Bericht RK 013\_3/2011/294. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Holzkirchen.

Blades, N.; Rice, K. (2011): Conservation Heating and Energy Efficiency at the National Trust: Theory and Practice. In: Ralf Kilian, Tomáš Vyhlídal und Tor Broström (Hg.): Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of Historic Buildings - State of the Art". Schloss Linderhof, 2. Dezember 2010. Stuttgart: Fraunhofer IRB.

Böttger, K. G. (1997): Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputz: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze. Dissertation. Berlin: Logos.

Bratsz, Ł. (2010): Acceptable and non-acceptable microclimate variability: the case of wood. In: Dario Camuffo, Vasco Fassina und John Havermans (Hg.): Basic Environmental Mechanisms affecting Cultural Heritage. Understanding deterioration mechanisms for conservation purposes. COST Action D42 "Chemical Interactions between Cultural Artefacts and Indoor Environment". Florenz: Nardini Editore, S. 49–58.

Bratsz, Ł.; Kozłowski, R.; Lasyk, Ł.; Łukomski, M.; Rachwał, B. (2011): Allowable microclimatic variations for painted wood: Numerical modelling and direct tracing of the fatigue damage. In: ICOM Committee for Conservation (Hg.): Preventive Conservation. Lissabon, S. 1–7.

Broström, T.; Leijonhufvud, G. (2010): The Indoor Climate in Skokloster Castle. In: Del Curto, D. (Hg.), Historical buildings as museums. Systems for climate control and heritage preservation, Nardini Editore, Firenze.

Brown, J. (1994): Hygrometric measurement in museums: calibration, accuracy and the specification of relative humidity. In Roy, Ashok UND Smith, Perry (Hg.): Preventive Conservation Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12–16 September 1994. London, S. 39-43.

Burmester, A. (2000): Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und -sanierung: Oder welche klimawerte sind die richtigen? In: Fachinstitut für Gebäude-Klima e. V (Hg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden. Raumklima in Museen und historischen Gebäuden. Bietigheim-Bissingen. Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., S. 9–24.

Camuffo, D.; Bernardi, A.; Sturaro, G. (2002): The microclimate inside the Polaiolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence. In: *Journal of Cultural Heritage* (3), S. 155–161.

Deutscher Museumsbund e.V. (2006): Standards für Museen. ICOM Deutschland. Berlin.

DIN ISO 12571, 2000: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten : Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.

DIN ISO 12572, 2001: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten : Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.

DIN EN 13779, 2007: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme.

DIN ISO 16000-8, 2008: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen.

DIN EN 15757, 2010-12: Erhaltung des kulturellen Erbes - Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien; Deutsche Fassung EN 15757:2010.

Eckermann, W. (2002): Eigenklima und Feuchtedämpfung in historischen Gebäuden. In: Venzmer, H. (Hg.): Qualität und Qualitätsbewertung in der Bauwerkssanierung. Vorträge 13. Hanseatische Sanierungstage im November 2002 in Rostock-Warnemünde. Berlin: Verl. Bauwesen.

UNI 10829:1999, 21.06.1999: Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi.

Erhardt, D.; Tumosa, C.; Mecklenburg, M. (2007): Applying science to the question of museum climate. In: Padfield, T. und Borchersen, K. (Hg.): Museum Microclimates - Contributions to the Copenhagen conference, S. 11–15.

Exner, M. (2005): Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes ; eine Tagung des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS in Zusammenarbeit mit dem Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Insel Reichenau, 25.-27. November 2004. München [u. a.]: Dt. Kunstverlag.

Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. (2010): Statistik – Der Weg zur Datenanalyse. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Ferro, C. A. T.; Hannachi, A.; Stephenson, D. B. (2005): Simple nonparametric techniques for exploring changing probability distributions of weather. In: *Journal of Climate* (18), S. 4344–4354.

Fiedler, K. (1995): Hygiene, Präventivmedizin, Umweltmedizin systematisch. Lorch: Uni-Med-Verlag.

Garrecht, H.; Reeb, S.; Glaser, W.; Hassler, U. (2010): 3D Microscopy for Monitoring Dynamic Environmental Impacts on Painted Wood. COST Action IE0601 Allowable microclimatic variations for polychrome wood. Intern. Workshop Oslo, 18. Februar 2010.

Hessisches Landesmuseum; Jülich, T. (1993): Kloster Lorsch : Berichtsband zum interdisziplinären Symposium am 12. und 13. November 1991 im Hessischen Landesmuseum Darmstadt. Darmstadt (Kunst in Hessen und am Mittelrhein, 3233).

Hilbert, G. S. (2002): Sammlungsgut in Sicherheit - Schadstoffprävention, Schädlingsbekämpfung, Sicherheitstechnik, Brandschutz, Gefahrenmanagement, Beleuchtungs- und Lichtschutz, Klimatisierung. Berlin: Gebrüder Mann Verlag.

Holl, K. (2008): Der Türkische Saal im Königshaus am Schachen. Die Erhaltung der Ausstattung in Hinblick auf das Raumklima. Diplomarbeit, unveröffentlicht. Technische Universität München, München.

Holl, K.; Kilian, R.; Krus, M.; Sedlbauer, K. (2010): Bewertung der Klimastabilität aus restauratorischer und bauphysikalischer Sicht am Beispiel des Königshauses am Schachen. In: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken. Tagung zur Vorstellung des Merkblatt-Gelbdruckes der Arbeitsgruppe 6.11 - Klima und Klimastabilität in historischen Räumen Teil 1 - Einführung, WTA Publications, Pfaffenhofen, S. 49-58.

Holm, A.; Krus, M.; Künzel, H. M. (2002a): Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbar Kennwerten (IBP-Mitteilung, 406).

Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H. (2002b): Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen - Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte. In: Roloff, P. und Häupl, J. (Hg.): Tagungsband des 11. Bauklimatischen Symposiums. Dresden: Eigenverlag der TU Dresden, S. 562–575.

Holm, A.; Krus, M.; Künzel, H. M.; Sedlbauer, K. (2006): Entwicklung der hygrothermischen Simulation im Bauwesen am Beispiel der Softwarefamilie WUFI®. In: *wksb* (55).

Holmberg, J. G. (1995): Relative Humidity, RH, in historic houses, museums and museum storage rooms, a literature study. EURO CARE, EU 140, Eureka Project EU 1383 PREVENT, Preventive Conservation, Report No.1 from Swedish Partners. Stockholm.

Holmberg, J. G. (1997): Technical Classification of Museum Buildings, ICOM-ICAMT 1989. EURO CARE, EU 140, Eureka Project EU 1383 PREVENT, Preventive Conservation, Report No.7 from Swedish Partners,. Stockholm.

Holmberg, J. G. (2001): Environment Control in historical buildings. In: Royal Institute of technology building services engineering (Hg.): Bulletin No. 53. Stockholm.

Holmberg, J. G.; Kylsberg, B.; Skeri, K. (2011): Damage assessment of objects of art correlated to local outdoor climate during 300 years. In: Kilian, Ralf; Vyhliđal, Tomáš und Broström, Tor (Hg.): Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of Historic Buildings - State of the Art". Schloss Linderhof, 2. Dezember 2010. Stuttgart: Fraunhofer IRB.

Holmberg, J.; Stymne, H.; Boman, C.; Aström, G. (1999): Measurement of ventilation, air distribution and inter-zonal air flows in a 4-storey historic building, using a passive tracer gas technique. In: Air Infiltration and Ventilation Centre (Hg.): AIVC 20th Conference in partnership with Indoor Air '99. Proceedings from the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Edinburgh. BRE. Coventry (Volume 4).

International Energy Agency (Hg.) (2008): Annex 41. Whole Building Heat, Air, Moisture Response. Closing Seminar. Nordic Building Conference, Copenha-

gen, June 19, 2008. Executive committee on Energy Conservation in Buildings and Community Systems. Copenhagen.

Kiebl, K.; Holz, D. (1995): Klimaabhängige Belüftungssteuerung und einjährige Feuchtekontroll-Untersuchungen im Obergeschoß der Torhalle Lorsch. IBP-Bericht FB-64/1995. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Holzkirchen.

Kiebl, K.; Reiß, J. (1986): Feuchtetechnische Untersuchungen an Außenwänden der Torhalle Lorsch. IBP-Bericht FtB-1/1986. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Holzkirchen.

Kilian, R. (2004): Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim. Auswirkungen auf das Raumklima. München: Siegl.

Kilian, R. (2007a): Statistische Untersuchungen der Klimaschwankungsbreite in unterschiedlich genutzten Kirchenbauten. In: Gänsmantel, J. und Hecht, C. (Hg.): WTA-Almanach 2007, Bauinstandsetzen und Bauphysik. München.

Kilian, R. (2007b): Umgang mit Klimadaten im Vergleich zwischen Museen und Denkmalpflege. In: Jeberin, A. (Hg.): Preventive Conservation - Von der ‚Passiven Konservierung‘ zum Risk Management‘. Erfahrungen und Konzepte zur Präventiven Konservierung in der gegenwärtigen restauratorischen Praxis. Workshop an der FHTW-Berlin. Berlin.

Kilian, R.; Kosmann, S. (2012): Torhalle Lorsch. Entwicklung eines Klimakonzeptes. IBP-Bericht RK 008/2012/294. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Holzkirchen.

Kilian, R.; Holm, A.; Radon, J. (2008): The Kings' House of Schachen - Indoor climate analysis of a cultural heritage building. In: Rode, C. (Hg.): Building Physics in Nordic Countries. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in Nordic Countries. NSB 2008. 8th Symposium on Building Physics in Nordic Countries. Copenhagen, 2008, June 16-18. Technical University of Denmark. 3 Bände. Copenhagen, S. 841–847.

Kippes, W. (1999): Raumklima in historischer Bausubstanz. Ein Beitrag zur materialwissenschaftlichen Begründung der Denkmalpflege. Dissertation, Wien.

Kotterer, M. (2004): Standardklimawerte für Museen? In: *Restauro – Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen* (2), S. 106-116.

Krus, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Krus, M.; Seidler, M.; Sedlbauer, K. (2010): Comparative evaluation of the predictions of two established mold growth models. In: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers -ASHRAE- (Hg.): Buildings XI, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI 2010. Proceedings. December 5-9, 2010, Clearwater Beach, Florida. Atlanta, GA: ASHRAE.



Krus, M.; Kilian, R.; Bichlmair, S.; Wehle, B.; Sedlbauer, K. (2012): Schadensdiagnostik und Bewertung in historischen Gebäuden. In: Fouad, Nabil A.: Bauphysik-Kalender. Schwerpunkt: Gebäudediagnostik, Ernst & Sohn, Berlin.

Künzel, H. M.; Holm, A.; Zirkelbach, D.; Karagiozis, A. N. (2005): Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. In: *Solar energy* (78), S. 554–561.

Künzel, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik der Universität Stuttgart. Stuttgart.

Künzel, H.; Holz, D. (1991): Bauphysikalische Untersuchungen in beheizten und unbeheizten Gebäuden alter Bauart. Bauphysikalische Grundlagen und generelle Zusammenhänge über die Temperatur- und Feuchtverhältnisse auf Grund von Langzeituntersuchungen. Fraunhofer IBP (IBP-Bericht FB-32/1991), Holzkirchen.

Larsen, P. K.; Broström, T. (2011): Climate Control in Cultural Heritage Buildings in Denmark. In: Kilian, R.; Vyhldal, T. und Broström, T. (Hg.): Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of Historic Buildings - State of the Art". Schloss Linderhof, 2. Dezember 2010. Stuttgart: Fraunhofer IRB, S. 39–44.

Leissner, J. und Kilian, R. (2011): Modelling climate change impact on cultural heritage – the European project Climate for Culture. In: Krüger, M.: Proceedings from EWCHP–2011 European Workshop and Training Day on Cultural Heritage Preservation, Berlin, Germany, September 26 to 28, 2011. Berlin.

Mecklenburg, M. (2010a): Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in Museums and Galleries. Part 1 Structural response to relative humidity, Online: [www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part1-RH.pdf](http://www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part1-RH.pdf), zuletzt geprüft am 20. April 2012.

Mecklenburg, M. (2010b): Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in Museums and Galleries. Part 2 Structural response to temperature, Online unter: [www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part2-Temp.pdf](http://www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part2-Temp.pdf), zuletzt geprüft am 20. April 2012.

Mecklenburg, M.; Tumosa C.; Erhardt D. (1998): Structural Response of Painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity. In: Dorge, V. und Howlett, F. C. (Hg.): Painted wood. History & conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute, S. 464–483.

Michalski, S. (1993): Relative Humidity: a discussion of correct/incorrect values. In: ICOM Committee for Conservation (Hg.): 10th Triennial Meeting. Preprints, Bd. 2. Washington, DC, USA. ICOM Committee for Conservation. Paris, S. 624–629.

- Nieverler, U. E. (1998): Chemisch-analytische Untersuchungen an gasförmigen und partikulären Aerosolbestandteilen im alpinen Bereich. Dissertation. Hamburg. Online verfügbar unter <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2004/44/html/index.html>.
- Oestreich, M.; Romberg, O. (2009): Keine Panik vor Statistik! Erfolg und Spaß im Horrorfach nichttechnischer Studiengänge. Wiesbaden.
- Padfield, T. (1998): The role of absorbent materials in moderating changes of relative humidity. Dissertation. Technical University of Denmark. Kopenhagen.
- Padfield, T.; Larsen, P. K. (2004): How to design a museum with a naturally stable climate. Online unter [www.conservationphysics.org/musdes/musdes.pdf](http://www.conservationphysics.org/musdes/musdes.pdf), zuletzt geprüft am 05. April 2012.
- Scharlau, K.: Die Schwüle als meßbare Größe. In: *Meteorologische Zeitschrift / Bioklimatische Beiblätter* 1943 (10), S. 19–23.
- Schefers, H.: Kloster Lorsch - Die "Königshalle". Kloster Lorsch. Online verfügbar unter <http://www.kloster-lorsch.de/kloster/bauwerk.html>, zuletzt geprüft am 28.08.2011.
- Schellen, H. L.; Neuhaus, E. (2011): Conservation Heating in a Historical Building. Results from an Experimental and Simulation Study. In: Kilian, R.; Vyhřídál, T. und Broström, T. (Hg.): Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of Historic Buildings - State of the Art". Schloss Linderhof, 2. Dezember 2010. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- Schöpfer, T. (2011): Entwicklung von Methoden zum statistischen Vergleich gemessener und simulierter Wetterdaten. Modulararbeit im Modul: „Fachwissenschaftliche Vertiefung“ im Studiengang Holztechnik Master Fakultät Holztechnik und Bau Hochschule Rosenheim, unveröffentlicht. Rosenheim.
- Sedlbauer, K. (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation. Stuttgart.
- Siegel, S.; Castellan, N. J. (1988): Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences. New York.
- Steadman, R. G. (1979): The assessment of sultriness. In: *Journal of Applied Meteorology* Volume 18, S. 861–885.
- Stoyan, D. (1993): Stochastik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin.
- Thomson, G. (1986): The Museum Environment. 2. Aufl. London.
- Toutenburg, H.; Heumann C. (2008): Deskriptive Statistik. Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS. Mit Beiträgen von Michael Schomaker und Malte Wißmann. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg.

Utz, R. (2004): Stabilisierung von Lösslehmoberflächen in archäologischen Grabungen am Beispiel der Terrakottaarmee des Qin Shihuangdi. Ludwig-Maximilians-Universität München.

VDI Richtlinien 2078, Juli 1996: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume : VDI Kühllastregeln.

Wehle, B. (2010): Simulation des Raumklimas unter Berücksichtigung der Feuchtepufferungseigenschaften des Türkischen Saales im Königshaus am Schachen. Diplomarbeit. Fachhochschule Rosenheim, Rosenheim.

Wehle, B.; Holl, K.; Kilian, R.; Krus, M. (2011): Klimastabilität historischer Gebäude. Das Königshaus auf dem Schachen. IBP-Bericht RK 013\_2/2011/294. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Holzkirchen.

Weiß, A. (2010): Durchfeuchtung mittelalterlicher Backsteinmauerwerke in Vorpommern - Alternativen zur gravimetrischen Feuchtebestimmung. In: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hg.): Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken. Tagung zur Vorstellung des Merkblatt-Gelbdruckes der Arbeitsgruppe 6.11 - Klima und Klimastabilität in historischen Räumen Teil 1 - Einführung. Köln und Dresden. Pfaffenhofen: WTA Publications, S. 33–48.

WTA 2002a: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): WTA Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für Hygrothermische Simulationsberechnungen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

WTA 2002b: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): WTA Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

WTA 2011: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): WTA Merkblatt 6-12: Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken I: Einführung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Worch, A.: Zu ausgewählten feuchtephysikalischen Eigenschaften von Ölgemälden auf Leinwand, S. 503–522. In: Gänsmantel, Jürgen und Hecht, Clemens (Hg.): WTA-Almanach 2007, Bauinstandsetzen und Bauphysik. München.

### **Online Ressourcen**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hg.): MASEA - Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung. Online verfügbar unter <http://www.masea-ensan.de/>, zuletzt geprüft am 16.01.2012.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hg.): WUFI Bio. Online verfügbar unter <http://www.wufi.de/>, zuletzt geprüft am 31.10.2012.

## Anhang A Erläuterung zu den Statistik Datenblättern

Die statistischen Ansätze sind in Kapitel 2.3 beschrieben.

Übersicht über ausgewählte Statistikdiagramme in Anhang A bis D, die dem grafischen Vergleich zwischen Messdaten und simulierten Daten dienen.

Liniendiagramm gleitendes 30 Tage Mittel	Streudiagramm (siehe S. 64)
Wochenmittelwerte Wochen Max. / Min.	QQ-Plot (siehe S. 66)
Dichtefunktion (siehe S. 61)	Box Plots (siehe S. 62) / Ferro Hypothesen (siehe S. 66)

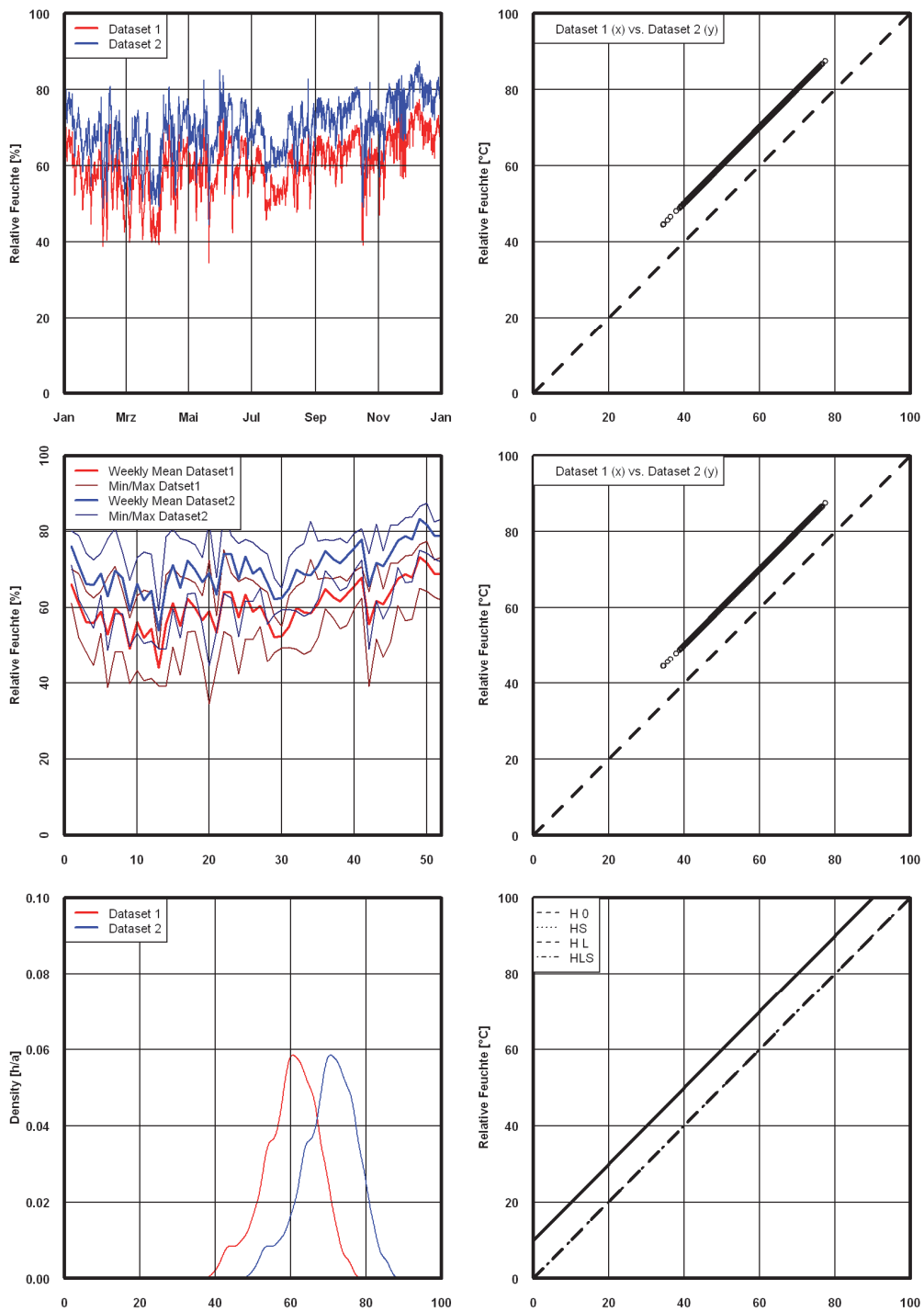


Bild A 1: Beispiel der Auswirkungen einer willkürlichen Verschiebung von 2 Datensätzen um 10 % r.F. auf die verschiedenen Darstellungen. An den beiden Dichtefunktionen und am Ferro Hypothesen-Plot in der Hypothese HL (*Location*) sind die 10 % r.F. Unterschied zum Ausgangsdatsatz gut ablesbar. Da es sich um eine künstliche, rein lineare Verschiebung der beiden Datensätze handelt, hat das Streudiagramm in Form einer Linie, die um 10 % r.F. verschoben ist.

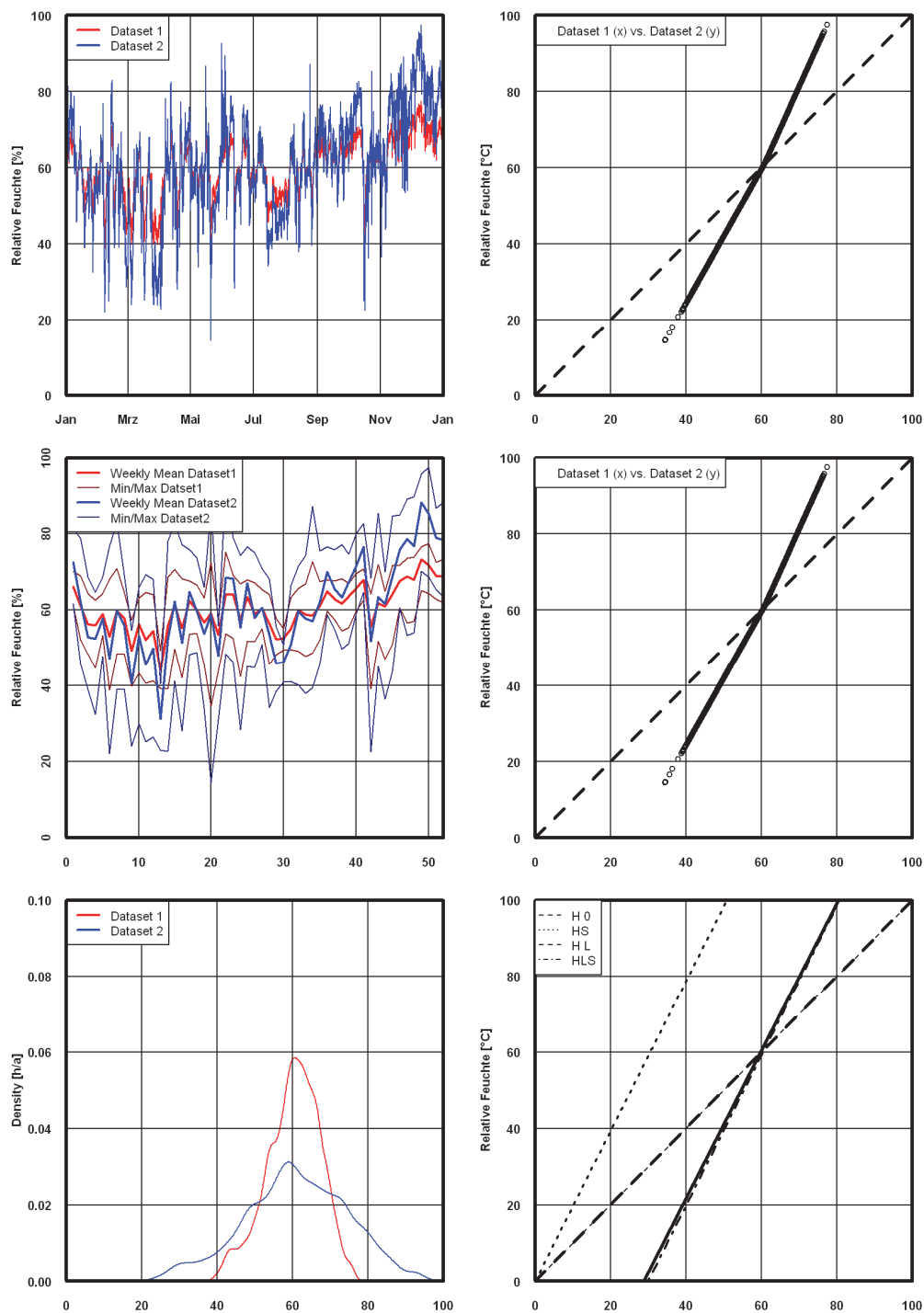


Bild A 2: Beispiel der Auswirkungen einer willkürlichen Streckung von 2 Datensätzen um 20 % r.F. beiderseits des Medians auf die verschiedenen Darstellungen. An den beiden Dichtefunktionen ist der Unterschied zum Ausgangsdatsatz ablesbar. Bei den Ferro Hypothesen beschreibt die Hypothese HS (*Scale*) erwartungsgemäß den Unterschied der beiden Datensätze am besten. Da es sich um eine künstliche, rein lineare Verschiebung der beiden Datensätze handelt, hat das Streudiagramm in Form einer Linie, mit höherer Steigung als die Ursprungsgerade.

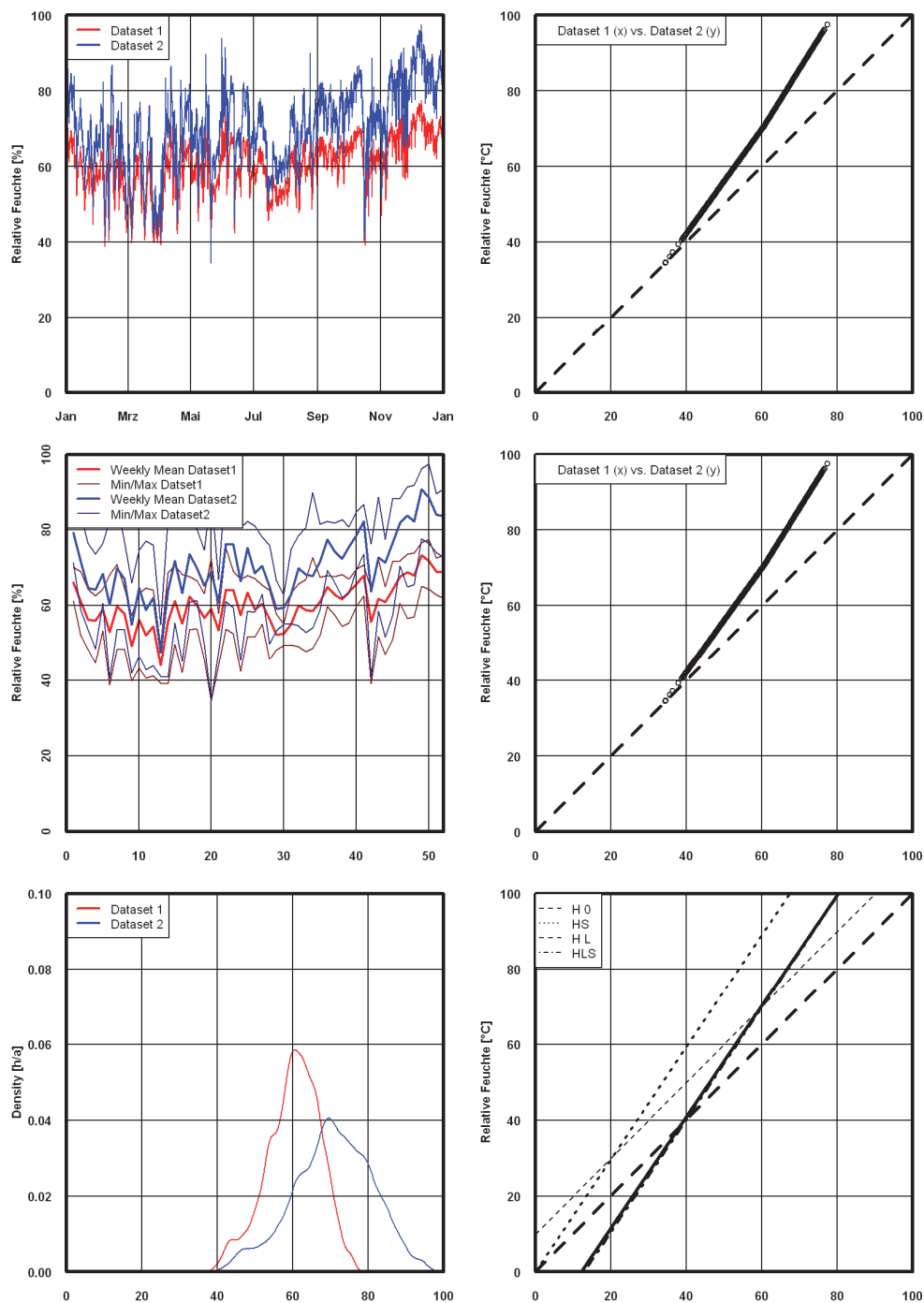


Bild A 3: Beispiel der Auswirkungen einer willkürlichen Verschiebung um 10 % r.F. und Streckung von 2 Datensätzen um 10 % r.F. beiderseits des Medians auf die verschiedenen Darstellungen. An den beiden Dichtefunktionen ist der Unterschied zum Ausgangsdatensatz ablesbar. Die Hypothesengerade HLS (*Location and Scale*) beschreibt den Unterschied der beiden Datensätze am besten. Da es sich um eine künstliche, rein lineare Verschiebung der beiden Datensätze handelt, hat auch das Streudiagramm in Form einer Linie, mit höherer Steigung als die Ursprungsgerade und einer Verschiebung nach oben.

## Anhang B Statistik Schachen

Tabelle B 1: Statistische Analyse der täglichen Änderung der Luftfeuchten und Lufttemperaturen, in Messung und in der 2. Simulation, Vergleich Messjahr Oktober 2006 bis Oktober 2007.

Quantile	Messjahr 2006/2007 <b>Tagesschwankungen</b> $\Delta r.F./d$ [%]	Simulation <b>Tagesschwankungen</b> $\Delta r.F./d$ [%]
<b>Maximum</b>	<b>21,2</b>	<b>21,3</b>
P99	18,6	16,9
P90	11,2	11,1
P75	7,5	8,1
<b>Median</b>	<b>4,9</b>	<b>5,9</b>
P25	3,5	4,2
P10	2,1	3,1
P 1	1,5	1,9
<b>Minimum</b>	<b>0,9</b>	<b>1,6</b>
Spannweite	<b>20,3</b>	<b>19,7</b>
N [-]	365	365



Tabelle B 2: Anzahl N der Häufigkeiten der Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte innerhalb eines Tages im Türkischen Saal für die verschiedenen Simulationen im Vergleich zur Messung, 1. und 2. Simulation und Messdaten vom 1.10.2006 bis 30.9.2007, 3. Simulation und Messdaten vom 1.10.2010 bis 21.8.2011.

	2006/2007			2010/2011	
$\Delta r.F./d$ [%]	N (Messung)	N (1. Sim)	N (2. Sim)	N (Messung)	N (3. Sim)
1	1	0	0	2	0
2	11	9	12	28	10
3	40	18	29	60	18
4	70	44	32	59	37
5	64	55	51	52	47
6	42	62	55	34	52
7	27	51	52	21	30
8	26	31	33	20	38
9	20	27	21	14	20
10	11	17	15	9	14
11	13	18	20	5	19
12	10	9	10	11	8
13	8	5	13	3	9
14	6	10	4	4	5
15	5	3	6	0	4
16	5	2	5	0	7
17	1	1	1	1	0
18	1	2	2	0	1
19	1	1	1	0	3
20	1	0	2	0	1
21	1	0	1	1	1
22	1	0	0	0	0
<b>Summe Tage</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>365</b>	<b>324</b>	<b>324</b>

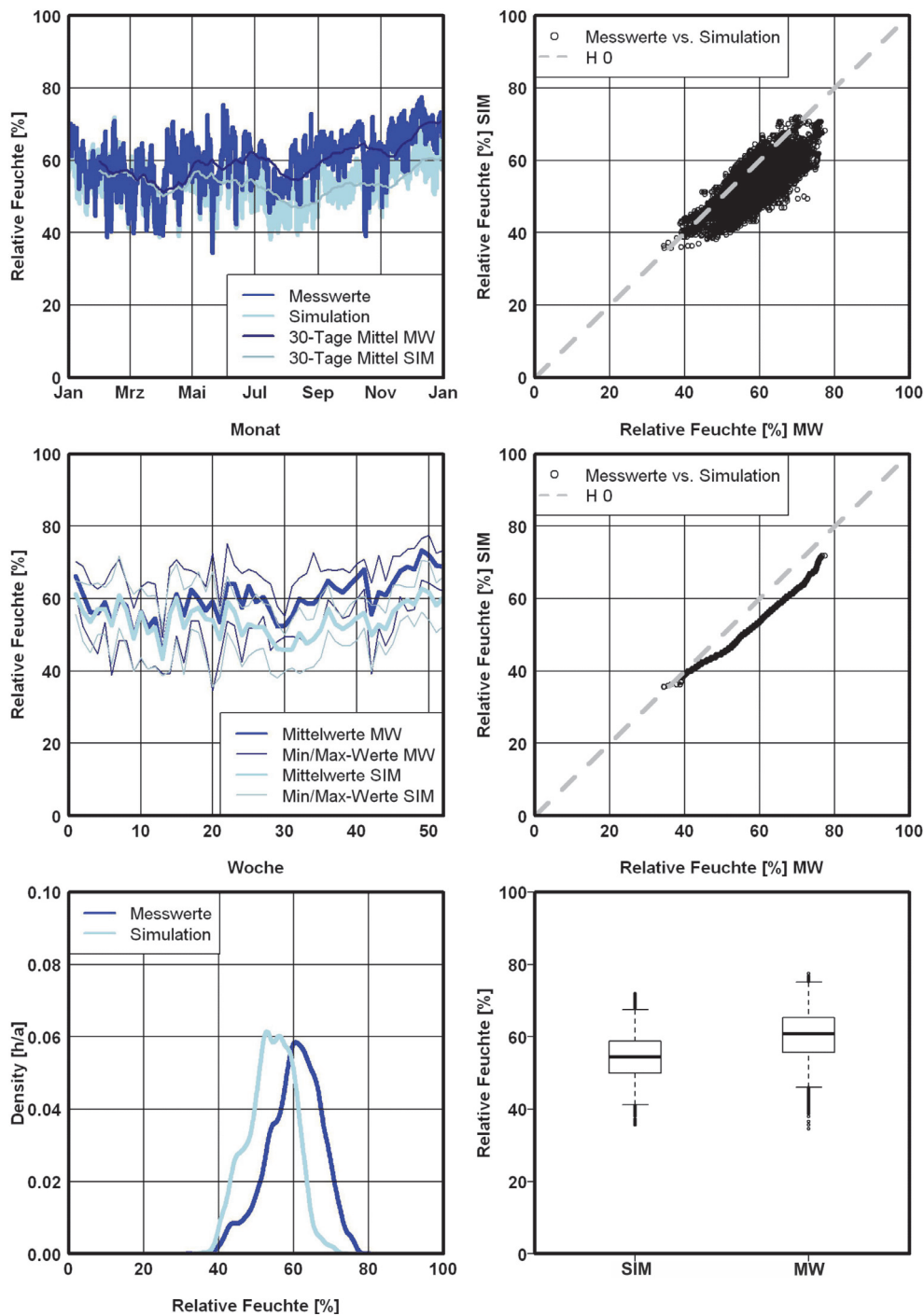


Bild B 1: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation zur 1. vereinfachten Simulation des Türkischen Saals 2006 bis 2007. Die Daten der Simulation sind gegenüber dem Messwerten zur trocken. Alle drei Hypothesengeraden beschreiben den Datensatz, was sich bei der Betrachtung der beiden Dichtefunktionen bestätigt. Es liegt sowohl eine Verschiebung in der Lage (HL) vor, als auch in der Breite der Dichtefunktionen (HS).

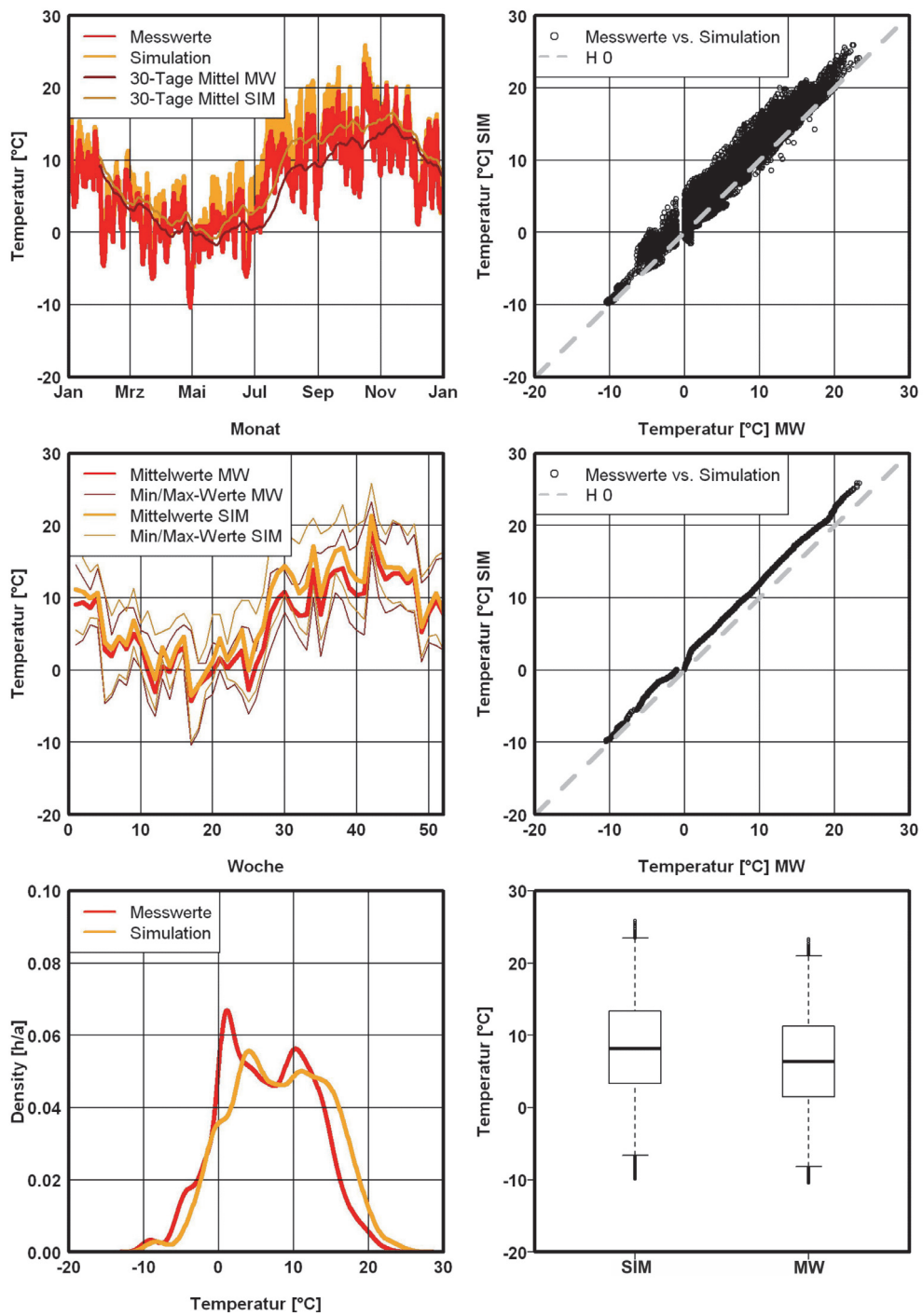


Bild B 2: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation zur 1. vereinfachten Simulation des Türkischen Saals 2006 bis 2007. Die simulierte Temperatur liegt höher als die gemessene, reale.

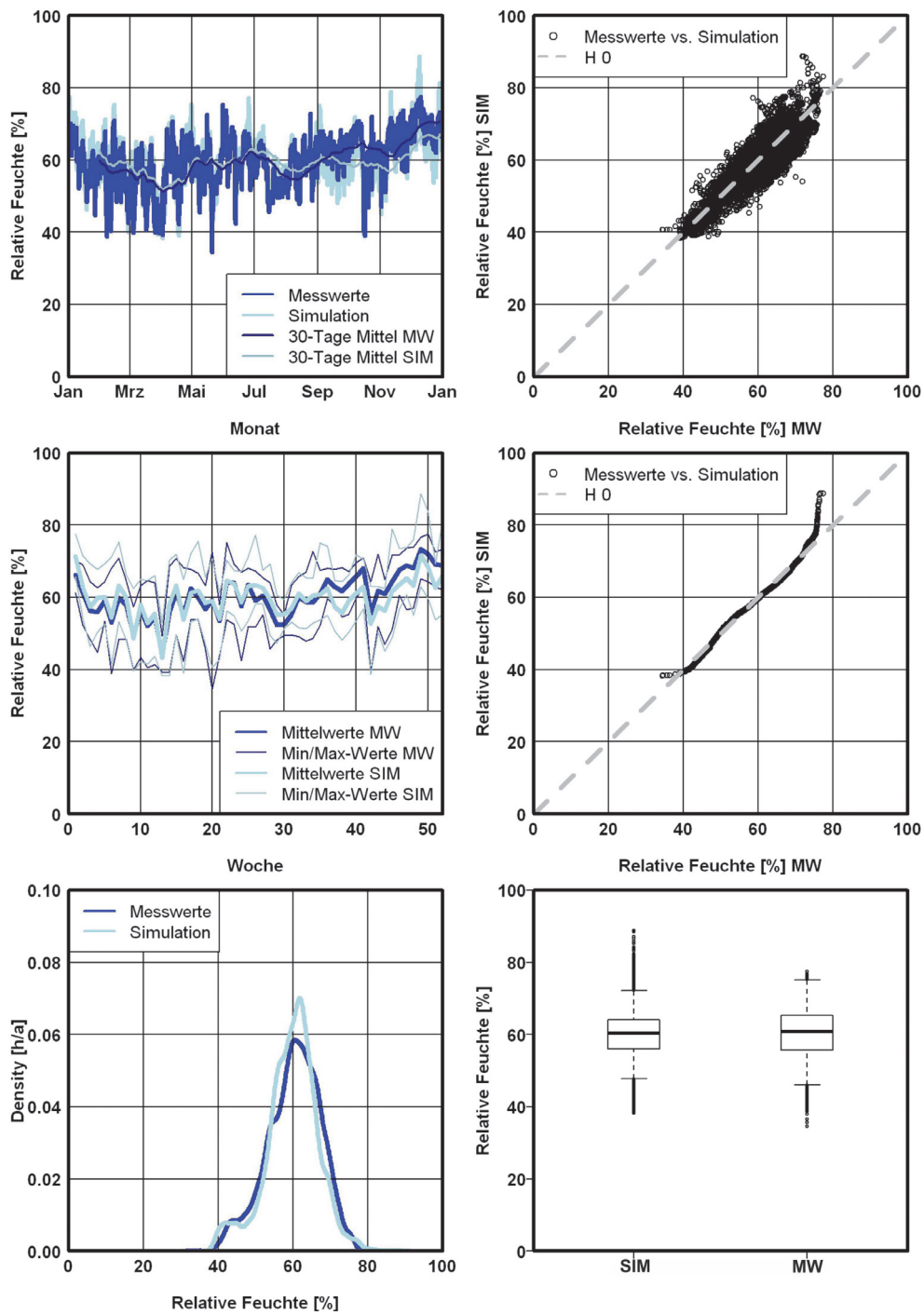


Bild B 3: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation zur 2. optimierten Simulation des Türkischen Saals 2006 bis 2007.

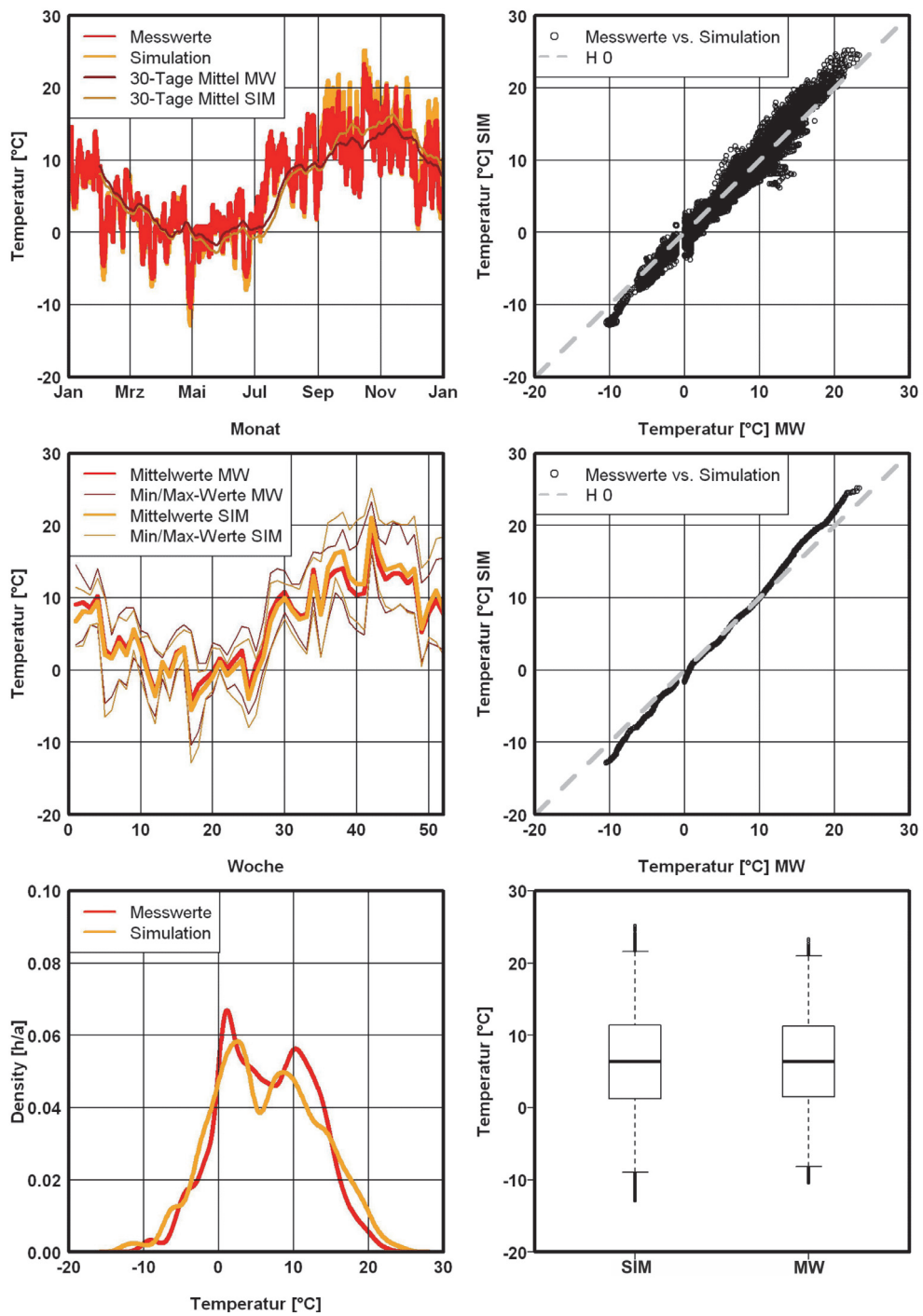


Bild B 4: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation zur 2. optimierten Simulation des Türkischen Saals 2006 bis 2007.

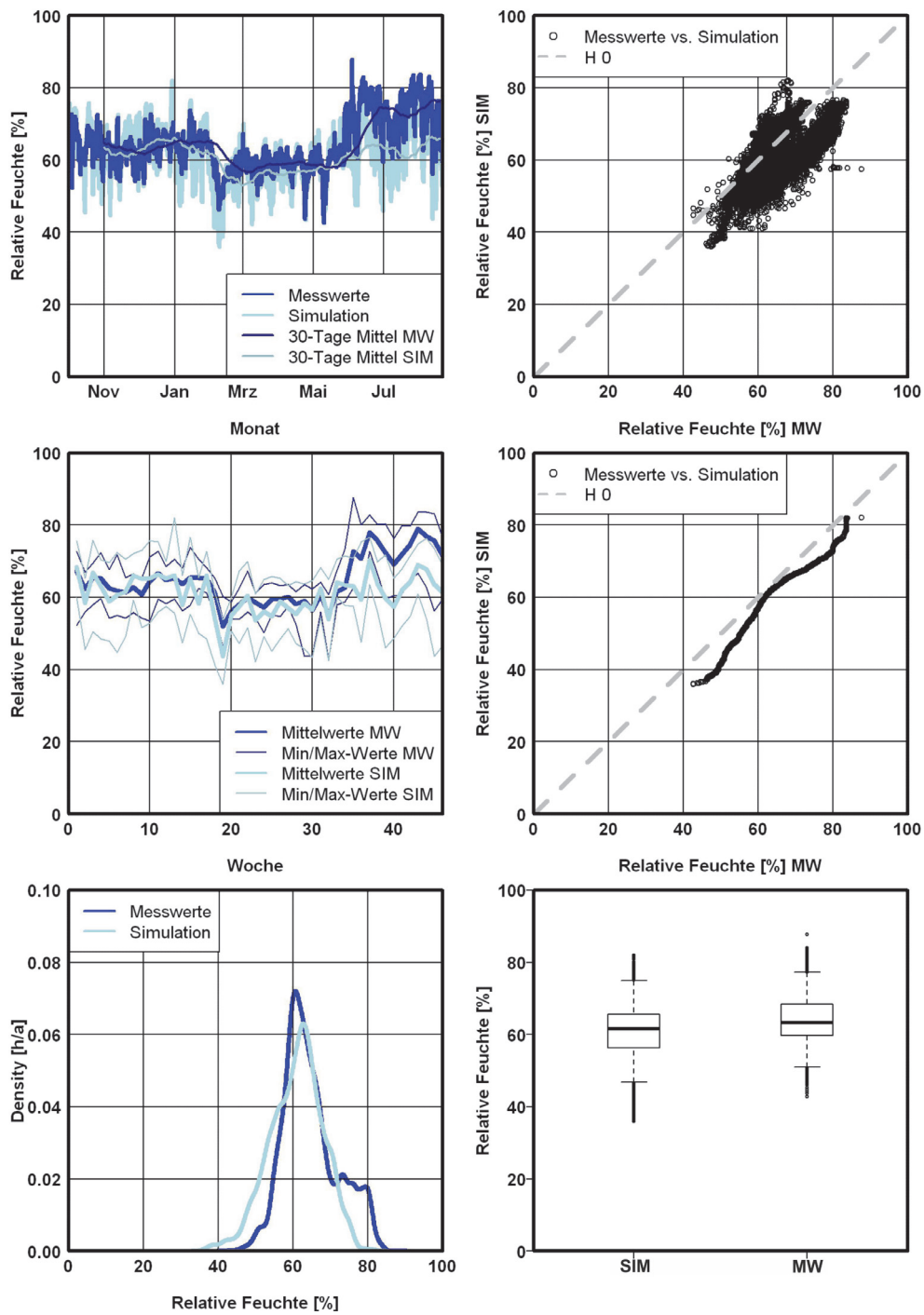


Bild B 5: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, 3. Simulation, Validierungsrechnung mit Daten von 2010 bis 2011, Messung und Simulation, ausgehend von dem kalibrierten Modell der 2. Simulation des Türkischen Saals.

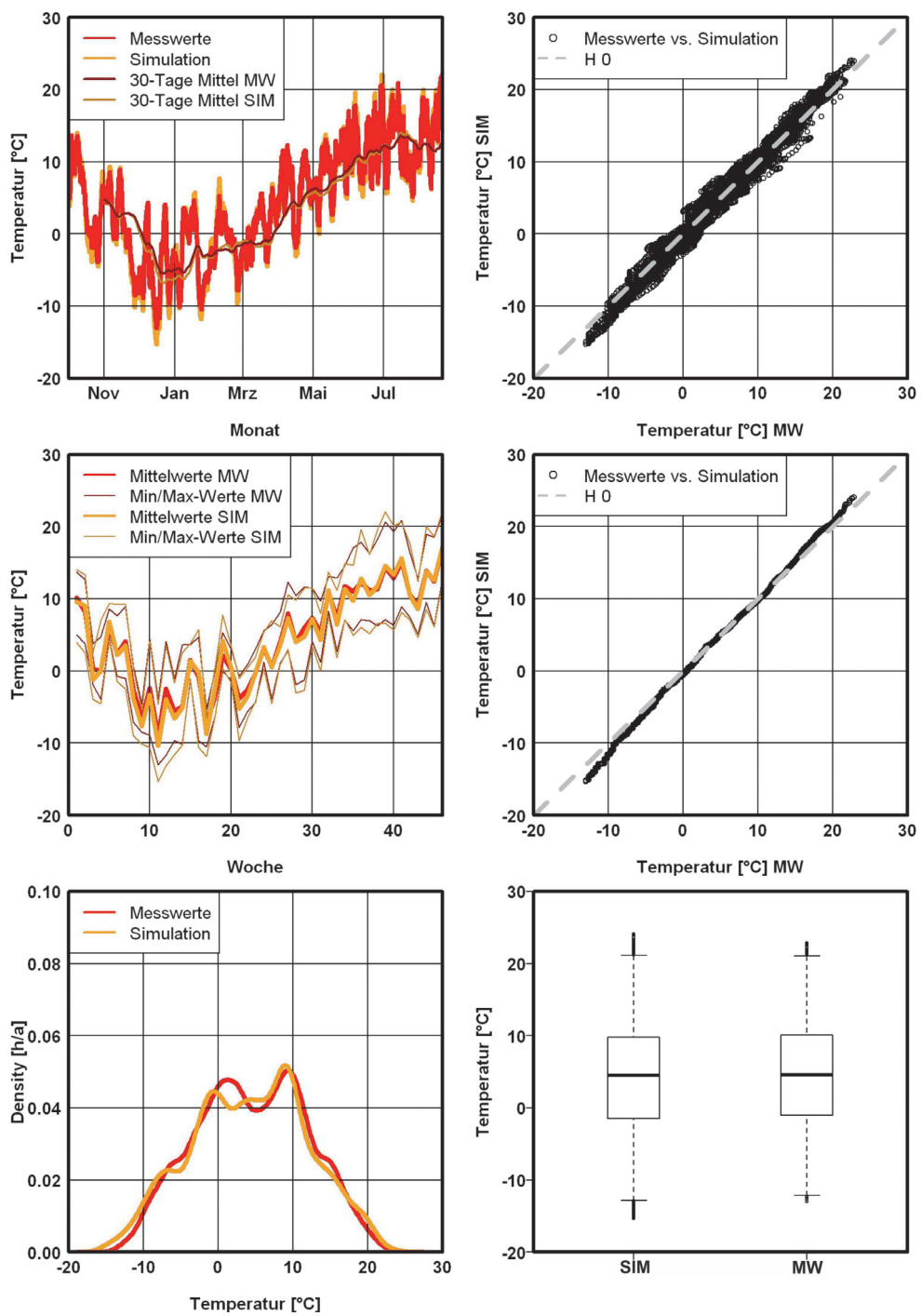


Bild B 6: Statistischer Vergleich der Temperatur, 3. Simulation, Validierungsrechnung mit Daten von 2010 bis 2011, Messung und Simulation, ausgehend von dem kalibrierten Modell der 2. Simulation des Türkischen Saals.

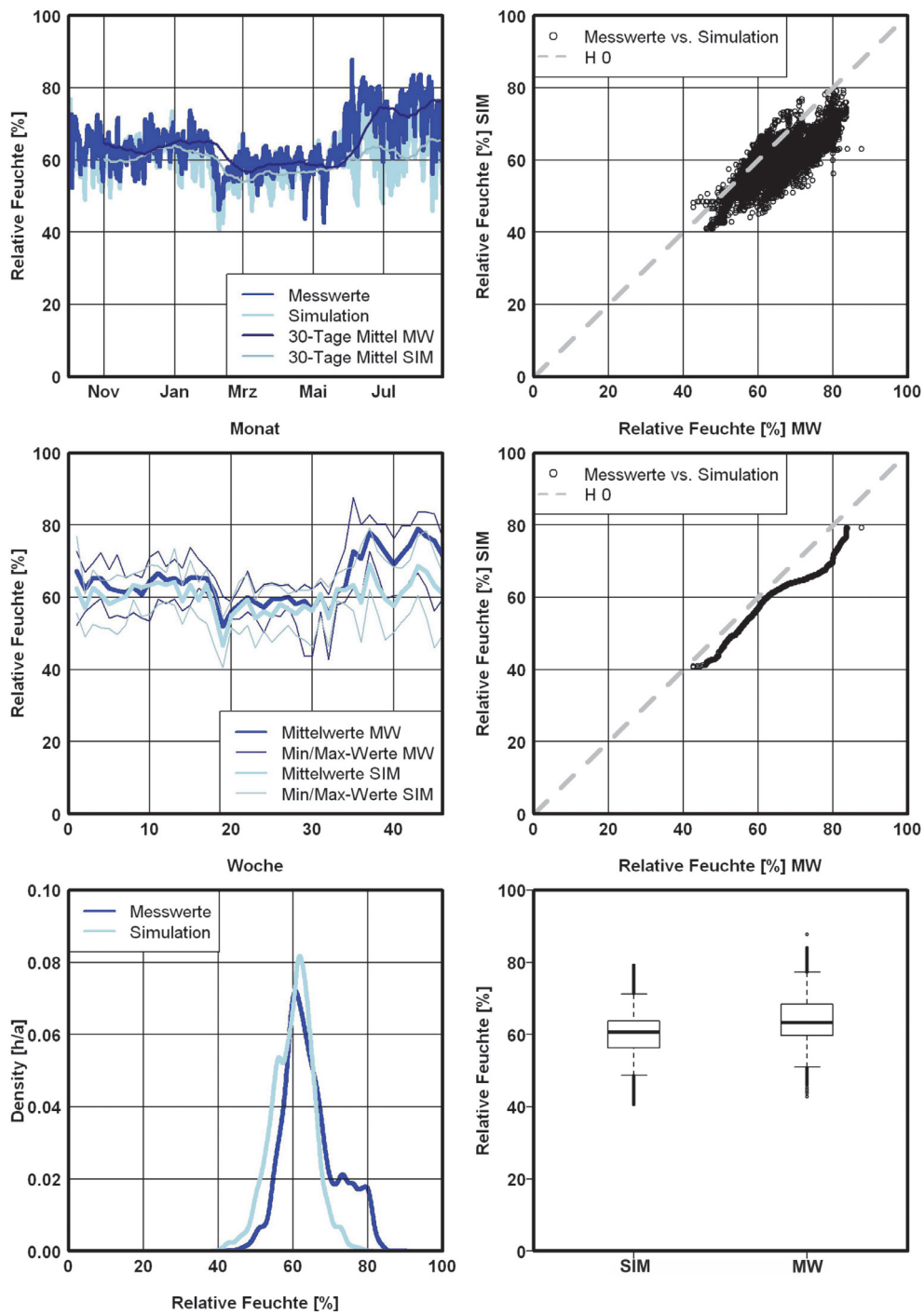


Bild B 7: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, 3. Simulation mit Daten von 2010 bis 2011, erneut kalibriert, Messung und Simulation, ausgehend von dem kalibrierten Modell der 2. Simulation des Türkischen Saals.



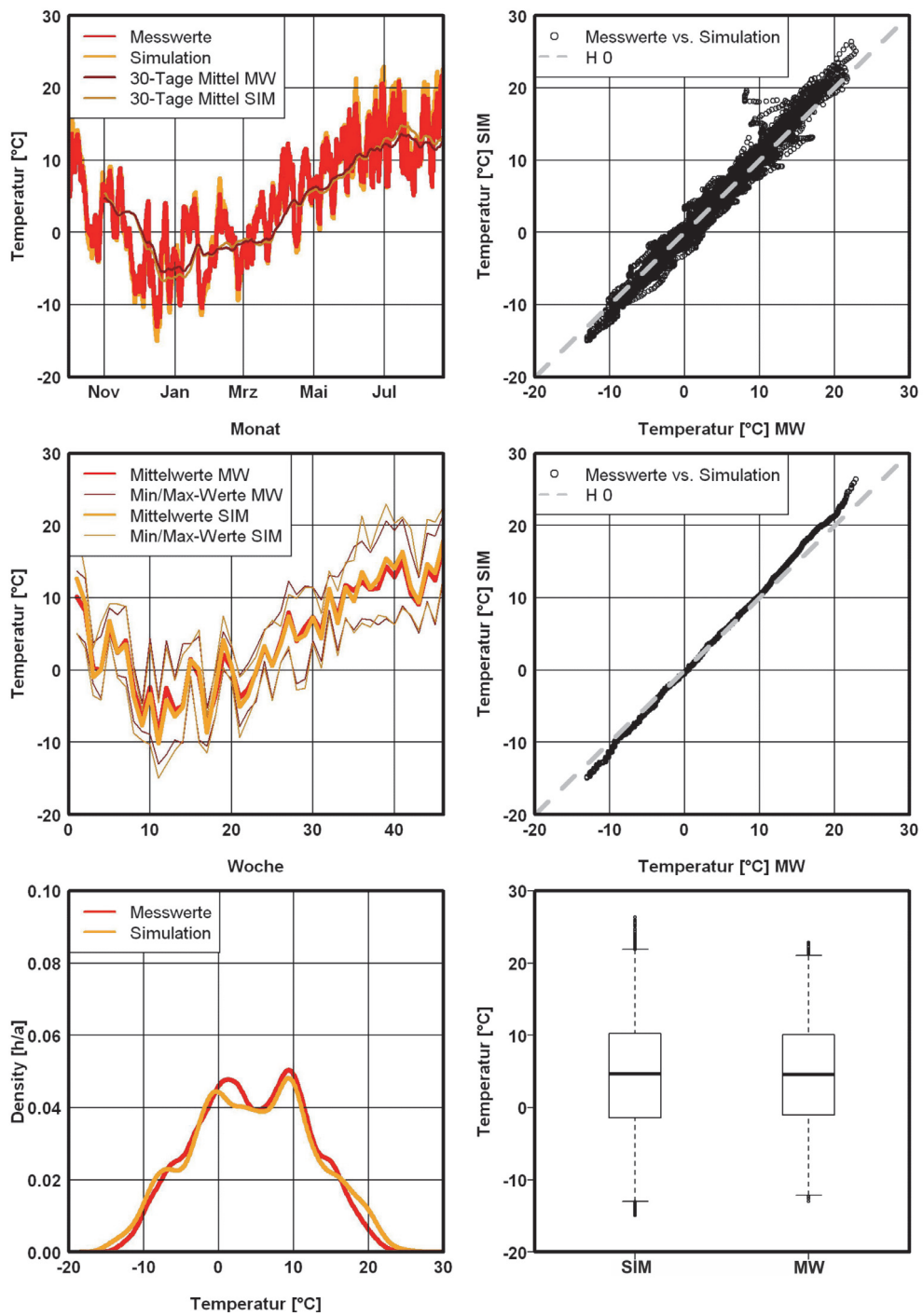


Bild B 8 Statistischer Vergleich der Temperatur, 3. Simulation mit Daten von 2010 bis 2011, erneut kalibriert, Messung und Simulation, ausgehend von dem kalibrierten Modell der 2. Simulation des Türkischen Saals.

## Anhang C Statistik Linderhof

In diesem Anhang sind die statistischen Auswertungen zur Ausgangssimulation, der optimierten Simulation und zu den Varianten der Simulationen des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof zusammengefasst (vgl. Tabelle C 1).

Tabelle C 1: Übersicht der durchgeführten Varianten der Simulation des Paradeschlafzimmers mit den zugeordneten Profilen und Oberflächenparametern [Bichlmair 2011a].

Simulation	Profil Außenluft	Profil Innere Quellen	Profil Interzonale Luft	Material / sd-Wert
Ausgangssimulation	Konstant	Konstant	-	Ausgangswert
Optimierte Simulation	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Optimierter Wert
Variante 1	Saisonal	Saisonal	-	Ausgangswert
Variante 2	Saisonal	Stündlich	-	Ausgangswert
Variante 3	Stündlich	Saisonal	-	Ausgangswert
Variante 4	Stündlich	Stündlich	-	Ausgangswert
Variante 5	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Ausgangswert
Variante 6	Stündlich	Stündlich	Stündlich	Ausgangswert
Variante 7	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Min Pufferung
Variante 8	Stündlich	Stündlich	Saisonal	Max Pufferung

Tabelle C 2: Anzahl N der Änderungen der relativen Luftfeuchte innerhalb eines Tages im Parade-schlafzimmer für die optimale Simulation im Vergleich zwischen gleitendem und festem Intervall der Tagesschwankung.

Endwert	Tageweise		Gleitend	
	$\Delta$ r.F.	N (Messung)	N (Opt. Sim)	N (Messung)
1	0	1	1	4
2	3	3	68	62
3	16	4	330	160
4	23	10	499	233
5	26	26	553	427
6	19	34	592	777
7	23	22	570	612
8	21	25	482	631
9	19	24	400	543
10	21	23	514	571
11	22	20	506	511
12	18	10	411	304
13	7	12	243	307
14	8	12	222	308
15	2	8	98	172
16	7	3	164	119
17	8	1	124	58
18	3	3	69	44
19	1	5	36	71
20	3	2	52	39
21	0	2	17	38
22	0	0	8	8
23	0	1	3	21
24	1		26	
25			10	
26			17	
27			4	
28			0	
29			1	
30				

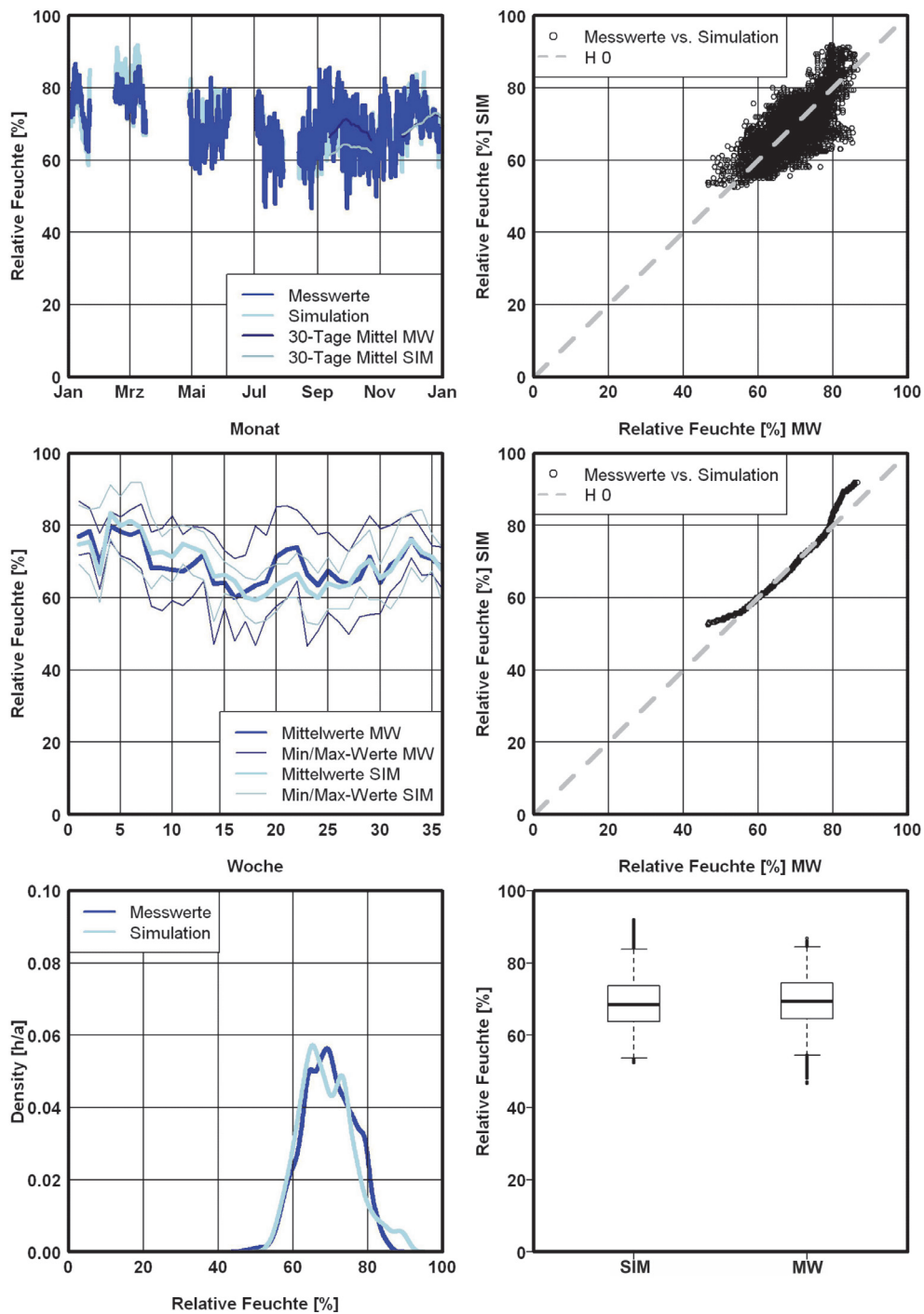


Bild C 1: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Ausgangssimulation.

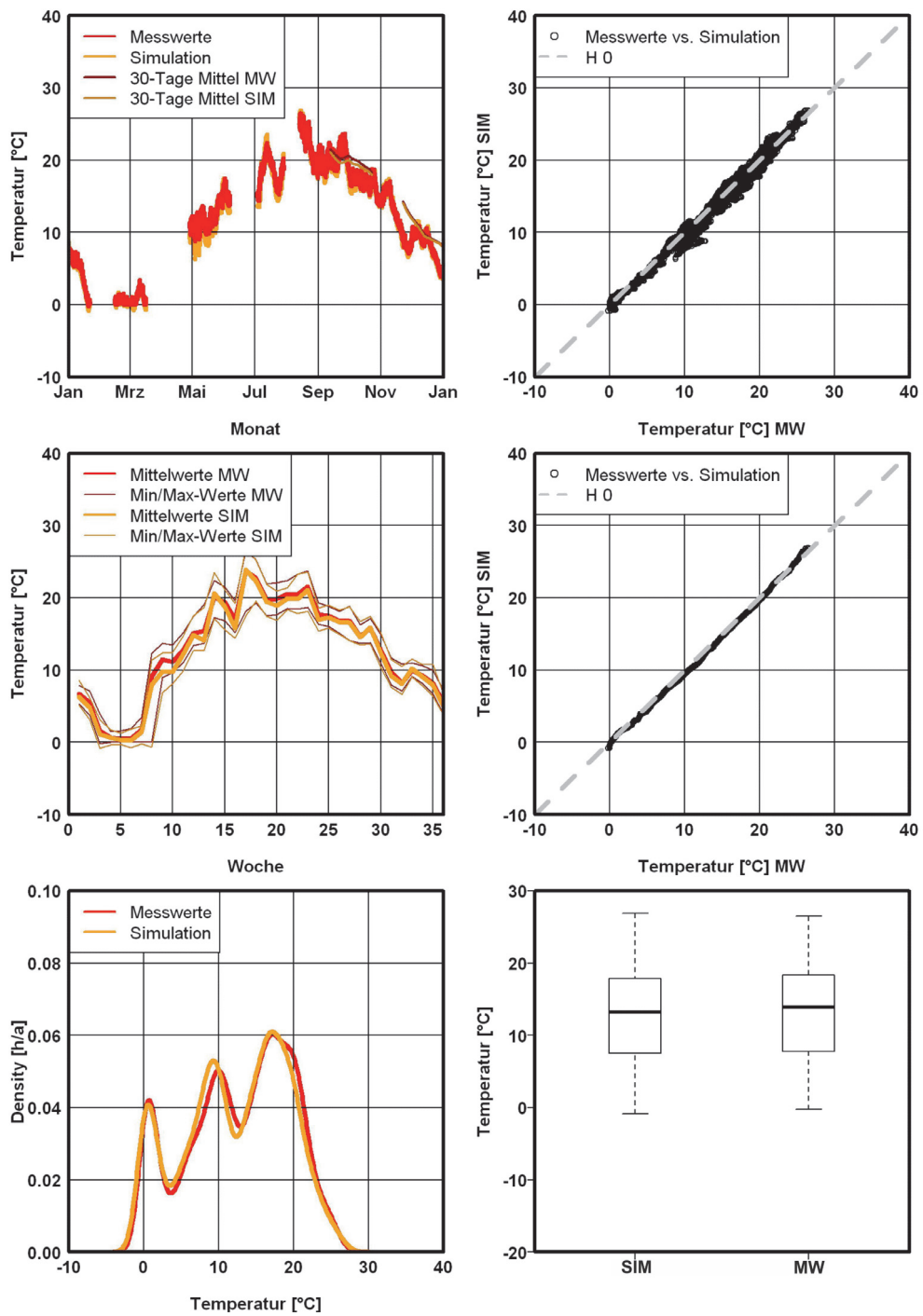


Bild C 2: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Ausgangssimulation.

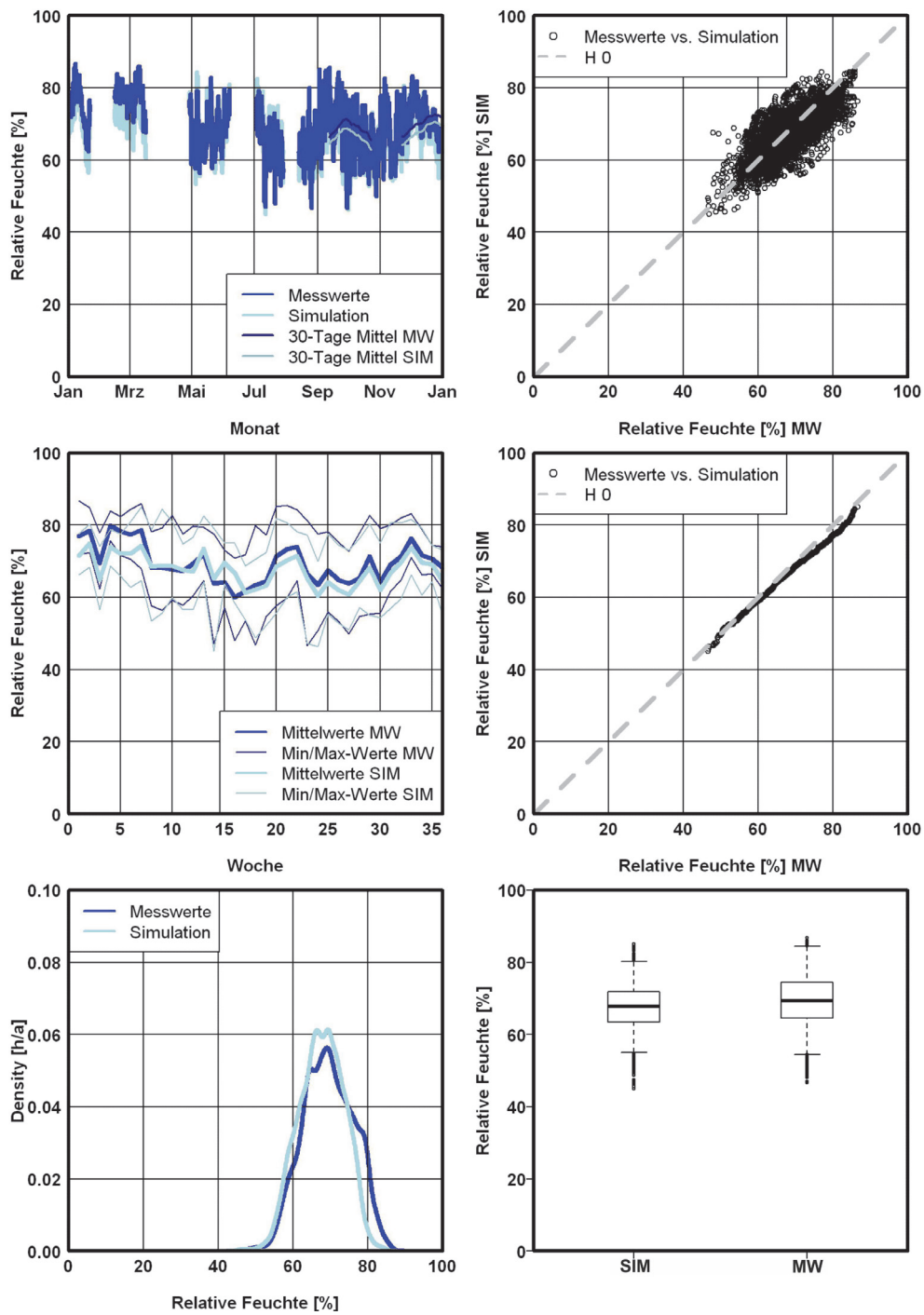


Bild C 3: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, optimierte Simulation.

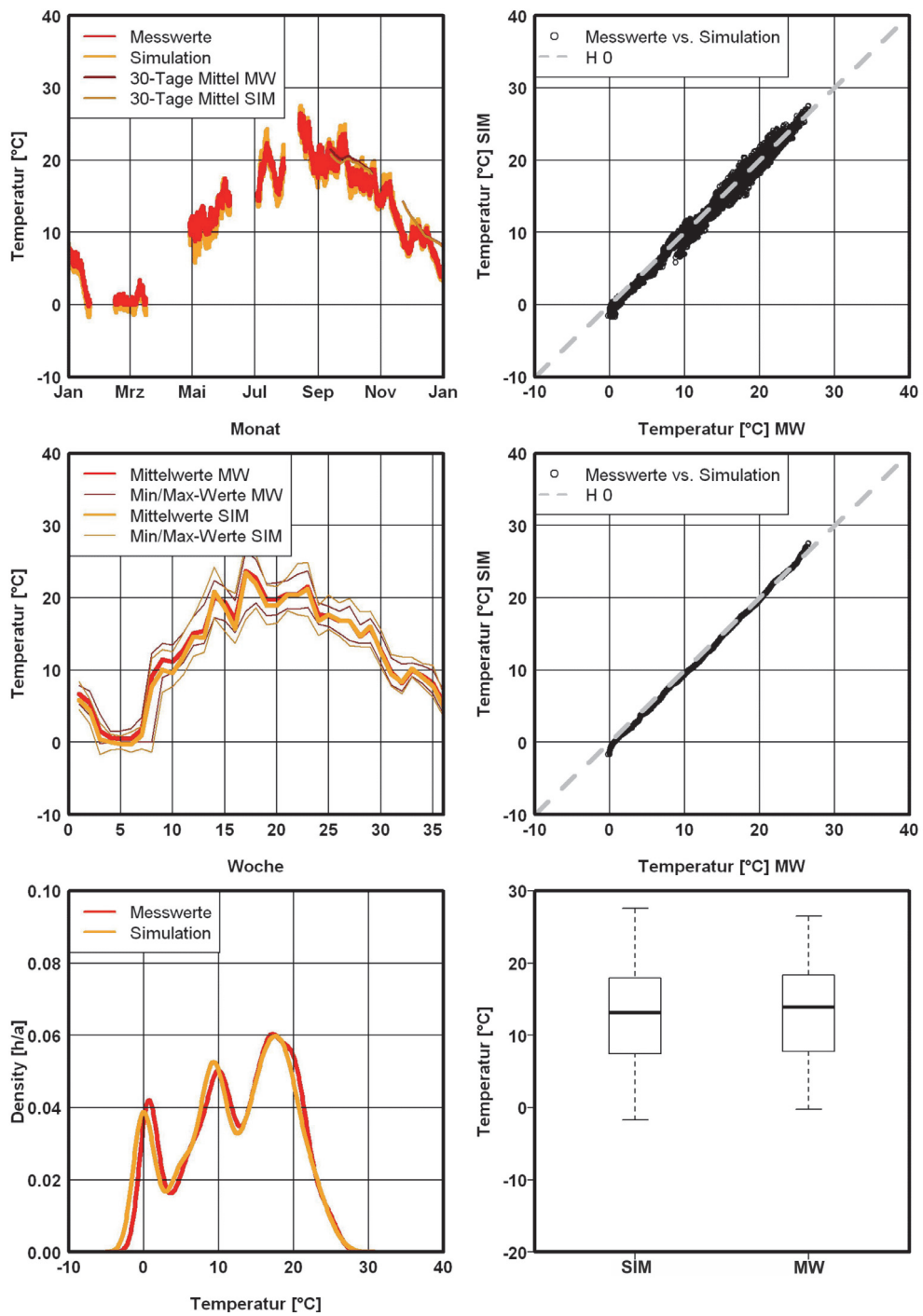


Bild C 4: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, optimierte Simulation.

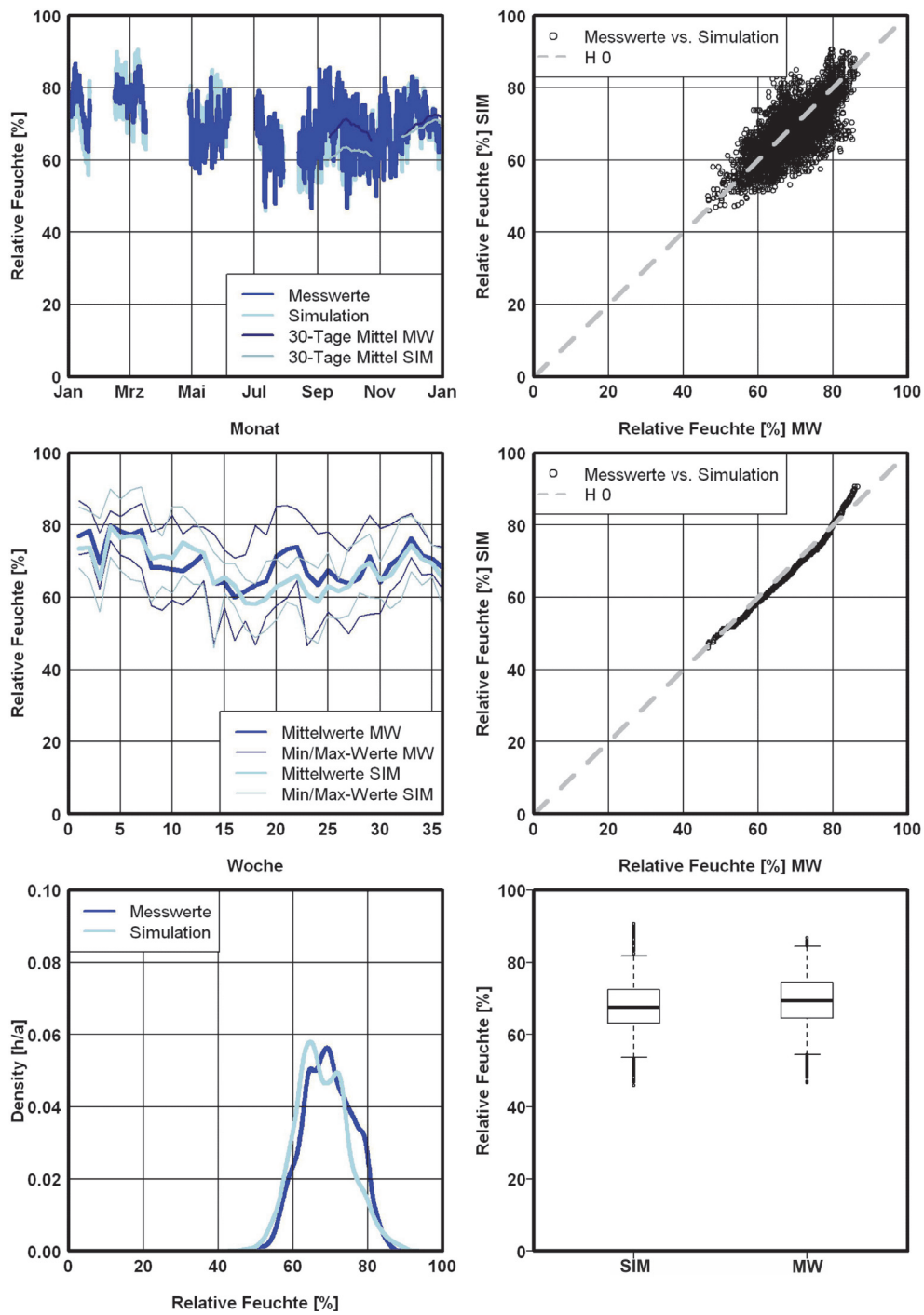


Bild C 5: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 1.



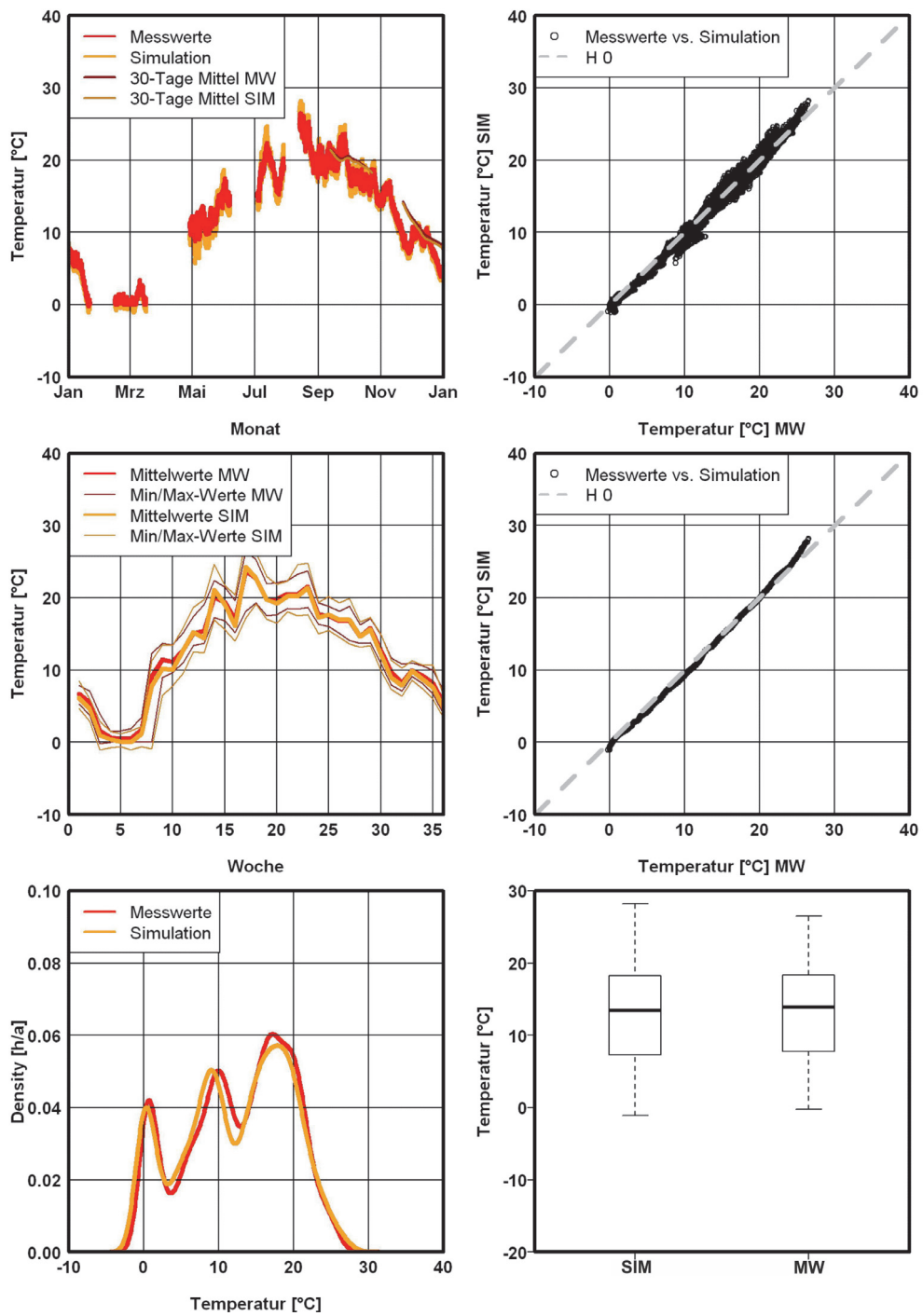


Bild C 6: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 1.

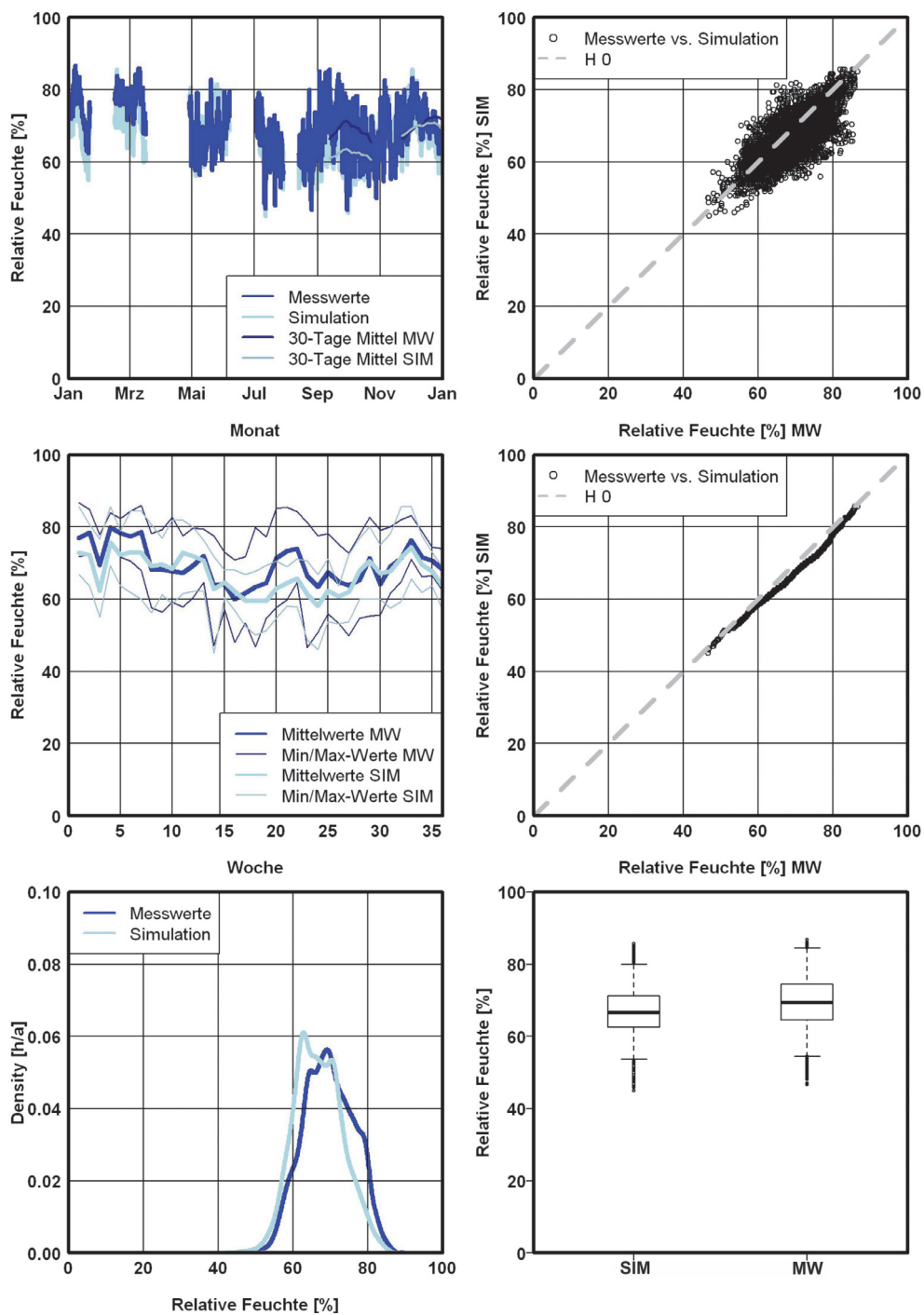


Bild C 7: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 2.

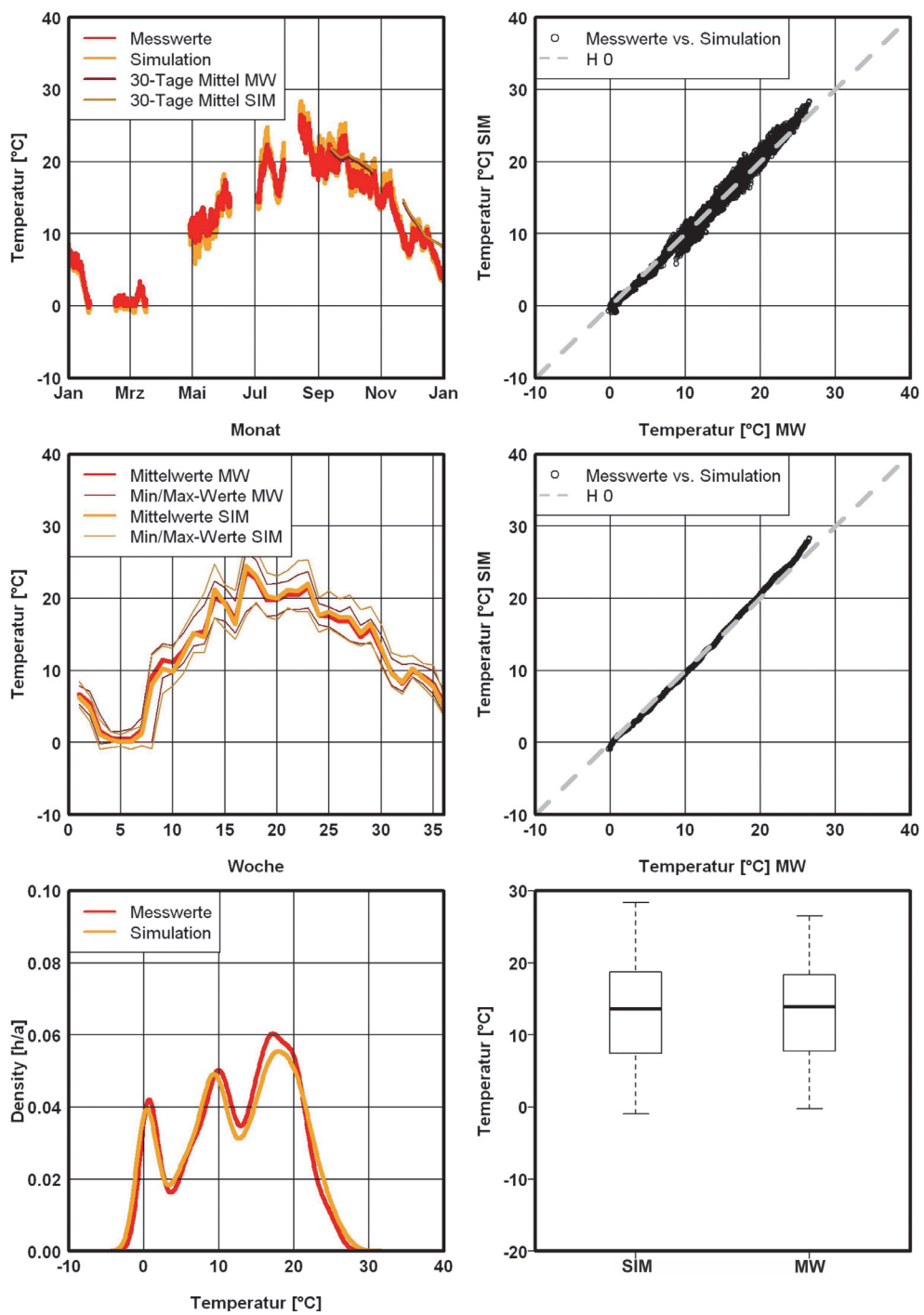


Bild C 8: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 2.

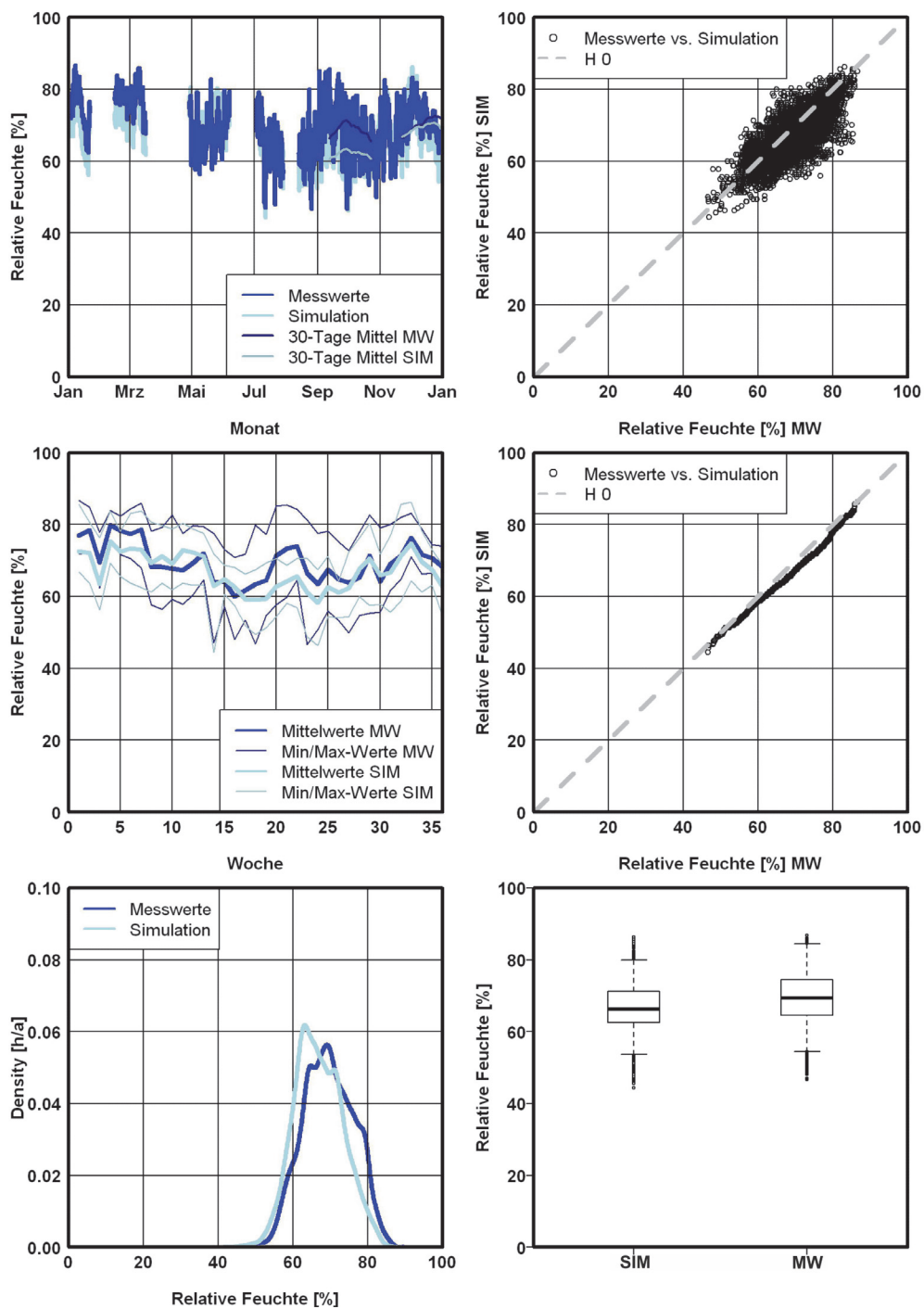


Bild C 9: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 3.

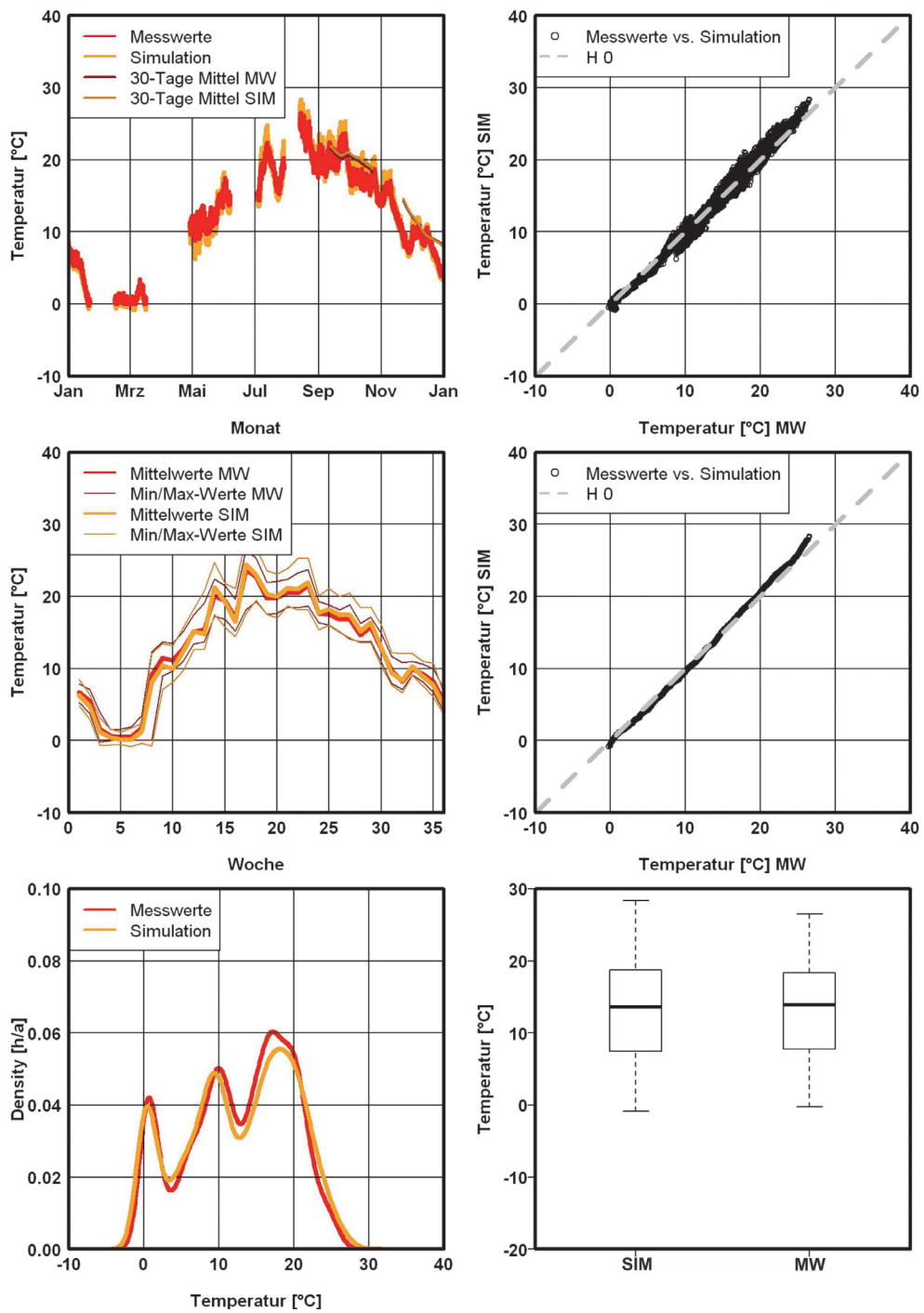


Bild C 10: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 3.

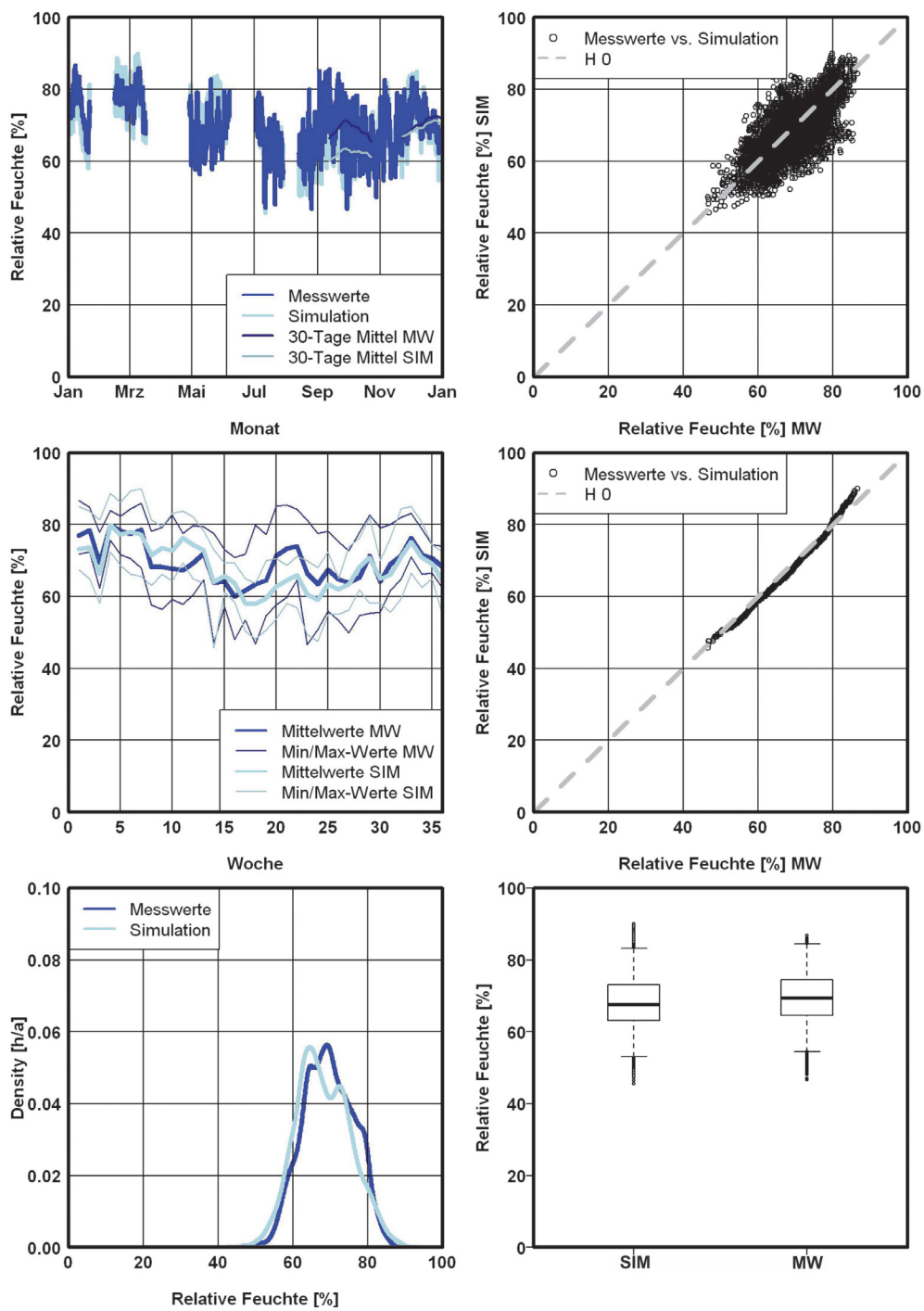


Bild C 11: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 4.

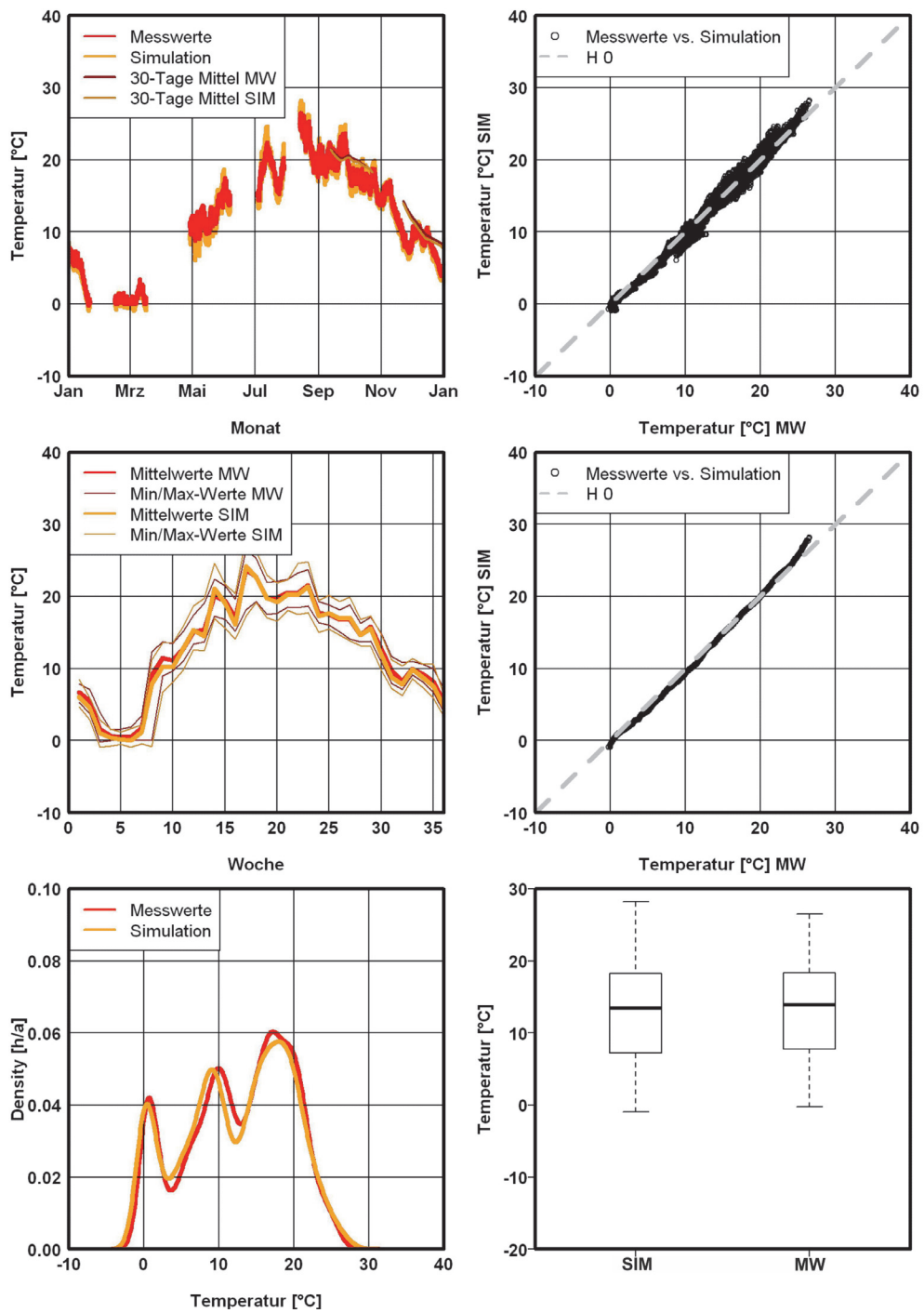


Bild C 12: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 4.

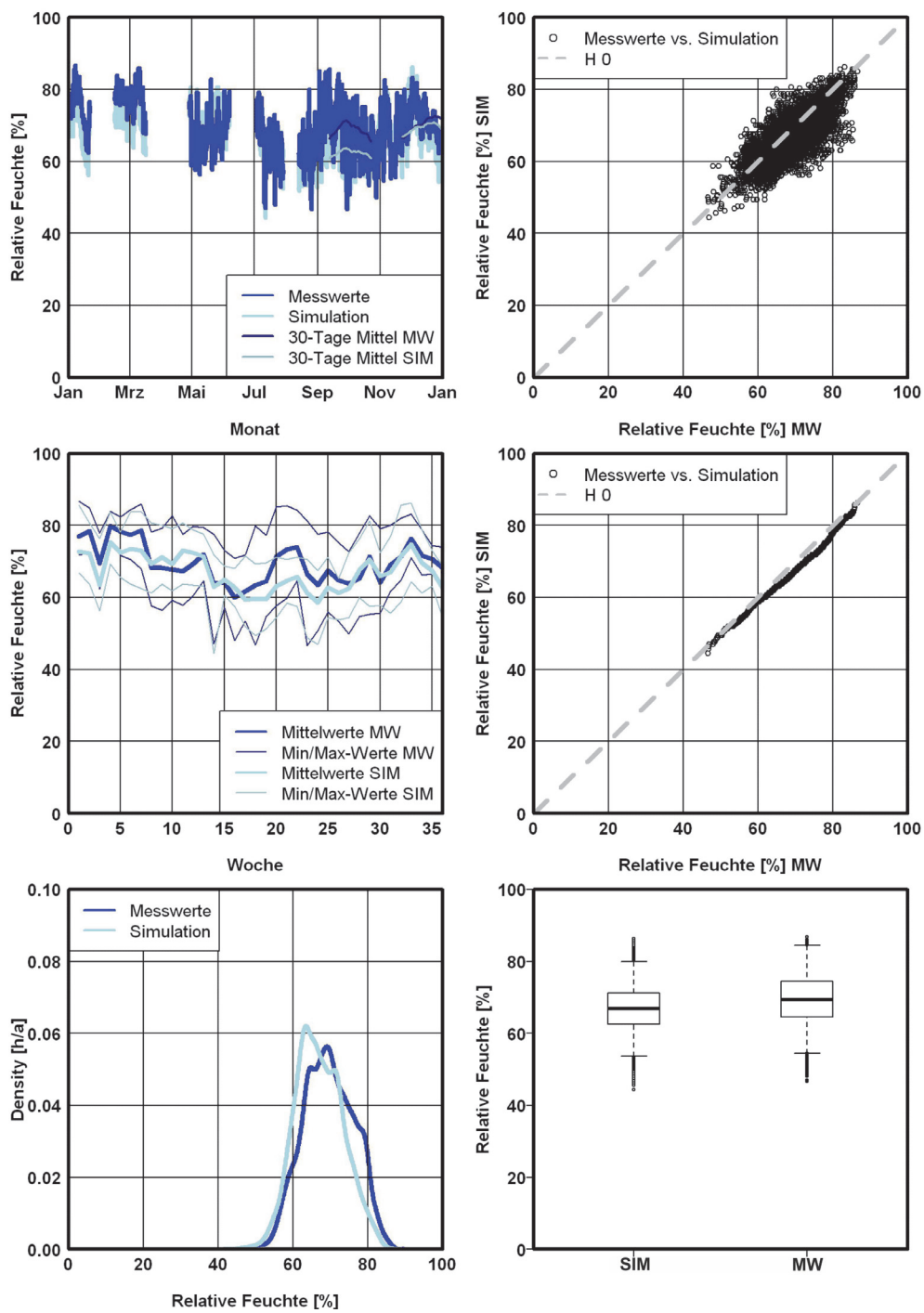


Bild C 13: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 5.



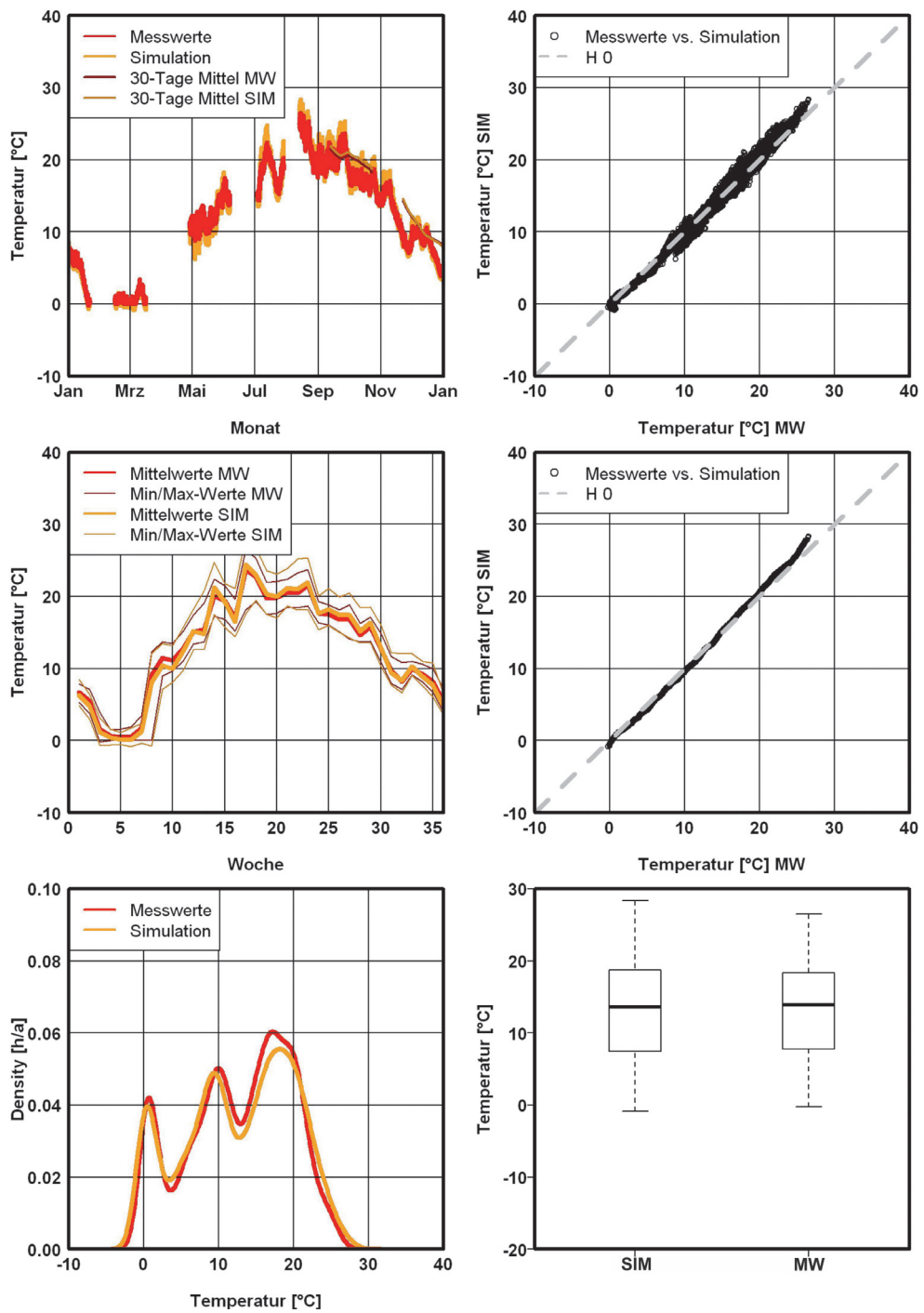


Bild C 14: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 5.

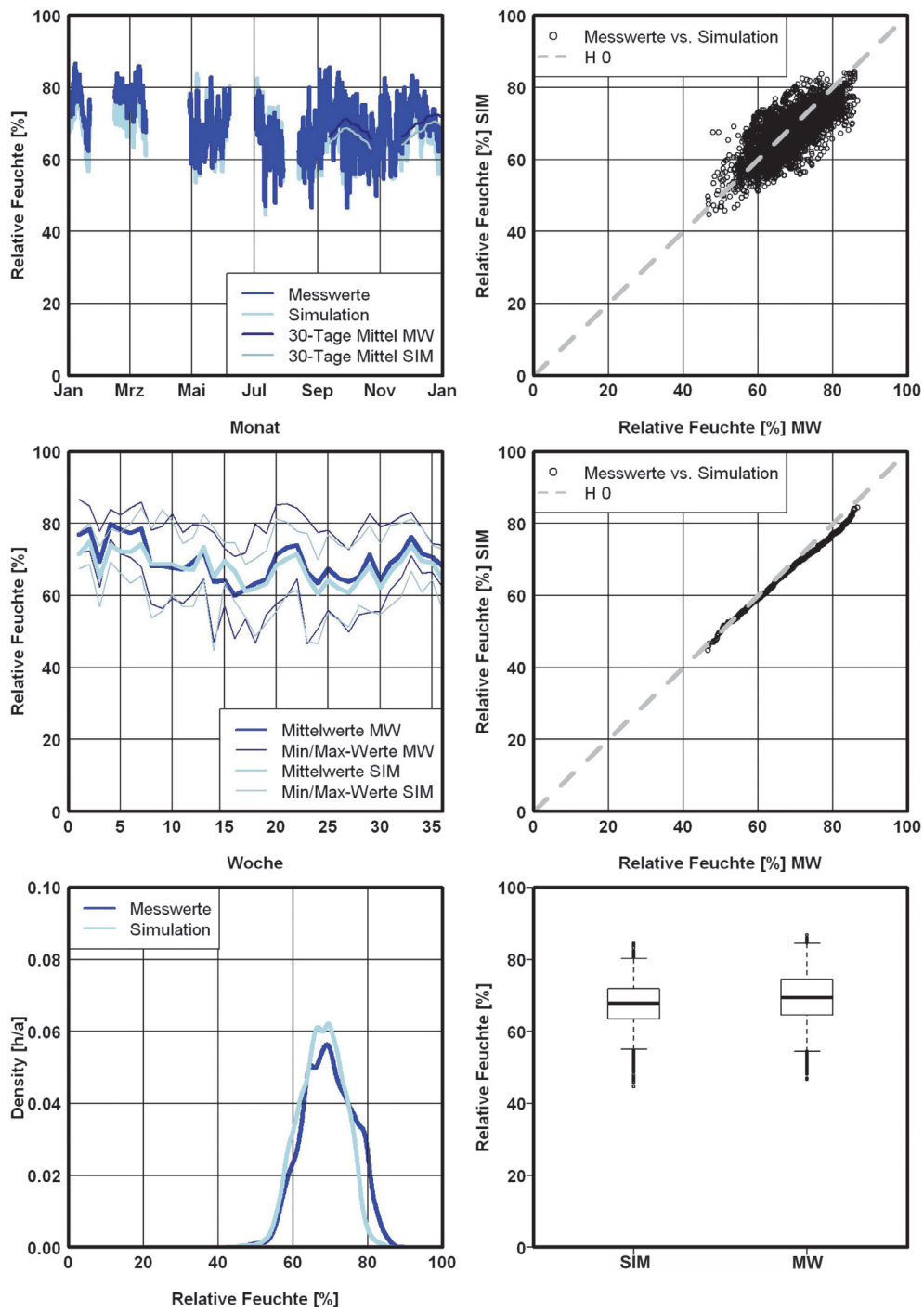


Bild C 15: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 6.

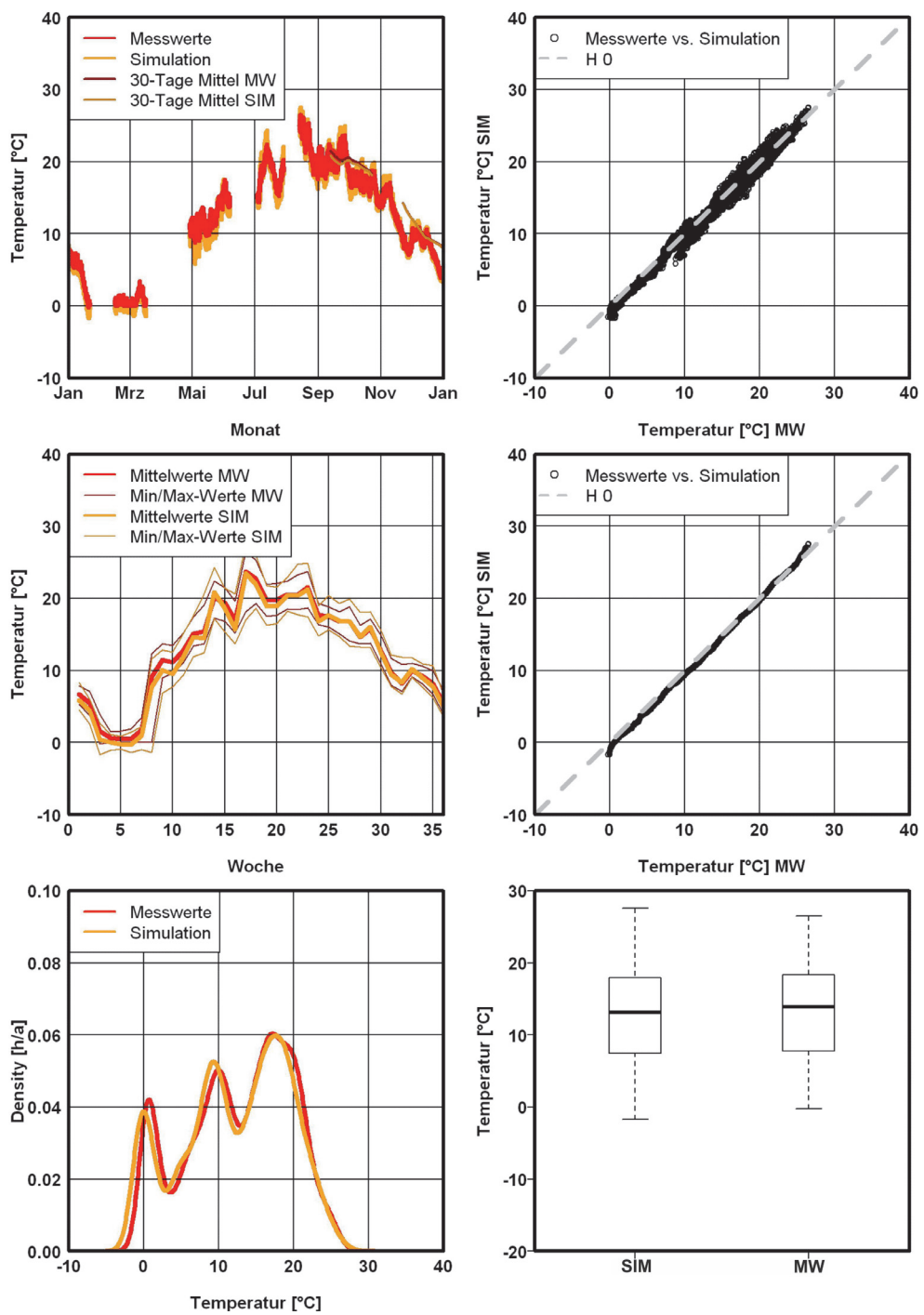


Bild C 16: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 6.

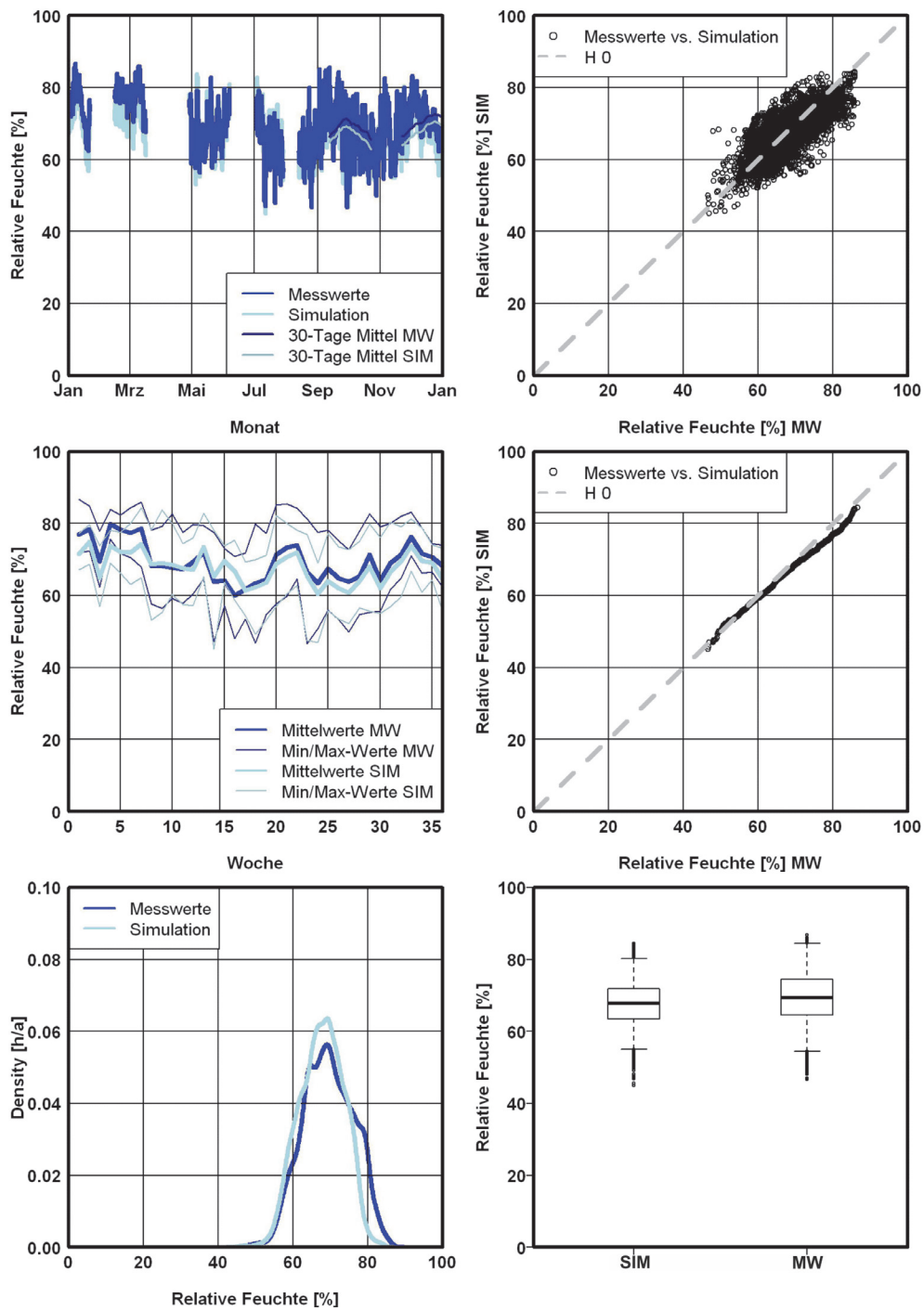


Bild C 17: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 7.

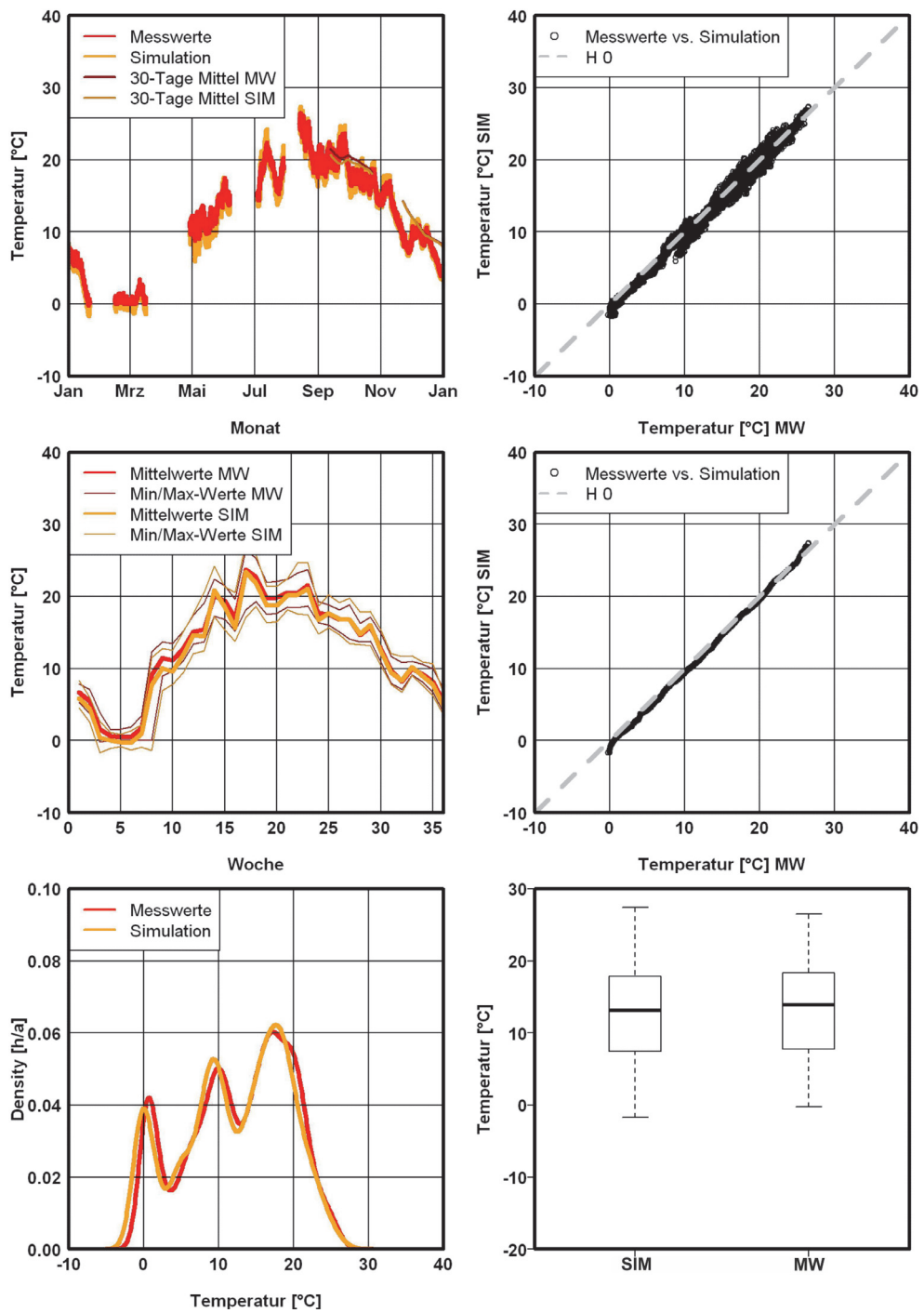


Bild C 18: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 7.

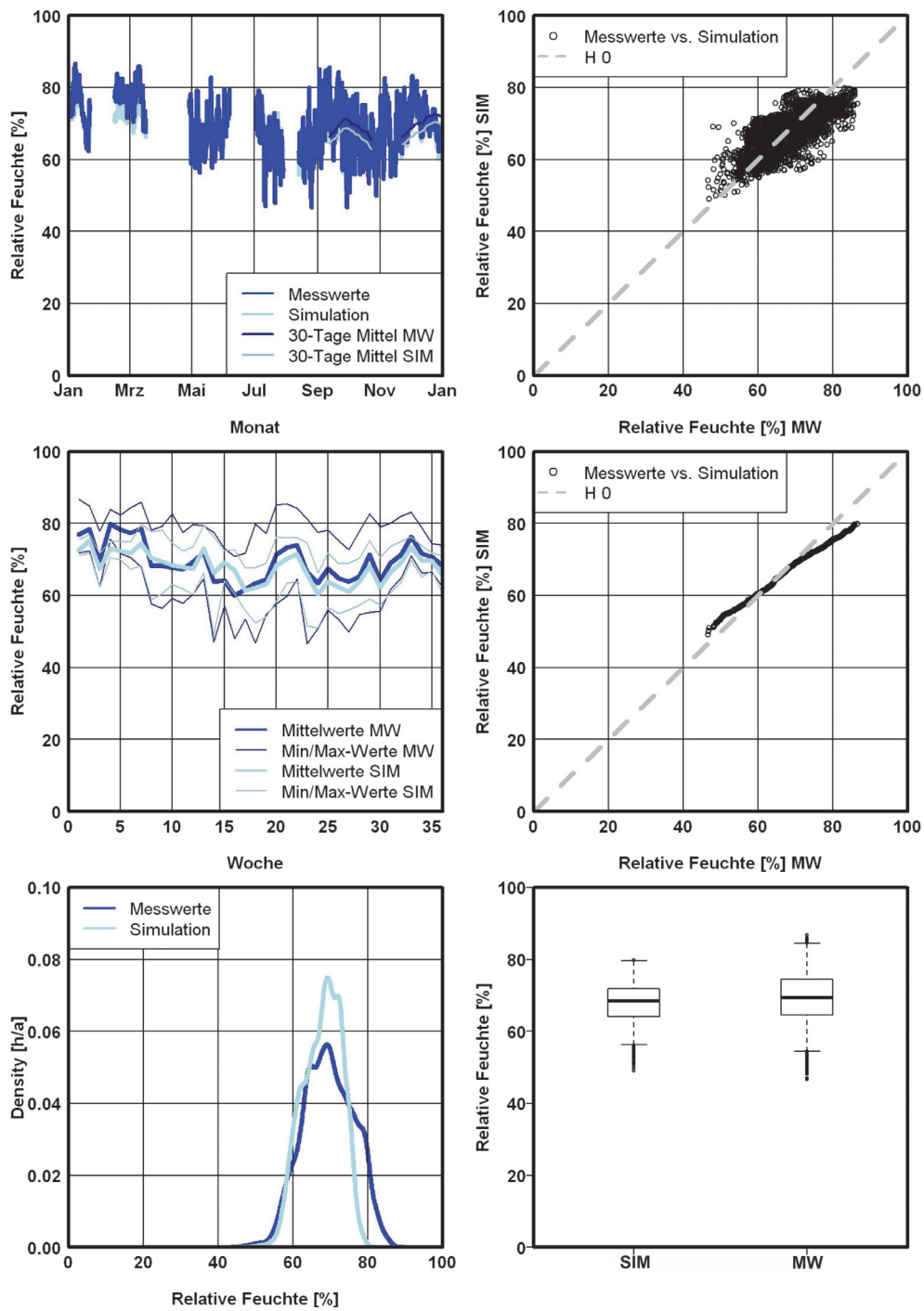


Bild C 19: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation des Parade-schlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 8.

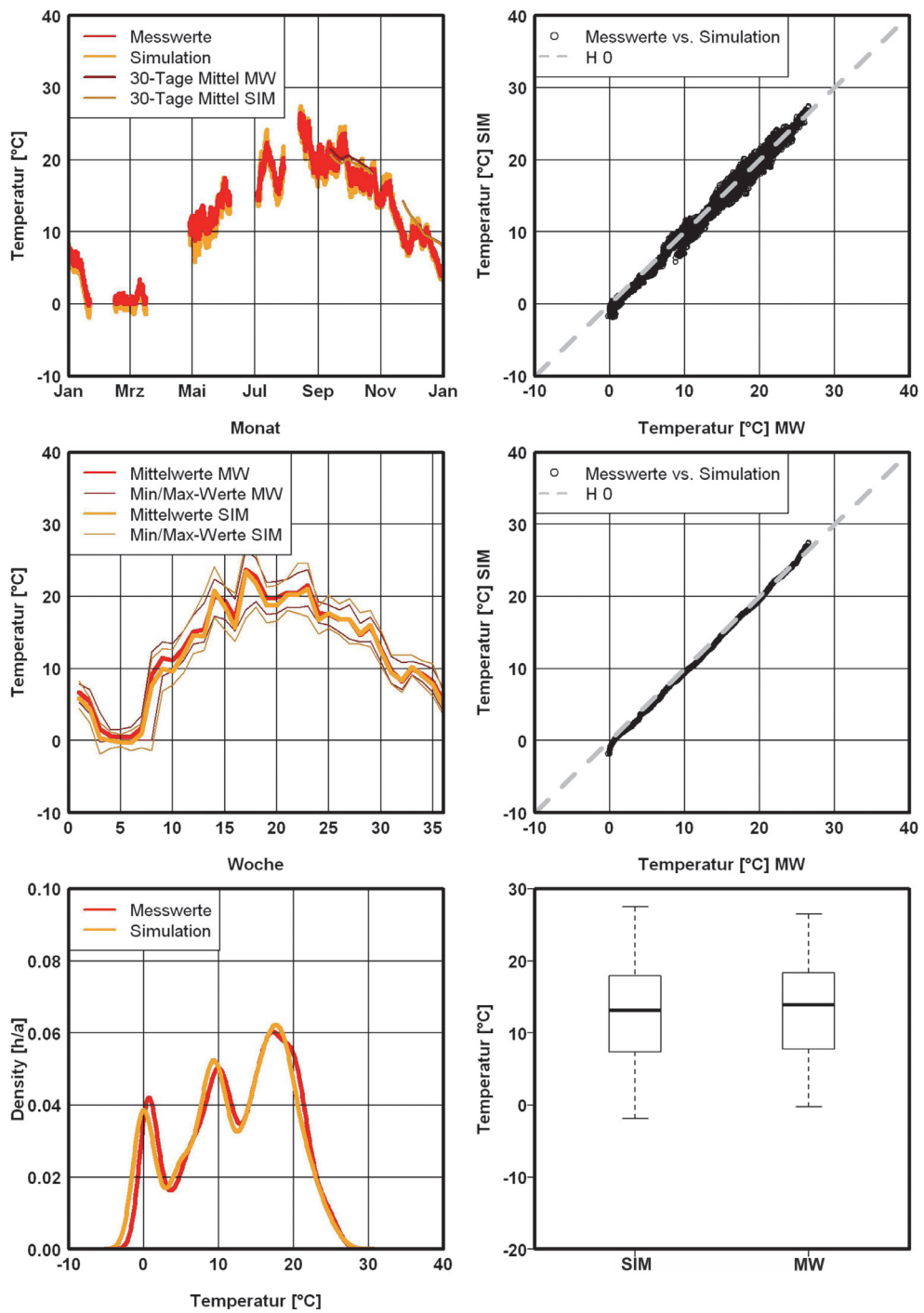


Bild C 20: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof 12-2009 bis 12-2010, Simulation Variante 8.

## Anhang D Statistik Lorsch



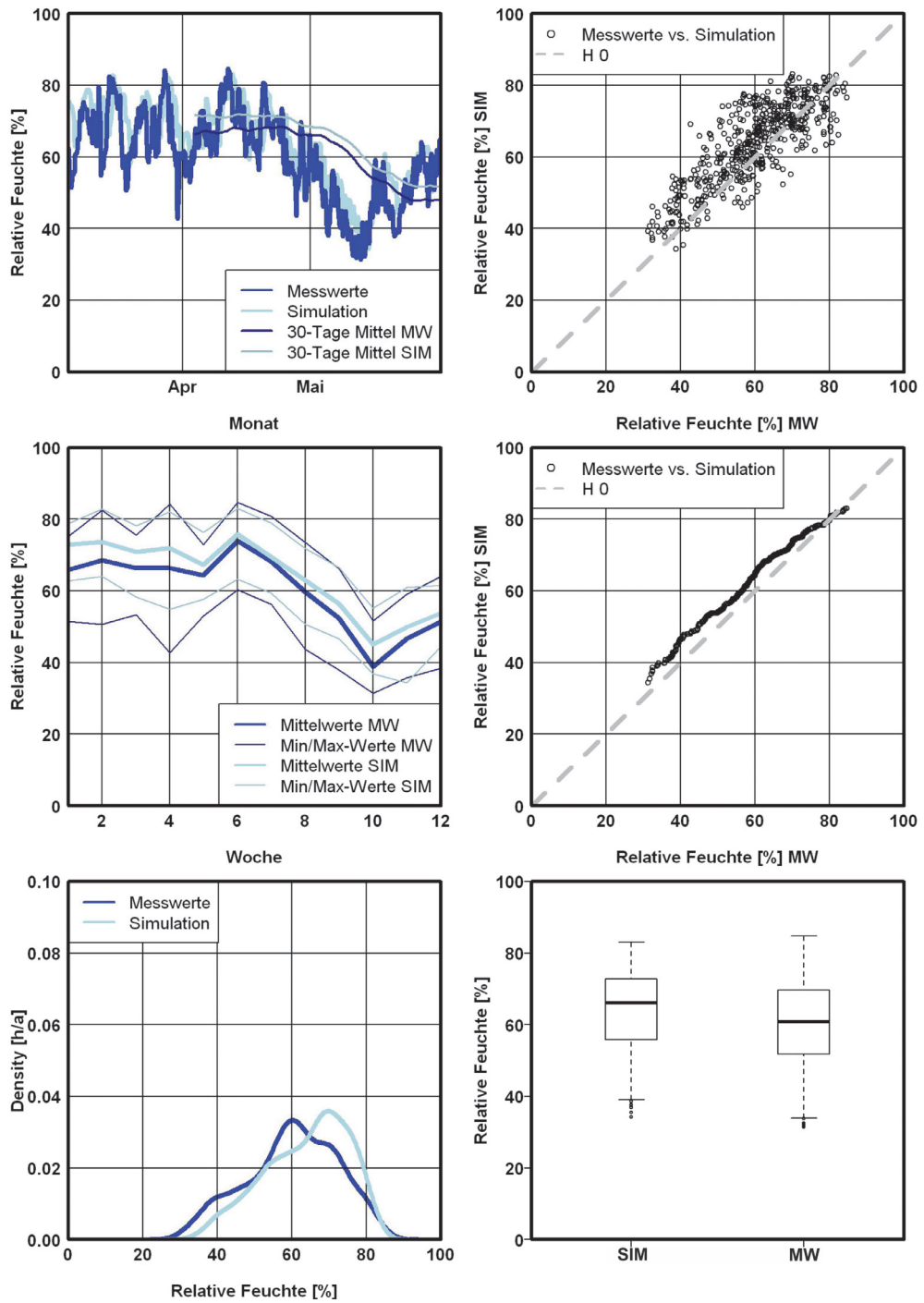


Bild D 1: Statistischer Vergleich der relativen Luftfeuchte, Messung und Simulation der Königshalle in Lorsch, Zeitraum der Modellkalibrierung, März 2008 bis Juni 2008.

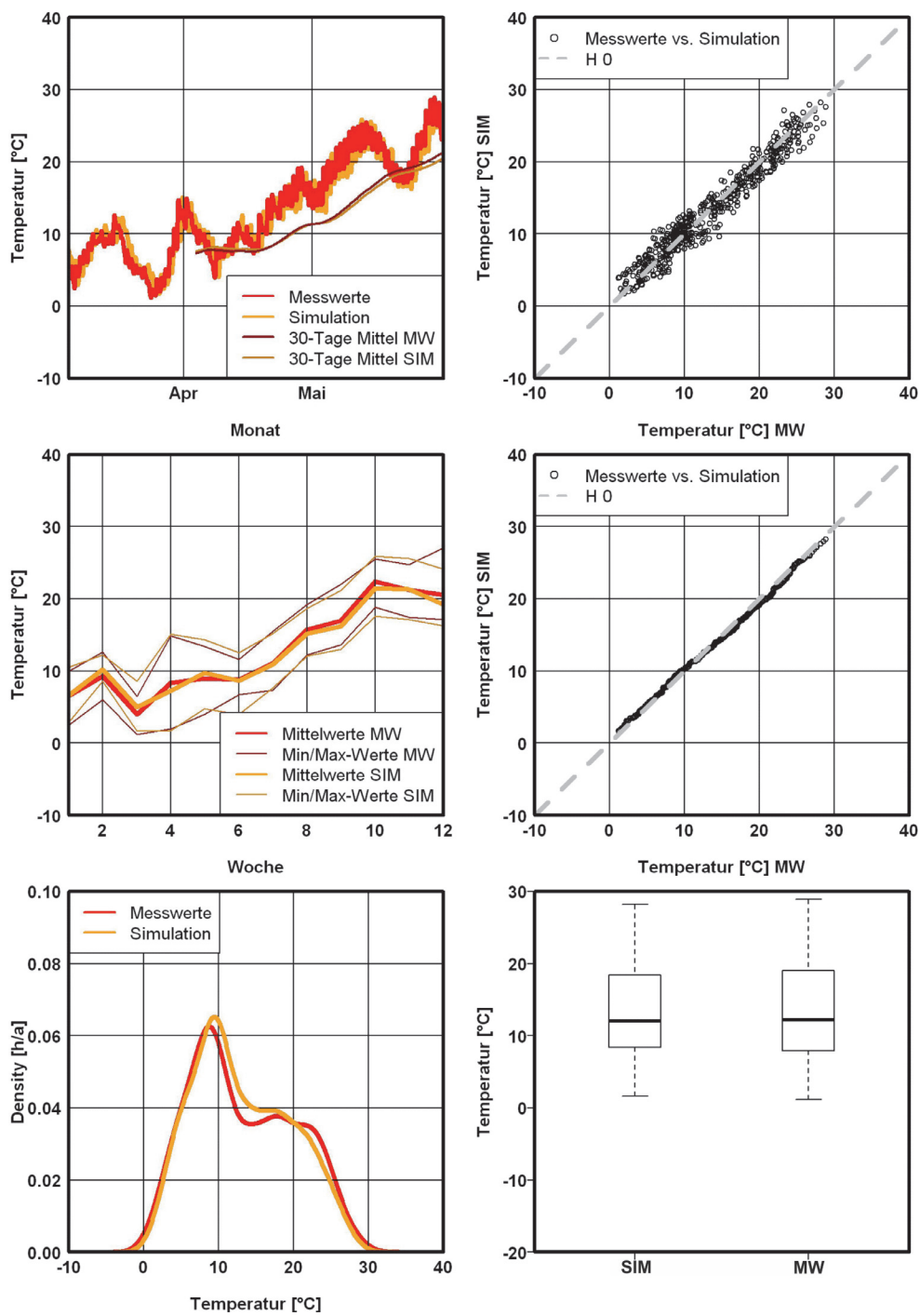


Bild D 2: Statistischer Vergleich der Temperatur, Messung und Simulation der Königshalle in Lorsch, März 2008 bis Juni 2008.

## Anhang E Hygrothermische Kennwerte historischer Materialien

Tabelle E 1: Zusammenstellung der ermittelten Materialkenndaten für die historischen Materialien des Türkischen Saals nach [Wehle 2010].

Bezeichnung	Hygrothermische Standardstoffkennwerte					
	Material (Dicke in mm)	Roh- dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	μ-Wert [-]	s <sub>d</sub> -Wert [m]	Wärme- kapazität [J/kgK]
Unbeschichtetes Holz (20 mm)	440	0,7	26	0,52	1500	0,13
Gefasstes Holz (21 mm)	440	0,7	28	0,59	1500	0,13
Vergoldetes Holz (21 mm)	440	0,7	31	0,65	1500	0,13
Brokatseidengewebe (0,86 mm)	540	0,8	29	0,025	1400	0,06
Brokatseide * (0,36 mm)	826	0,8	52	0,019	1400	0,06
Leinenstoff fein (0,68 mm)	356	0,99	1	0,0013	1400	0,06
Seidenstoff * (0,051mm)	796	0,8	30	0,00125	1400	0,06
Persischer Teppich (0,27 mm)	415	0,8	7	0,019	1400	0,06
Tapete (1,96 mm)	604	0,6	26	0,051	1500	0,12
Leinenstoff grob (1,41mm)	203	0,99	1	0,0014	1400	0,06
Zeitungspapier (0,07mm)	700	0,7	20	0,0014	1500	0,12
Rosshaare	141	0,99	1	1	1400	0,06

\* Werte für Simulation wegen Quellvorgang des Materials angepasst, siehe Tabelle E 3

Tabelle E 2: Ergebnisse der Sorptionsisothermenbestimmung und Messung der freien Wassersättigung zur Approximation der Feuchtespeicherfunktion nach [Wehle 2010].

Bezeichnung	Stoffkennwerte Feuchtespeicherfunktion				
	Wassergehalt der Probe				Freie Sättigung
Material	50 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	65 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	80 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	93 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	uf-Wert [kg/m <sup>3</sup> ]
Unbeschichtetes Holz	39,9	51,5	68,3	85,2	549,1
Gefasstes Holz	-	-	-	-	-
Vergoldetes Holz	-	-	-	-	-
Brokatseidengewebe	-	-	-	-	-
Brokatseide *	54,2	64,1	89,8	141,9	1585,3
Leinenstoff fein	21,8	27,1	36,7	58,8	402,1
Seidenstoff *	54,3	61,6	77,9	136,7	1744,6
Persischer Teppich	18,7	23,7	34,1	53,4	496
Tapete	-	-	-	-	-
Leinenstoff grob	17,9	23,5	31,1	49	341,2
Zeitungspapier	-	-	-	-	-
Rosshaare	17,3	20,6	25,5	38,9	237,2

\* Werte für Simulation wegen Quellvorgang des Materials angepasst, siehe Tabelle E 4

**Tabelle E 3: In der Simulation verwendete, modifizierte Standardstoffkennwerte der Seidenstoffe.**

Bezeichnung	Geänderte Hygrothermische Standardstoffkennwerte					
	Material (Dicke in mm)	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	μ- Wert [-]	s <sub>d</sub> - Wert [m]	Wärme- kapazität [J/kgK]
Brokatseide (0,36 mm)	412,9	0,8	26	0,01	1400	0,12
Seidenstoff (0,051mm)	398	0,8	15	0,001	1400	0,12

Tabelle E 4: In der Simulation verwendete, modifizierte Stoffkennwerte der Feuchtespeicherfunktion der Seidenstoffe.

Bezeichnung	Geänderte Stoffkennwerte Feuchtespeicherfunktion				
	Wassergehalt der Probe				Freie Sättigung
Material	50 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	65 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	80 % .F. [kg/m <sup>3</sup> ]	93 % r.F. [kg/m <sup>3</sup> ]	uf-Wert [kg/m <sup>3</sup> ]
Brokatseide	27,1	32,1	44,9	70,9	792,7
Seidenstoff	27,1	30,8	38,9	68,3	872,3

Die gemessenen Standardstoffkennwerte der Seidenstoffe mussten für die Simulation in WUFI®-Plus modifiziert werden. Da die Stoffe in Wasser quellen, ist der Wassergehalt bei der freien Sättigung im Vergleich zur Porosität in der Simulation zu hoch. Deshalb wurden Rohdichte sowie μ-Wert und s<sub>d</sub>-Wert bei gleich bleibender Porosität halbiert und die Wärmeleitfähigkeit verdoppelt (Tabelle E 3). Auch die entsprechenden Stoffkennwerte der Feuchtespeicherfunktion der Materialien wurden halbiert (Tabelle E 4), um gültige, realistische, Werte zu erhalten. Zur Beschreibung der Messmethoden siehe Kapitel 6.1.3.



## Lebenslauf

Ralf Kilian wurde 1973 in München geboren. Er studierte von 1994 bis 1997 Bauingenieurwesen (Vordiplom) und von 1999 bis 2004 Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft bei Prof. Erwin Emmerling an der Technischen Universität München. In seiner mit dem WTA Preis 2006 ausgezeichneten Diplomarbeit beschäftigte er sich mit dem Thema „Die Wandtemperierung Renatuskapelle in Lustheim“ und deren Auswirkungen auf Raumklima und Erhaltung von Kunstwerken. Ralf Kilian ist seit 2008 Leiter der Arbeitsgruppe „Präventive Konservierung und Denkmalpflege“ am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen. Die Arbeitsgruppe befasst sich mit Fragen der Baudenkmalpflege und Energieeffizienz, mit Nachhaltigkeit bei der Sanierung von Museen sowie mit Raumklima in historischen Gebäuden und Klimawirkungen auf Kunstwerke. Ralf Kilian ist aktives Mitglied bei der Normierungsarbeit am CEN TC 346 „Conservation of Cultural Property“, dort hat er u. a. an Standards zur Beheizung sakraler Gebäude und zu Raumklima für die Erhaltung von Kunstwerken mitgewirkt, wie auch beim WTA „Klimastabilität historischer Gebäude“. Er ist wissenschaftlicher Koordinator des EU-Projekts „Climate for Culture“, das sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das materielle, kulturelle Erbe beschäftigt.

Ziel dieser interdisziplinären Arbeit ist die Definition und Entwicklung neuer Ansätze zur qualitativen Bewertung von hygrothermischen Simulationsmodellen historischer Gebäude im Kontext der Präventiven Konservierung. Die Präventive Konservierung zielt auf die dauerhafte Erhaltung von Kunst- und Kulturgut durch Verbesserung der Umgebungsbedingungen und Minimierung oder Reduzierung der relevanten Risiken. Die Klimastabilität ist dabei eine wesentliche Voraussetzung für die dauerhafte Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung in historischen Räumen.

Die Güte von Simulationen hat für die Bewertung von möglichen Risiken eine besonders große Bedeutung, da Fehleinschätzungen geplanter Maßnahmen irreversible Schäden zur Folge haben können. Daher werden hier Kriterien für eine Bewertung der Qualität der Ergebnisse von Simulationen im Hinblick auf die Präventive Konservierung beschrieben und an drei Fallstudien entwickelt und überprüft.

Die hygrothermische Simulation bietet dabei mit der Betrachtung von Variantenrechnungen vollkommen neue Möglichkeiten zur Analyse des Raumklimas und zur Bewertung der Klimastabilität. Eine Vorgehensweise für die individuelle Festlegung von Bewertungskriterien für die Kalibrierung von Simulationen historischer Gebäude wird vorgestellt. Neue Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren auf die Klimastabilität und zur klimatischen Funktionsweise historischer Räume werden anhand von anschaulichen Beispielen aufgezeigt.

ISBN 978-3-8396-0615-5



9 783839 606155