Michael Krus, Ralf Kilian, Stefan Bichlmair, Barbara Wehle, Klaus Sedlbauer

Dr.-Ing. Martin Krus Fraunhofer-Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

1984 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Karlsruhe. Seit 9/85 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. 1995 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Seit SS 2000 Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart. Seit 10/2000 Technischer Leiter der Prüfstelle "Feuchte/Mörtel/Strahlung/Emissionen". Seit WS 2003/2004 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Rosenheim für "Bauphysik" und seit 1/2004 Stellvertretender Abteilungsleiter der Abteilung Raumklima. Seit 4/2008 Lehrbeauftragter für "Feuchteschutz" und für "Biohygrothermik" bei Master Online Bauphysik an der Universität Stuttgart.



1

Dipl.-Restaurator Ralf Kilian Fraunhofer-Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

Jahrgang 1973. Studium der Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft an der Technischen Universität München. Diplom 2004, WTA-Preis 2006 für Diplomarbeit über die Renatuskapelle in Lustheim. Seither Beschäftigung mit dem Thema Wandtemperierung und deren Auswirkungen auf Raumklima und Erhaltung von Kunstwerken. Seit 2008 Leiter der Arbeitsgruppe "Präventive Konservierung und Denkmalpflege" am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen. Die Arbeitsgruppe befasst sich mit allen Fragen der Baudenkmalpflege, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit bei der Sanierung von Museen, mit Raumklima in historischen Gebäuden und Klimawirkungen auf Kunstwerke. Aktives Mitglied bei der Normungsarbeit am CEN TC 346 "Conservation of Cultural Property" wie auch beim WTA "Klimastabilität historischer Gebäude", Leiter der Arbeitsgruppe "Zielwerte für das Raumklima". Wissenschaftlicher Koordinator des EU-Projekts "Climate for Culture", das sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das materielle, kulturelle Erbe beschäftigt.



Bauphysik-Kalender 2012: Gebäudediagnostik Herausgegeben von Nabil A. Fouad © 2012 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2012 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Dipl.-Ing. Stefan Bichlmaier Fraunhofer-Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

1999 Diplom Holztechnik an der FH Rosenheim. Anschließend 10-jährige Tätigkeit in Planung von Umbauten an Bestandsgebäuden für gewerbliche und private Bauherren in einem Holz-Fertigbaubetrieb.

Seit 2008 berufsbegleitender konsekutiver Masterstudiengang Holztechnik an der nun Hochschule Rosenheim. Seit April 2010 am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in der Abteilung Raumklima in der Arbeitsgruppe "Denkmalpflege und präventive Konservierung" tätig. Im Mai 2011 Abschluss an der HS Rosenheim als "Master of Engineering", seitdem am Fraunhofer-Institut IBP angestellter wissenschaftlicher Mitarbeiter.



Jahrgang 1984. Studium des Innenausbaus an der Hochschule Rosenheim. Diplom 2010 mit der Untersuchung der Einflussfaktoren auf das Raumklima im Königshaus am Schachen, dazu detaillierte numerische Raumklimasimulation. Von September 2009 bis Dezember 2011 Mitabeit in der Arbeitsgruppe "Präventive Konservierung und Denkmalpflege" am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer Fraunhofer-Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

Jahrgang 1965. Studium der Physik an der LMU München. Ab 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart und Holzkirchen. Promotion 2001. Von 2001 bis 2003 stellvertretender Institutsleiter. Sommersemester 2003 Professor an der Fachhochschule Rosenheim. Ab Nov. 2003 Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und Ordinarius des Lehrstuhls für Bauphysik der Fakultät 2 "Bau- und Umweltingenieurwissenschaften" sowie kooptiertes Mitglied der Fakultät 1 "Architektur und Stadtplanung" der Universität Stuttgart. Ständiges Mitglied der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes seit 2003. Mitglied im wissenschaftlichen Beirat des Bundesverbandes für Schimmelpilzsanierung (BSS) seit 2004. Im Juni 2004 Verleihung des WTA-Preises durch die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA). Im November 2005 Verleihung der Ehrennadel der Handwerkskammer Münster für sein Engagement für die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Handwerk. Seit 2007 Mitglied im Senat der Fraunhofer-Gesellschaft. Mitbegründer der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Berufung in den wissenschaftlichen Gutachterausschuss des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie Ernennung zum Sprecher der Fraunhofer-Allianz Bau im Jahr 2008.





Inhaltsverzeichnis

- 2 Klimamesstechnik 4
- 2.1 Einführung 4
- 2.2 Datenerfassung und Messanlage 4
- 2.2.1 Messnetz 5
- 2.2.2 Messgrößen, Sensoren 7
- Messgenauigkeit 9 2.2.3

3 Hygrothermische Rechenverfahren zur Bauwerksdiagnose 10

- 3.1 Rechenverfahren WUFI® 10
- Raumklimamodell WUFI®-Plus 11 3.2
- 3.3 Biohygrothermisches Modell WUFI[®]-Bio 12
- 3.3.1 Beschreibung der beiden Modelle 12
- 3.3.1.1 Biohygrothermisches Modell WUFI®-Bio 12
- 3.3.1.2 Viitanen-Modell (VTT-Modell) 14
- 3.3.1.3 Grundlegende Unterschiede beider Modellansätze 14 3.3.2
- Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index 14
- 3.3.2.1 Parametervariationen 15
- 3.3.2.2 Entwicklung der Umrechnungsfunktion 15

Das Königshaus am Schachen 16 4

- 4.1 Restauratorische Untersuchungen 16
- 4.1.1 Baukonstruktion 17
- 4.1.2 Klimatisierung und Besucher 17
- 4.1.3 Empfehlungen aus restauratorischer Sicht 18
- 4.2 Bauphysikalische Untersuchungen 18
- 4.2.1 Luftwechselmessung 18 4.2.2
- Ermittlung der Materialkenndaten 18
- 4.3 Klimadatenerfassung 19 4.3.1
- Außenklima 19
- 4.3.2 Raumklima im Türkischen Saal 19
- Hygrothermische Gebäudesimulation 23 4.4
- 4.4.1 Simulation des Türkischen Saals 23 Statistischer Vergleich von Messung 4.4.2 und Simulation 23
- 4.5 Feuchtepufferung durch Materialien 24
- 4.6 Berechnung des Schimmelpilzrisikos durch erhöhtes Besucheraufkommen 24
- 4.7 Zusammenfassung und Ausblick 27
- 5
- Schloss Linderhof 28 5.1 Allgemeines 28
- 5.2
- Baugeschichte und Konstruktion 28

- 5.3 Nutzung Schloss Linderhof 29
- Besucher, Aufenthaltsdauer, Profile für Wärme-5.3.1 und Feuchteabgabe 29
- 5.3.2 Lüftung, Luftwechselrate und Luftwechselprofil 29
- Raumklima 30 5.4
- 5.4.1 Die Prunkräume im Vergleich 30
- 5.4.2 Raumklima im Paradeschlafzimmer 32
- Besucherkomfort und Schwüle 34 5.4.3
- Schwankungen der relativen Feuchte 34 5.4.4
- 5.5 Gebäudesimulation des Paradeschlafzimmers 35
- 5.5.1 Gebäudemodell Paradeschlafzimmer 35
- 5.5.2 Ablauf und Ergebnisse der Simulation 35
- 5.5.3 Simulation einer Änderung der Belüftung 36 5.6 Berechnung des Schimmelpilzrisikos im
- Raum Anrichte 37
- 5.6.1 Istzustand 37
- Zur Schimmelpilzvermeidung erforderliche 5.6.2 Maßnahmen 39
- 5.7 Zusammenfassung und Maßnahmenempfehlungen 40

Renatuskapelle, Lustheim 40 6

- 6.1 Problemstellung 43
- 6.2 Klimamesstechnik 43
- Messpositionen 43 6.2.1
- Raumklima 45 6.3
- 6.4 Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung 45
- Durchführung der Untersuchungen 46 6.4.1
- 6.4.2 Ergebnisse der Untersuchungen 47
- 6.4.2.1 Trocknung durch Bauteiltemperierung 47
- 6.4.2.2 Energieverbrauch 50
- 6.4.2.3 Aufsteigende Feuchte 50
- 6.4.2.4 Diffusion nach innen 50
- 6.4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse 51 6.5 Zusammenfassung und Vorschläge
- für Maßnahmen 51
- 7 Fazit und Ausblick 52
- 7.1 Klimastabilität historischer Gebäude 52
- 7.2 Raumklima-Simulation von historischen
- Gebäuden 52
- 7.3 Raumklima für die Präventive Konservierung 52
- 7.4 Verbesserung des Raumklimas 53
- 8 Literatur- und Quellenverzeichnis 53

3

1 Hintergrund und Auswahl der untersuchten historischen Gebäude

Zahlreiche Schäden an Kunstwerken können auf klimatische Einflüsse zurückgeführt werden. Vor dem Hintergrund einer immer stärkeren Auslastung der Baudenkmäler in Deutschland durch Tourismus und Eventveranstaltungen sowie extreme Wetterlagen infolge des globalen Klimawandels stellt sich die Frage, wie unser kulturelles Erbe besser geschützt werden kann.

Das Raumklima ist dabei für die Erhaltung von zentralem Interesse, denn durch ein ungünstiges Klima - etwa zu hohe Feuchten oder große tägliche Schwankungen der relativen Feuchte - können Kunstwerke Schritt für Schritt zerstört werden. Für die Klimatisierung historischer Räume gibt es unterschiedliche Ansätze. Während im 20. Jahrhundert in den Zeiten voller Kassen und freier Nutzung von energetischen 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 Bauphysik bietet für die Konservierungswissenschaft zahlreiche neue Möglichkeiten. In den letzten Jahrzehnten wurden grundlegende Erkenntnisse über den Transport von Wärme und Feuchte in Materialien gewonnen, die nun auch zur Untersuchung historischer Materialien und Räume zur Verfügung stehen. Durch die hygrothermische Gebäudesimulation können klimatische Bedingungen in Bauteilen sowie in ganzen Gebäuden beurteilt werden und Vorhersagen getroffen werden. So können Maßnahmen, die das Klima im Innenraum betreffen, oder die Veränderung von Bauteilen oder der Konstruktion, bereits im Vorfeld auf ihre Wirkung hin beurteilt werden.

Historische Räume stellen dabei eine besondere Herausforderung dar, da sie nur schwer zu simulieren sind. Das liegt zum einen daran, dass Materialien und Konstruktion meist nicht hinreichend bekannt sind, vor allem aber, dass es sich meist um extrem komplexe Räume und Ausstattungen handelt.

Kunstwerke bestehen fast immer aus mehreren Schichten unbekannter Stärke und Zusammensetzung, die zudem durch Alterung eine Veränderung ihrer Eigenschaften erfahren haben. In den meisten Fällen ist es überdies nicht möglich und auch nicht zielführend, Proben von den verschiedenen Materialien zu nehmen, um deren Eigenschaften zu messen. In historischen Gebäuden können nicht ohne Weiteres Öffnungen angelegt werden, um alle Maße und Materialdicken zu ermitteln, die für eine Simulation ggf. notwendig sind.

Um die Auswirkung von Wetter, Besuchern und weiteren Einflussgrößen auf das Innenraumklima einschätzen zu können, ist es erforderlich, unterschiedliche historische Bauten und ihre Ausstattungen detailliert zu untersuchen. Die Leitung des Restaurierungszentrums der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen hat in enger Zusammenarbeit Schloss Linderhof und das Königshaus am Schachen als Untersuchungsobjekte zur Verfügung gestellt. Das Raumklima in der Renatuskapelle in Lustheim wird ebenfalls betrachtet.

2 Klimamesstechnik

Jedes Gebäude erfordert aufgrund seiner Bauweise, den damit verbundenen Fragestellungen, der Zielrichtung der Untersuchungen und den vorliegenden Randbedingungen eigene angepasste Lösungen zur Wahl der Klimamesstechnik. Am Beispiel der im Schloss Linderhof eingesetzten Anlage sollen hier beispielhaft ein Messkonzept erläutert werden. Informationen zu den Messkonzepten in den beiden anderen Untersuchungsobjekten, Königshaus am Schachen und Renatuskapelle in Lustheim, werden in Abschnitt 4.3 und 6.2 gegeben.

2.1 Einführung

Für die Erfassung der erforderlichen Raumklimadaten wurden je zwei unterschiedliche Messsysteme verwendet. Für die Gebäudesimulation werden weitere Daten als Rechenparameter benötigt. Es werden das Umgebungsklima außen und angrenzende Innenklimate vorgestellt sowie die Lüftungssituation des Gebäudes dargestellt.

Wesentlich für die instationäre Berechnung sind die angrenzenden Klimata. Diese sind für die Simulation des Paradeschlafzimmers das gemessene Außenklima sowie die gemessenen Innenklimate der angrenzenden Räume. Die Klimadatensätze beziehen sich alle auf das Simulationsjahr vom 1.12.2009 bis 1.12.2010 mit 8760 Stunden. Die tatsächliche Anzahl vorhandener Messwerte, abweichend von den 8760 Stunden, werden zu jedem Klimadatensatz angegeben.

2.2 Datenerfassung und Messanlage

Aus den verschiedenen Daten vom Messnetz und von den Datenloggern wurden möglichst kongruente Datensätze zusammengestellt. Für die Simulation wurden Datenlücken mit generischen Daten ergänzt.

Die hier dargestellten Daten sind die verwertbaren Messwerte aus dem Messnetz bzw. den teilweise parallel laufenden unabhängigen Redundanzmessungen. Die aufgezeichneten Messdaten wurden auf Fehler überprüft und diese ggf. entfernt. Bei parallelen Messergebnissen, wie z. B. parallel laufenden Redundanzmessungen, wurde ohne Präferenz für eine Messreihe entschieden. Es folgte die Aneinanderreihung der Messdaten.

In den Datensätzen werden die gemessene relative Feuchte und die Lufttemperatur sowie die daraus berechnete absolute Feuchte gezeigt. Zusätzlich zur grafischen Darstellung der verwendeten Klimata erfolgt

5

eine kurze statistische Auswertung der Messdaten in tabellarischer Form. Für die Kurzstatistik werden nur die Messdaten verwendet. Durch die fehlenden Daten sind die statistischen Werte teilweise nur beschränkt aussagekräftig.

Zusätzlich zum Simulationsjahr werden einige ausgewählte Datensätze über den kompletten Messzeitraum dargestellt. Ebenso werden weitere Klimamessungen für einen kompletten Jahreszyklus für die restlichen Räume im Schloss vorgestellt, soweit Messdaten vorliegen.

2.2.1 Messnetz

Für den Aufbau der Messanlage wurde Ende 2007 am Fraunhofer IBP¹) ein Messplan entwickelt. Anhand dieser Vorgaben wurde durch eine Kooperationsfirma Anfang 2008 die Messanlage installiert. Im Vorfeld der Arbeiten sind die zum Einsatz gebrachten Sensoren in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP weiterentwickelt und nach Abschluss der Testphase kalibriert worden. Zeitgleich wurden zu der Messanlage in ausgewählten Räumen weitere netzunabhängige Datenlogger als zusätzliche Sicherheit (Redundanz) aufgestellt.



Bild 1. Kartierung Messnetz im Obergeschoss²⁾. Im Plan wird die Lage der Sensoren im Gebäude dargestellt. Die dunkel hinterlegten Positionsnummern sind Sensoren, die an das Messnetz angeschlossen sind. Hellgrau hinterlegt sind die unabhängig vom Messnetz positionierten Datenlogger als redundante Messung. In den Räumen 102 "westl. Gobelinzimmer" und 107 "Paradeschlafzimmer" wurden zusätzliche CO₂-Messungen vorgenommen (Grundriss BSV)

1) Den Messplan erstellte Ralf Kilian.

2) Der Grundriss wurde von der Bayerischen Schlösserverwaltung (BSV) zur weiteren Bearbeitung Verfügung gestellt.

Nabil A. Fouad · Bauphysik-Kalender 2012 H:/v/vch/03996_Bauphysik_2012/satz/D_03_Bauphysik2012.3d – Seiten 1–54 10.01.2012, Seite 1





Bild 2. Kartierung Messnetz im Dachgeschoss. Der Sensor Nr. 35 befindet sich im abgeschlossenen Luftraum zwischen begehbarem Boden und abgehängter Decke über dem Raum 112 "Spiegelsaal". Die übrigen Sensoren befinden sich im Speicherraum (Grundriss BSV)

Die lokale Messvorrichtung besteht aus Sensoren zur Erfassung der Messgröße, der Datenleitung zur Netzverbindung und dem Messrechner mit einer firmenspezifischen Software zur Verwaltung der eingehenden Messdaten. Die Datenleitung dient zugleich als Spannungsversorgung der Sensoren. Betrieben wird das Netz als Controller Area Network (CAN) Bussystem. Der Vorteil des CAN Bussystems besteht in der hohen Übertragungssicherheit der Daten und einfachen Bedienbarkeit³). Von dem Messrechner ausgehend besteht eine Internetverbindung via ISDN. Die Daten werden einmal täglich über die Internetverbindung an die Herstellerfirma verschickt. Nach einer Dateikonvertierung

3) Die Angaben wurden von der Herstellerfirma übernommen.

erfolgt die Versendung an den Datenbankserver des Fraunhofer IBP.

Nach einer ersten Testphase der noch nicht vollständigen Messanlage von Februar bis März 2008 erfolgte der weitere Ausbau der Anlage. Wegen diverser Schwierigkeiten während des Ausbaus sowie bei der Etablierung der Internetanbindung wurde die Anlage letztendlich erst im Frühjahr 2009 in Betrieb genommen. Seit dem 25.03.2009 werden die Messdaten des Messnetzes täglich übertragen und aufgezeichnet.

Der Messplan oder die Kartierung der Sensoren beinhaltet in erster Linie die Lage der Sensoren und nur ergänzend eine schematische Darstellung der Netzwerkverbindung. Die Kartierung wurde entsprechend der tatsächlichen Ausführung ergänzt. Die Bilder 1 und 2 zeigen für das Ober- und das Dachgeschoss den

Klimamesstechnik

7

Stand des Messnetzes seit März 2009 mit aktuellen Korrekturen zu Bezeichnungen und Darstellungen. Die Beschriftungen in der Kartierung benennen die Räume sowie die Sensoren. Die Bezeichnung der am Netz angeschlossenen Sensoren ist die interne Nummerierung der Softwareverwaltung des Messnetzes. Die Bezeichnung der Datenlogger ist die Herstellernummer der Datenlogger.

2.2.2 Messgrößen, Sensoren

Es werden die relative Luftfeuchte, Temperatur, Türund Fensteröffnungen sowie CO₂-Gehalte an ausgewählten Positionen gemessen. Die Messgröße wird mit dem Sensor erfasst, in ein digitales Signal umgewandelt und in das CAN-Datennetz (RJ 45) eingespeist. Die Versorgungsspannung für das Messnetz bzw. der Sensoren beträgt 12 V. Für die CO₂-Sensoren wurde ein zusätzliches Messnetz mit einer 24-V-Versorgungsspannung erforderlich. Eine komprimierte Übersicht der Sensoren enthält Tabelle 1.

Raum Nr.	Raum	Temperatur und rel. Feuchte	Oberflächen- Temperatur und rel. Feuchte	CO ₂	Türkontakt	Datenlogger Temperatur und rel. Feuchte
Außen						
107	Außen: Nordseite OG	1				1
OG						1
101	Treppenhaus	1				
102	Westliches Gobelinzimmer	1		1	5	
103	Gelbes Kabinett	1				
104	Audienzzimmer	1				
105	Lila Kabinett	1	1			
107	Paradeschlafzimmer	1		1		1
108	Rosa Kabinett	1				
109	Speisezimmer	1				
110	Blaues Kabinett	1				
111	Östliches Gobelinzimmer	1			1	
112	Spiegelsaal	1			3	1
EG		I				II.
001	Äußeres Vestibül EG	1			1	1
002	Inneres Vestibül EG	1	2			
003	Dienerschaftszimmer	1			1	1
011	Küche	1				
015	Kühlraum	1				
017	Vorraum Museumsverkauf	1			1	1
018	ehem. Ankleide / Leiterlager	2	1			
020	Bad	1	3			
021	Tischlein deck Dich / Anrichte	1	1			
DG						1
207	Dachraum Paradeschlafzimmer	1				1
212	Dachraum Spiegelsaal	1				
202	Dachraum westliches Gobelin					
212	Hohlraum über westl. Gobelin	1				
	Summe	25	8	2	12	7
		T, rF	T, rF _{Of}	C0 ₂	Tür-Fenster	Redundanz
		CAN Netz	53	1	Datenlogger	7

Tabelle 1. Übersicht der Sensoren



Bild 3. Nahaufnahme des Kohlendioxid-Sensors sowie Raumluftsensor des CAN-Messnetzes und des Datenloggers zur redundanten Raumluftmessung im Raum 107 "Paradeschlafzimmer"

Die Messung der Raumluftfeuchte erfolgt mit kapazitiven Feuchtemessern, die mit der Temperaturmessung zu einer Sensoreinheit als Kombisensor verbaut sind. Die Sensoren für die Messung der Raumlufttemperatur sowie der Oberflächentemperatur sind vom gleichen Typ. Bei den Oberflächensensoren wurden die Messfühler in ein Aluminiumgehäuse eingebaut. Die Sensoren sind in den Räumen unter Berücksichtigung des Museumsbetriebs sowie restauratorischer Belange verlegt worden. Hierbei mussten hinsichtlich einer optimalen Sensoranordnung in der Raummitte Kompromisse eingegangen werden. In den Prunkräumen wurden die



Bild 4. Datenlogger mit Raumluft-Sensor im Raum 107 "Paradeschlafzimmer", daneben der Raumluftsensor des Messnetzes

Feuchte und Temperatursensoren überwiegend in ca. 0,5 bis 1 m Höhe an dem vorhandenen Mobiliar lose befestigt. Die Sensoren selber ragen am Kabel in der Regel ca. 10 bis 20 cm frei in den Raum. Die folgenden Fotos (Bilder 3 bis 5) stehen beispielhaft für die Installation der Sensoren. Auszugsweise werden nachfolgend die verschiedenen installierten Sensoren abgebildet:

- Kohlendioxid Sensor
- Datenlogger der Redundanzmessung
- Raumluftsensor
- Oberflächensensor
- Türkontakt



Bild 5. Übersichtsfoto und Nahaufnahme eines Oberflächensensors und Raumluftsensors im Raum 002 "Inneres Vestibül"

Kohlendioxid-Sensor

Die Kohlendioxidmessung erfolgt in der vorgeschriebenen senkrechten Montageposition in ca. 0,5 m Höhe an der Wand bzw. im Bereich der verschlossenen Kamine, wie in Bild 3 abgebildet.

Datenlogger

Die Datenlogger sind unabhängig vom Messnetz aufzeichnende Messgeräte. Zum Einsatz kamen Raumluftsensoren gleichen Typs wie die im Messnetz verwendeten. In Bild 4 ist der Datenlogger auf einem Kaminsims platziert. Zu erkennen ist der Anschluss eines Mini-USB-Ports zum Aufladen des in das Gehäuse integrierten Akkus und zum Auslesen der Daten.

Oberflächensensor

Die teilweise zusätzlichen Oberflächenfühler sind mit einer dünnen Heißkleberschicht an der Oberfläche befestigt. Der Temperaturfühler ist direkt mit dem Aluminiumgehäuse verbunden. Das Gehäuse wiederum ist mit einer ca. 0,2 bis 0,5 mm dicken Kleberschicht auf die Oberflächen geklebt. Die Anklebung erfolgte an untergeordneten Bereichen mit Steinoberflächen bzw. an Stellen mit geringer kunsthistorischer oder restauratorischer Bedeutung. In Bild 5 werden ein Oberflächenfühler und ein Raumluftsensor gezeigt.

2.2.3 Messgenauigkeit

Messgenauigkeit Sensoren

Die Genauigkeit der Sensoren wird im Folgenden für die Temperatur und Feuchtesensoren näher erläutert. Die Überprüfung der Messgenauigkeit und Kalibrierung der eingebauten Feuchte- und Temperatursensoren wird im Anschluss daran gegeben.

Allgemeine Angaben zur Messgenauigkeit der Feuchte- und Temperatursensoren

Messgenauigkeit

Für die kapazitive Feuchtemessung wird vom Lieferanten eine Messgenauigkeit für die relative Feuchte im Messbereich von 0 bis 90 % mit \pm 2%-Punkten angegeben. Für Werte über 90 % relativer Feuchte wird eine Genauigkeit von \pm 4%-Punkten angegeben. Die Temperaturmessung mit Transistoren erfolgt mit einer Genauigkeit von \pm 0,5 °C (> 0 °C) und \pm 1,5 °C (< 0 °C).

Langzeitstabilität

Nach Auskunft des Lieferanten haben die Sensoren eine hohe Langzeitstabilität von < 1%-Punkten relativer Feuchte pro Jahr. Dieses Abweichen des Messergebnisses mit der Zeit wird auch als "Driften" bezeichnet. Die vorhandene Luftfeuchte kann Einfluss auf die Langzeitstabilität haben. Eine Überprüfung der Langzeitstabilität erfolgt über regelmäßige Kontrollmessungen bei definierten Prüfbedingungen.

Wiederholbarkeit der Messung

Vom Hersteller wird für die Messwiederholung eine Genauigkeit von 0,1%-Punkten bei der relativen Feuchte und 0,1°C bei der Temperaturmessung angegeben.

Überprüfung der eingebauten Feuchte- und Temperatursensoren

Die Kombisensoren für die Feuchte- und Temperaturmessung sowie CO₂-Messung wurden vor dem Einbau überprüft und kalibriert. Dies war Ende 2007 Teil einer Forschungskooperation zur Weiterentwicklung der verwendeten Sensoren. Die Kalibrierung erfolgte in zum Teil eigens konstruierten Prüffässern mit Salzlösungen sowie in den am Fraunhofer IBP vorhanden Klimaräumen. Die Messgenauigkeit wurde, wie für diesen Sensortyp (kapazitive Feuchtemessung) üblich, mit einer 2-Punkt Kalibrierung auf $\pm 2\%$ relative Feuchte einjustiert und an zusätzlichen Messpunkten geprüft.

- Raumklimata der Klimaräume 50% rel. Feuchte / 23 °C,
- 65% rel. Feuchte / 23°C,
 65% rel. Feuchte / 23°C,
- 80% rel. Feuchte / 23 °C.

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Messgenauigkeit der Sensoren überprüft. Für eine erste Einschätzung wurden mit einem geeichten Handmessgerät parallel zu den eingebauten Sensoren über mehrere Messintervalle gemessen. Zusätzlich erfolgte mit dem Datenlogger Nr. 53 für die Redundanzmessung aus dem Raum 107 "Paradeschlafzimmer" eine Überprüfung in der Klimakammer über mehrere Stunden. Eine Abweichung zu der vom Lieferanten angegebenen Messgenauigkeit wurde bei einigen Sensoren festgestellt.

Die Temperaturmesswerte sind bei allen bis auf einen Sensor im Bereich der angegebenen Toleranz von $\pm 0,5$ °C. Bei den Feuchtemesswerten sind bei 14 von 27 Sensoren eine Abweichung über der angegebenen Toleranz von $\pm 2,0$ % relativer Feuchte, sowie 1 defekter Sensor festzustellen. Die höhere Abweichung kann teilweise durch eine Verschiebung durch Langzeitdrift der Sensoren erklärt werden. Für die erste Kalibrierung im Jahr 2008 wurde keine Messabweichung von den Sollwerten der 2-Punkt-Kalibrierung dokumentiert. Lediglich die Einhaltung der Toleranz von $\pm 2,0$ % relativer Feuchte wird bestätigt. Eine nachträgliche Korrektur der Werte wurde nicht durchgeführt.

Im Folgenden wird auf einen Aufzeichnungsfehler der Messanlage eingegangen. Während dieses Zeitraums sind, wie gezeigt wird, nur Tagesmittelwerte sinnvoll verwendbar. Unter dieser Voraussetzung relativiert sich ein hoher Anspruch an die Messgenauigkeit für diesen Zeitraum. Wegen eines darauffolgenden Ausfalls des Messrechners werden erst ab dem 15.01.2010 wieder Messdaten aufgezeichnet. Die festgestellte Abweichung der Sensoren kann, je nach Anwendung, ggf. für Werte ab diesem Zeitpunkt berücksichtigt werden.

Kalibrierergebnis der Feuchte- und Temperatursensoren

Aufgrund der Ergebnisse der Vorprüfung und der Tatsache, dass die erste Kalibrierung ca. 2¹/₂ Jahre her war, wurde eine Neukalibrierung sämtlicher Feuchte- und Temperaturfühler festgelegt. Die Kalibrierung erfolgte durch das ausführende Unternehmen in einer eigenen Kalibrierkammer. Diese Kalibrierkammer wird mit ei-

9

nem automatisch ablaufenden Prüfschema gesteuert. Die Prüfklimata werden mit Salzlösungen eingestellt. Zur Feststellung des sich tatsächlichen einstellenden Prüfklimas wird mit einem Taupunktspiegel (Messgerät wird jährlich geeicht) zusätzlich gemessen. Die neu justierten Sensoren messen ohne Ausnahme innerhalb des angegebenen Toleranzbereichs bei drei unterschiedlichen Prüfklimata. Zu beachten sind die unterschiedlichen Toleranzbereiche. So wird für die Messung der relativen Feuchte von über 90% ein Toleranzbereich von $\pm 4\%$ -Punkte angegeben.

Die neu kalibrierten Sensoren wurden am 28.05.2010 eingebaut und die Messanlage wieder in Betrieb genommen. Wegen danach aufgetretener Übertragungsfehler in der Datenübermittlung per Internet sowie zeitweiser Aufzeichnungsfehler musste der Messrechner ausgetauscht werden. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte wieder ab 02.06.2010.

3 Hygrothermische Rechenverfahren zur Bauwerksdiagnose

Bereits seit einiger Zeit sind Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen dem Praktiker verfügbar (z. B. MATCH [1], WUFI[®] [2], Delfin, vormals DIM [3]). Die steigende Anzahl von einschlägigen Fachveröffentlichungen zeigt, dass diese Verfahren auch zunehmend eingesetzt werden. Wegen der starken Einschränkungen der stationären Dampfdiffusionsbetrachtungen nach *Glaser* wird inzwischen auch in der Neufassung der DIN 4108-3 [4] zur Beurteilung von begrünten Dachkonstruktionen oder zur Berechnung der Austrocknung von

Rohbaufeuchte auf diese instationären hygrothermischen Berechnungsmodelle verwiesen. Zur Qualitätssicherung der modernen Rechenverfahren und ihrer Nutzung wurden von der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege) zwei Merkblätter erstellt [5, 6], die dem Praktiker bei der Auswahl und Anwendung dieser Rechenverfahren helfen sollen. Auf Basis dieser Merkblätter entstand die CEN-Norm EN 15026 "Hygrothermal performance of building components and building elements - assessment of moisture transfer by numerical simulation" [2]. Die Entwicklung der instationären Rechenverfahren ist jedoch nicht allein darauf ausgerichtet, alte Beurteilungsmethoden zu ersetzen, sondern die Möglichkeiten des modernen Feuchteschutzes zu erweitern und andere Anwendungsgebiete zu erschließen. Im Folgenden werden deshalb einige aktuelle Entwicklungen im Bereich der hygrothermischen Modellierung skizziert.

3.1 Rechenverfahren WUFI®

Aus den von *Künzel* [2] beschriebenen physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports lässt sich ein geschlossenes Differenzialgleichungssystem entwickeln, mit dem man das Feuchteverhalten mehrschichtiger Bauteile unter natürlichen Klimarandbedingungen berechnen kann. *Künzel* [2] gibt einen Überblick über die Feuchtetransportphänomene, die abhängig vom Aggregatzustand in porösen mineralischen Baustoffen auftreten können. Einige Transporteffekte sind unter praktischen Bedingungen am Bau weniger bedeutsam und werden deshalb nicht berücksichtigt. Folgende Transportmechanismen sind hingegen wesentlich für bauphysikalische Betrachtungen:



Bild 6. Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer zweischaligen, nach Westen orientierten Außenwand mit Kerndämmung

- Die Dampfdiffusion beruht auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand.
- Die Oberflächendiffusion stellt den Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe dar.
- Die Lösungsdiffusion findet nur in nichtporösen Stoffen, z. B. organischen Polymeren, statt. Der Wassertransport erfolgt durch An- und Einlagern von Wassermolekülen in die Makromoleküle der Polymere auf der feuchten Seite. Durch Quellvorgänge werden dabei neue Porenräume für das Wasser geschaffen, in denen sie zur trockneren Seite wandern.
- Die Kapillarleitung stellt den Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen dar.

In [2] wird außerdem festgestellt, dass zur Berechnung des nicht isothermen Feuchtetransports in porösen Stoffen zwei unabhängige treibende Potenziale erforderlich sind. Einfache und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtetriebkräfte "Dampfdruck" und "Kapillardruck". Der schwer messbare Kapillardruck lässt sich über die Kelvin-Beziehung in die relative Feuchte umrechnen. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotenziale dar, die allgemein bekannt und einfach zu messen sind. Das resultierende gekoppelte Gleichungssystem ist mittels des Programms WUFI® numerisch lösbar. Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtefelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen erhalten. Aus diesen Ergebnissen können sowohl die langzeitlichen Verläufe der hygrothermischen Parameter (Temperatur, relative Feuchte, Wassergehalt) an verschiedenen Positionen im Bauteil als auch deren örtliche Verteilungen (Profile) zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden.

Hygrothermische Rechenverfahren zur Bauwerksdiagnose 11

Eine zweckmäßige und sehr anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. Bild 6 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Berechnung des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

3.2 Raumklimamodell WUFI[®]-Plus

Ein wichtiger Schwerpunkt aktueller Forschung ist die Verknüpfung der hygrothermischen Bauteilberechnung mit der energetischen Gebäudesimulation [7-9]. Durch diese Verknüpfung können auch die Wärme- und Feuchte-Wechselwirkungen zwischen dem Gesamtgebäude und seinen Bauteilen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Feuchtepufferwirkung der Umschließungsflächen bei Änderungen der Feuchtelast im Raum oder die Feuchtesorption bzw. -desorption bei Temperaturänderungen an den Bauteiloberflächen (z.B. durch die strahlungsbedingte Bauteilerwärmung oder nächtliche Abkühlung). Ein wesentlicher Zweck dieser Entwicklung ist die Verwendung von Planungswerkzeugen zur Schaffung eines behaglichen und im Falle von historischen, mit Kulturgütern versehenen, Gebäuden oder Räumen schadensarmen Raumklimas bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieaufwandes. Durch gezielte Nutzung des Wärme- und Feuchtespeichervermögens, der Gebäudemasse oder spezieller Einbauten sollen Raumklimaschwankungen soweit wie möglich ohne den Einsatz von Klimaanlagen begrenzt werden. Ähnliches gilt für die Temperierung temporär genutzter Gebäude. Bei richtiger Auslegung und Steuerung kann dort der Heizenergieeinsatz auf das zum Erhalt der Bausubstanz oder des Kulturgutes notwendige Minimum beschränkt werden.



Bild 7. Beispiel der Modellverknüpfungen bei der Raumklimasimulation mit WUFI[®]-Plus zur Berücksichtigung der hygrothermischen Wechselwirkung zwischen Raumluft und Gebäudehülle

Im Rahmen der WUFI®-Familie wurde dazu das Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt [10, 11]. WU-FI®-Plus besteht aus einem Raumbilanzierungsmodul an das beliebig viele - die Zahl richtet sich nach Anzahl der sowohl im Aufbau als auch in der Orientierung unterschiedlichen Raumumschließungsflächen - eindimensionale WUFI®-Bauteilsimulationen gekoppelt werden. Diese Ankopplung ist in Bild 7 beispielhaft für eine Dach- und eine Außenwandfläche dargestellt. Eventuelle Wärmebrücken haben zwar im Vergleich zu den flächenmäßig wesentlich größeren ungestörten Bereichen (Bauteilregelquerschnitt) meist keinen großen Einfluss auf das Raumklima, umkehrt hat aber das Raumklima bedeutende Auswirkungen auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse und damit auch das Schimmelpilzrisiko an der Wärmebrücke. Ähnliches gilt für Wände, die noch anderen Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt sind, wie z. B. lokal begrenzte Baufeuchte oder aufsteigende Grundfeuchte. In solchen Fällen können die Ergebnisse des Raumklimamodells WU-FI®-Plus als Eingabe für zweidimensionale Bauteilberechnungen (z. B. mit WUFI®-2D) dienen, wie ebenfalls in Bild 7 rechts unten angedeutet ist. Dadurch lassen sich die instationären hygrothermischen Bedingungen an neuralgischen Punkten der Gebäudehülle recht genau bestimmen.

3.3 Biohygrothermisches Modell WUFI[®]-Bio

Zahlreiche Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden sind direkt oder indirekt auf die Einwirkung von Feuchte zurückzuführen. Bei der Sanierung von Altbauten sollte neben eventuell zu beseitigenden Schäden auch eine Verbesserung der energetischen Verhältnisse angestrebt werden. Dies kann eine Verminderung von vorher vorhandenen Feuchteproblemen - wie z.B. Schimmelpilzbildung durch zu niedrige Temperaturen an der Innenoberfläche - bewirken, unter Umständen jedoch auch neue Feuchteprobleme verursachen. Schimmelpilzbefall, insbesondere an Innenoberflächen von Au-Benbauteilen, aber auch an anderen Stellen auf und innerhalb von Bauteilen, hat deshalb in letzter Zeit vermehrt von sich reden gemacht. Seine Beseitigung bzw. Vermeidung führt nicht nur zu erheblichen Kosten. Schimmelpilz kann auch die Gesundheit der Bewohner gefährden [13]. Bei jedem Schadensfall mit diesen Mikroorganismen steht die Frage im Vordergrund, ob die Baukonstruktion, also letztlich der Eigentümer, verantwortlich ist oder ob falsches Nutzerverhalten im Sinne einer ungenügenden Lüftung vorliegt. Zur Klärung dieser Fragen werden Messungen sowie moderne hygrothermische Berechnungsverfahren eingesetzt, die Auskunft über die vorliegenden instationären Feuchtesituationen geben und für die Beurteilung der Schimmelpilzgefahr genutzt werden können.

Das in [14] beschriebene biohygrothermische Modell ist ein neuartiges Berechnungsverfahren, das es gestattet, für instationäre Randbedingungen eine Aussage über das Wachstumsrisiko von Schimmelpilzen auf Innenraumoberflächen zu machen. Es beruht auf gemessenen Keimungs- und Wachstumsisoplethen und der Berechnung des instationären Wassergehalts einer Modellspore. Das Ergebnis ist ein Schimmelpilzwachstum in mm, das allerdings wenig anschaulich ist. Vor allem im skandinavischen Bereich hat sich inzwischen ein sechsstufiges Bewertungsmodell etabliert, der sog. Mould-Index, der von *Viitanen* eingeführt wurde und auf einer prozentualen Flächenbelegung, ergänzt um eine verbale Beschreibung, beruht. Da der Mould-Index wesentlich anschaulicher ist, erfolgt, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, eine Übertragung des vom Biohygrothermischen Modell berechneten Wachstums in mm in den Viitanen,schen Mould-Index.

3.3.1 Beschreibung der beiden Modelle

3.3.1.1 Biohygrothermisches Modell WUFI®-Bio

Von besonderer Bedeutung für die Baupraxis ist die Beurteilung des Wachstumsrisikos von Schimmelpilzen auf Gebäudeoberflächen und im Inneren von Bauteilen. Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren auf das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung eine Aussage zur Sporenauskeimung und zum Myzelwachstum für Schimmelpilze abgeleitet werden. Isoplethensysteme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und -feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Verunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, wurden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen (Grenzkurve LIMBau) vorgeschlagen (Bild 8):

- 0 = optimaler Nährboden,
- I = biologisch gut verwertbar,
- II = biologisch kaum verwertbare Substrate.

Um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, physikalisch möglichst korrekt beschreiben zu können, wurde ein neuartiges Biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen. Bild 9 zeigt schematisch die dem Biohygrothermischen Verfahren WUFI[®]-Bio zugrunde liegende Modellspore. Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporeninneren erreicht, kann die Sporenkeimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt. Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [15] enthalten. Bild 10 zeigt eine typische Ergebnisdarstellung dieses Programms.



Hygrothermische Rechenverfahren zur Bauwerksdiagnose 13

Bild 8. Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten) nach [14], das für alle im Bau auftretenden Schimmelpilze gilt.



Bild 9. Schema einer Spore auf einer Wand – das reale Verhältnis zwischen Sporendurchmesser zur Wanddicke (30 cm) beträgt rund 1:100.000



Bild 10. Ergebnis einer Berechnung mit dem derzeitigen Biohygrothermischen Modell

3.3.1.2 Viitanen-Modell (VTT-Modell)

Die Grundlagen des Mould-Growth-Models wurden von Viitanen und Ritschkoff in [16] unter Laborbedingungen entwickelt. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, die Auskeimzeiten und das Wachstum von Schimmelpilz auf Kiefern- und Fichtenholz sowie die Randbedingungen für eine Holzzerstörung unter vorgegebenen Feuchten und Temperaturen zu bestimmen sowie mathematisch zu modellieren. Auf Basis von zahlreichen Laborexperimenten unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen sind mathematische Modelle entwickelt worden, mit denen die Auskeimzeiten und die Wachstumsgeschwindigkeiten von Schimmelpilzen nachvollzogen werden können. Die Studien dazu wurden ausschließlich im Labor durchgeführt, weil das Zusammenspiel von Oberflächenfeuchtigkeit, Materialfeuchtegehalt, Temperatur, Zeit und mikrobiellen Befall in Gebäuden nur schwer nachzustellen und zu analysieren ist. Diese derart entwickelten mathematischen Modelle werden zur Einschätzung des Risikos von Schimmelpilzbildung eingesetzt. Dabei sind sowohl die Klimabedingungen als auch die Holzart und deren Oberflächenqualitäten als Randbedingungen auswählbar. Dieses Modell wurde ebenfalls kontinuierlich weiterentwickelt (siehe z.B. [16-18]), und dabei die Verzögerung des Schimmelwachstums durch schwankende Feuchtebedingungen und sowie die Einbeziehung mineralischer Materialien implementiert. Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form des im Folgenden beschriebenen Mould-Indexes.

Mould-Index (Wood based material / Materialien auf Holzbasis)

- 0 no growth / kein Wachstum
- 1 some growth (microscopy) / ein wenig Wachstum (mikroskopisch)
- 2 moderate growth (microscopy) coverage > 10% / mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10%
- 3 some visually detected growth (thin hyphae found under microscopy) / ein wenig sichtbares Wachstum (dünne Hyphen sind zusätzlich mikroskopisch erkennbar)
- 4 visual coverage > 10% (growth found under microscopy) / sichtbares Wachstum (Wachstum ebenfalls mikroskopisch erkennbar)
- 5 coverage > 50% / Bedeckung > 50%
- 6 tight coverage 100% / dichte Bedeckung 100%

Die Ergebnisausgabe für mineralische Materialien erfolgt nach [6] im neuesten VTT-Modell mit einer eigenen Definition des Mould-Index. Somit bedeutet der gleiche Mould-Index je nach Untergrundmaterial ein ganz unterschiedliches Wachstum.

Mould-Index (Stone based material / mineralische Materialien)

- 0 no growth / kein Wachstum
- 1 some growth / mäßiges Wachstum

- 2 moderate growth (coverage > 10%) / mäßiges Wachstum (Bedeckung > 10%)
- 3 coverage > 50% / Bedeckung > 50%
- 4 coverage < 100% / Bedeckung < 100%
- 5 coverage 100% / Bedeckung 100%

Eine unterschiedliche Wachstumsintensität bei gleichem Mould-Index (je nach Wahl des Substrats) ist aber kaum praxisgerecht und anschaulich. Bei der Entwicklung einer Übertragungsfunktion wird deshalb ausschließlich der von Viitanen für Holz definierte Mould-Index zugrunde gelegt.

3.3.1.3 Grundlegende Unterschiede beider Modellansätze

Die Unterschiede zwischen dem Biohygrothermischen Modell und dem VTT-Modell liegen in den jeweils gewählten Ansätzen begründet. Das VTT-Modell ist ein rein empirisches Modell, ausschließlich basierend auf Laboruntersuchungen. Dem instationären Biohygrothermischen Verfahren liegt dagegen ein physikalisch begründetes Modell zugrunde. Beim Biohygrothermischen Modell stehen verschiedene Substratgruppen zur Auswahl, die auch um spezielle gemessene Materialsubstratgruppen erweitert werden können. Beim Viitanen-Modell kann nur zwischen zwei Holzarten oder mineralischem Substrat unterschieden werden.

Im Gegensatz zum Biohygrothermischen Modell kann beim Viitanen-Modell unter für das Schimmelwachstum ungünstigen Bedingungen das berechnete Wachstum abnehmen. Beim Biohygrothermischen Modell ergibt sich zu diesen Zeiten ein Wachstumsstillstand. Bei Temperaturen unter 0°C ist, anders als im Viitanen-Modell, im Biohygrothermischen Modell noch immer leichtes Schimmelwachstum gegeben.

Ein ganz wesentlicher Unterschied aber besteht darin, dass im Viitanen-Modell je nach Klimarandbedingung das prognostizierte Schimmelpilzwachstum nicht über einen davon abhängigen Grenzwert steigt, während beim WUFI-Bio[®], solange es die Randbedingungen zulassen, das Wachstum zunimmt.

3.3.2 Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index

Die zusammengetragenen Ergebnisse der Laboruntersuchungen von *Viitanen*, auf deren Grundlage alle seine Berechnungen beruhen, führen nicht zum Ziel der Übertragung des berechneten Wachstums in den Mould-Index, vor allem weil die Randbedingungen nicht ausreichend bekannt sind. Aus diesem Grund erfolgt die Übertragung auf Basis zahlreicher Berechnungen mit beiden Modellen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass damit zum einen reale, instationäre, an Innenoberflächen auftretende Randbedingungen zugrunde gelegt werden können und zum anderen darin, dass dies vielfältige Parametervariationen erlaubt. Die Berechnungen werden mit dem am IBP entwickelten und vielfach validierten eindimensionalen hygrothermischen Simulationsverfahren WUFI[®], für die Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen durchgeführt [19–23]. Die damit berechneten Oberflächenbedingungen dienen als Eingangsgröße für das Biohygrothermische Modell und das VTT-Modell, das von *Viitanen* für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde.

3.3.2.1 Parametervariationen

Für die Untersuchungen werden der Standort, die Baukonstruktion sowie das Innenklima und damit auch die Feuchtelast variiert. Bei der Standortwahl wird besonderen Wert auf eine große Bandbreite gelegt. Neben Standorten mit sehr strengen Wintern in Nordeuropa, Nordamerika und aus dem Alpenraum werden auch Standorte mit starker Schlagregenbeanspruchung an Nord- und Ostsee ausgewählt. Ebenso werden Standorte mit kontinentalem Klima in Osteuropa und gemäßigtem Klima in Mitteleuropa aber auch mediterranes Klima in Norditalien und Spanien berücksichtigt, womit sich insgesamt 32 unterschiedliche Standorte ergeben.

Es werden sowohl aus dem Außenklima in Abhängigkeit von der Nutzung bzw. Feuchtelast nach DIN EN 13771 oder Ashrae [43] berechnete Innenklimata als auch sinusförmige Jahresgänge zugrunde gelegt. Hier werden neben Ansätzen mit leicht erhöhten auch welche mit stark erhöhten Feuchtelasten gewählt. Ebenso werden bei den angesetzten Innentemperaturen mehrere unterschiedliche Varianten von $19^{\circ}C \pm 3^{\circ}C$ bis $24^{\circ}C$ ±2°C berechnet. Diese große Vielfalt von insgesamt 14 Innenklimavarianten soll möglichst viele Nutzergewohnheiten abbilden, bewusst auch im negativen Sinne. Es kommt hauptsächlich dort zu mikrobiellem Wachstum, wo der Nutzer entsprechendes Fehlverhalten bezüglich Heizen und Lüften an den Tag legt oder Nutzer Außenwandbereiche mit Möbeln und Vorhängen abdecken.

Bei den gewählten Außenwandkonstruktionen werden Varianten mit einem U-Wert von 0,3 bis 1,9 W/(m²K) eingesetzt. Dabei finden schlecht dämmende Außenwände überproportional Berücksichtigung, da gerade diese schlecht gedämmten Außenwände besonders anfällig für mikrobiellen Befall sind. Mit den extrem hohen U-Werten sollen auch Wärmebrückenbereiche abgebildet werden. Es werden sowohl monolithische Konstruktionen aus unterschiedlichen Materialien als auch Leichtbaukonstruktionen berücksichtigt.

3.3.2.2 Entwicklung der Umrechnungsfunktion

Insgesamt werden auf diese Weise ca. 350 Berechnungen durchgeführt, die als Grundlage für die Entwicklung der Umrechnungsfunktion dienen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt durch Vergleich der jeweiligen Maximalwerte (Mould-Index und mm-Wachstum) im Verlauf der 365-tägigen Laufzeit. Die Berechnungen werden sowohl mit Jahresbeginn als auch in Jahresmitte gestartet. Es wird bewusst kein





Bild 11. Gegenüberstellung der mit beiden Modellen für die unterschiedlichen Varianten für einen Zeitraum von einem Jahr berechneten Ergebnisse – Anpassung mit einer Polynomfunktion als Linie eingezeichnet

Stichtag gewählt, da beide Verfahren unter bestimmten Klimarandbedingungen unterschiedliche Intensitäten im Schimmelwachstum zu verschiedenen Zeitpunkten aufweisen. Bild 11 zeigt das Ergebnis dieser Vorgehensweise. Darin ist eine Anpassung mittels Polynomfunktion als Linie eingezeichnet.

Mit diesem Verfahren ergibt sich bereits ein akzeptables Ergebnis. Allerdings fällt auf, dass vor allem im Bereich des Mould-Index 6 eine hohe Variationsbreite gegeben ist. Bei niedrigerem Mould-Index finden vor allem einzelne Abweichungen nach oben statt, aber fast keine nach unten. Diese Abweichungen sind in spezifischen Unterschieden beider Modelle begründet. Während beim VTT-Modell ein Maximalwert (MI 6) existiert, können beim Biohygrothermischen Modell bei günstigen Wachstumsbedingungen extrem hohe Werte resultieren. Die Abweichungen nach oben bei niedrigerem Mould-Index treten immer dann auf, wenn es bei Perioden ungünstiger Randbedingungen im Viitanen-Modell zu einem Wachstumsrückgang kommt, der beim Biohygrothermischen Modell nicht auftreten kann.

Um dies zu berücksichtigen, werden zwei Modifikationen durchgeführt. Ergibt sich beim Viitanen-Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt der MI 6, wird bei dem Biohygrothermischen Modell die Berechnung nur bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführt. Außerdem wird bei allen Varianten, bei denen es nach dem VTT-Modell zu Wachstumsrückgängen kommt, das Ergebnis dadurch angepasst, dass die Summe der Rückgänge auf das Ergebnis aufaddiert wird. Trägt man nun die Ergebnisse beider Modelle in ein Diagramm auf (Bild 12), ergibt sich vor allem im unteren Bereich eine noch bessere Korrelation. Als Anpassungsfunktion wird hier eine BET-Adsorptionskurve zugrunde gelegt, da die Kurven ähnlich einer typischen Sorptionskurve sind.

Die als Linie eingezeichnete Funktion korreliert über dem ganzen Bereich gut mit den Ergebnissen, sodass diese eine geeignete Übertragungsfunktion darstellt.

Durch die Verknüpfung der Ergebnisse des Biohygrothermischen Modells mit dem Mould-Index des Vii-

15





Bild 12. Gegenüberstellung der mit beiden Modellen für die unterschiedlichen Varianten nach Modifikation der Auswertung berechneten Ergebnisse – Anpassung mit einer BET-Funktion als Linie eingezeichnet

tanen-Modells wird erreicht, dass ein inzwischen anerkanntes und vor allem anschauliches Bewertungsmaß auch bei WUFI-Bio® genutzt werden kann. Es ist eine Umrechnungsfunktion entwickelt worden, mit der mit sehr guter Korrelation das berechnete Wachstum in den Mould-Index überführt werden kann. Diese Umrechnungsfunktion und die entsprechende grafische Darstellung werden in Kürze in das Berechnungstool implementiert werden. Da beide Prognoseverfahren (VTT-Modell und Biohygrothermisches Modell) inzwischen weit verbreitet sind und aufgrund ihrer jeweiligen Vorteile und Einschränkungen auch in Zukunft parallel existieren werden, ist es aus wissenschaftlicher Sicht vorteilhaft, dass mit der Umrechnungsfunktion die Ergebnisse beider Verfahren direkt vergleichbar werden. Die Gebäude werden neben der Klimamessung mit einem hvgrothermischen Raummodell auf ihre Funktionsweise untersucht. Die notwendigen Simulationsparameter, wie etwa die Bestimmung der Luftwechselrate, wurden zerstörungsfrei, ohne Beeinträchtigung der historischen Substanz vor Ort ermittelt. In der Folge wurde ein vereinfachtes Analyseverfahren entwickelt, um die einzelnen Einflüsse auf das Mikroklima in einem rechnerischen Modell voneinander zu trennen und die Wirkung von verschiedenen Maßnahmen zur Stabilisierung des Raumklimas bereits in der Planung abschätzen zu können.

4 Das Königshaus am Schachen

Das denkmalgeschützte Königshaus auf dem Schachen ist das erste von König Ludwig II. (* 25. August 1845 Schloss Nymphenburg; † 13. Juni 1886 Starnberger See) selbst errichtete Bauwerk. Im Obergeschoss des Gebäudes befindet sich der prunkvoll eingerichtete Türkische Saal, der im Mittelpunkt der Untersuchungen stand. Der Standort auf dem 1876 m hohen Schachen im Wettersteingebirge ist geprägt durch lange Frostperioden im Winter und schnelle Wetterwechsel im Sommer. Umso bemerkenswerter ist der Erhaltungszustand des Schachenhauses, welcher außerordentlich gut ist. Ziel der Untersuchungen war, herauszufinden, was der Grund für die gute Erhaltung des Schachenhauses und seiner Ausstattung ist. Dazu wurde die Ausstattung restauratorisch untersucht, Schäden kartiert und 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, eine sehr detaillierte Simulation des Raumklimas im Türkischen Saal zu erstellen

4.1 Restauratorische Untersuchungen

Die Ausstattung des Türkischen Saals wurde eingehend auf ihre Erhaltung hin untersucht. 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





a)

Bild 13. a) Ansicht des Schachenhauses von der Südseite, b) Ansicht des Türkischen Saals von Süden

und in der Folge quantitativ abgeschätzt, wie viel Textilien, Papier und gefasste Holzoberflächen sich im Raum befinden. Letzteres war erforderlich, um die anschließenden Raumklimasimulationen möglichst realitätsnah durchführen zu können. Zur Dokumentation der Schäden an der Ausstattung des Türkischen Saals wurde ein Katalog angefertigt [24].

4.1.1 Baukonstruktion

Die Lage des Schachenhauses ist nicht optimal, jedoch hält das Gebäude dem rauen Bergklima seit über 138 Jahren stand. Während dieser Zeit haben zwar mehrere Stürme zu Schäden geführt, aber die solide Konstruktion 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 (Bild 14). Schon die äußere Schale ist winddicht ausgeprägt. Die gefassten und vergoldeten Innenwände bilden die innere Schale, welche in die Außenschale eingestellt und nach hinten mit Abstandhaltern abgestützt ist. Diese Konstruktion ist ausschlaggebend dafür, dass das Außenklima zeitverzögert und gepuffert in den Innenraum gelangt.

4.1.2 Klimatisierung und Besucher

Ein 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



Bild 14. Vertikalschnitt Türkischer Saal, Nord-Ost-Ecke

nicht relevant. Die Folge sind allerdings tiefe Temperaturen bis unter den Gefrierpunkt im Winter. Verglichen mit dem Erhaltungszustand sind diese tiefen Temperaturen jedoch offensichtlich weniger schädlich für die Objekte als zu geringe Feuchte 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. Klimamessungen und Simulationsergebnisse zeigten, dass die auf 30 Personen pro Führung begrenzte Besucherzahl nur eine geringe Auswirkung auf das Raumklima im Türkischen Saal hat.

4.1.3 Empfehlungen aus restauratorischer Sicht

Alle diese Faktoren führen dazu, dass der Türkische Saal und seine historische Ausstattung gut erhalten sind. Um den heutigen Erhaltungszustand in den nächsten Jahrzehnten zu sichern, ist eine regelmäßige Wartung des Gebäudes hinsichtlich der Dichtigkeit des Daches etc. notwendig. Für die Bewahrung der Ausstattung des Türkischen Saals ist die Anbringung einer Schutzverglasung mit UV-Schutz an den Rundfenstern und an den großen Fenstern an der Ostseite notwendig. Bei der bereits bestehenden Schutzverglasung sollte der UV-Schutz nachgerüstet werden. Um die Erhaltung der teilweise gelockerten Fassungsschichten und der textilen Ausstattung (Divane und Tischdecken) zu gewährleisten, sind Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Nachdem in Zukunft mit steigenden Besucherzahlen zu rechnen ist, ist es außerdem sinnvoll, die Ausstattung, die sich in unmittelbarer Nähe des Besuchers befindet mit einem Schutz, z. B. in Form einer Abdeckung, zu versehen.

4.2 Bauphysikalische Untersuchungen

Die Bauphysik bietet neue Ansätze für die Begutachtung der Erhaltung von Kunstwerken und die Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen Materialien und Raumklima. Mithilfe von Untersuchungen wie Luftwechselmessung und Materialkenndatenerfassung können die Parameter für eine hygrothermische Gebäudesimulation ermittelt werden, die weitere Aufschlüsse über das Raumklima ermöglicht.

4.2.1 Luftwechselmessung

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 Raumklimas in Innenräumen.

Die Ergebnisse erster vereinfachter Simulationsversuche ließen bereits darauf schließen, dass das Gebäude relativ luftdicht ist. Um diese Vermutung zu belegen und um genaue Werte für weitere Simulationen zu erhalten, wurde im September 2009 eine Luftwechselmessung 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 Pentiag AB verwendet. Bei dieser Art der Luftwechselmessung 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 den 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 (± 0,03) h⁻¹ tatsächlich als niedrig einzustufen. Der Hauptteil des Luftvolumenstroms in das Obergeschoss besteht aus vorkonditionierter Luft aus dem Untergeschoss. Auch der Luftwechsel von n = 0,41 ± 0,08 h⁻¹ für das gesamte Königshaus ist nicht hoch. Wegen der ungleichmäßigen Durchmischung des Tracergases im Untergeschoss liegt die Unsicherheit der Messung bei ungefähr 20%.

4.2.2 Ermittlung der Materialkenndaten

Die Genauigkeit der Gebäudesimulation wird bestimmt durch die Kenntnis der hygrothermischen Materialkennwerte und der Baukonstruktion. Insbesondere das Wissen über die feuchtetechnischen Eigenschaften historischer Baustoffe und Materialien ist noch immer sehr begrenzt, da bisher kaum Forschungsarbeit in diesem Bereich durchgeführt wurde. Es galt deswegen, die im Türkischen Saal mengenmäßig am häufigsten vorkommenden Materialien hinsichtlich ihres feuchtetechnischen Verhaltens zu untersuchen, um die für die Simulation in WUFI[®]-Plus relevanten Materialkenndaten zu bestimmen. 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 Schachenhaus natürlich nicht möglich ist. Die historischen Materialien wurden daher auf Grundlage der restauratorischen Untersuchungen möglichst originalgetreu nachgebildet. Da der Alterungsprozess einen Einfluss auf die Eigenschaften haben könnte, wurden soweit möglich Materialien des gleichen Alters wie das der 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 [25]. Feuchtespeichereigenschaften sowie Feuchtetransportvorgänge bestimmen den Feuchtehaushalt eines Materials. Die Wasserdampfdurchlässigkeit wurde durch das Feuchtebereichsverfahren nach DIN EN ISO 12572:2001 messtechnisch erfasst. Zur Bestimmung der Sorptionseigenschaften kam das Klimakammerverfahren nach DIN EN ISO 12571:2000 zum Einsatz. Neben diesen Messungen wurden auch die Rohdichte sowie die freie Wassersättigung der Materialproben in den Laboren des Fraunhofer-Instituts bestimmt. Damit wurden die wichtigsten hygrischen Materialkenndaten erfasst und nachfolgend genauso in das 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.

4.3 Klimadatenerfassung

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 Daten unerlässlich.

4.3.1 Außenklima

Die relative Außenluftfeuchte sowie die Außentemperatur wurden im Zeitraum von Oktober 2006 bis Oktober 2009 durch einen Außenfühler mit Wetterhütte als Schutzvorrichtung auf dem Balkon an der Nordfassade erfasst. Dort sind die Verfälschungen der Messergebnisse durch direkte Sonneneinstrahlung im Sommer am geringsten. Die Außenklimamessungen waren jedoch vor allem wegen Kälte und hoher Feuchte anfällig für Messausfälle und Messungenauigkeiten. So wurden im Messjahr Oktober 2008 bis Oktober 2009 in 30% der Zeit keine Daten aufgezeichnet. Die vorhandenen Messdaten sind zudem teilweise fehlerhaft, da wahrscheinlich Kondensat am Sensor ausgefallen ist, welches die Messung verfälscht hat. Die Datenaufzeichnung erfolgte mithilfe von Datenloggern.

Für die Simulation in Wufi[®]-Plus sind zusätzliche Außenklimaparameter, wie beispielsweise Wind, Regen und Sonneneinstrahlung, wichtig. Diese wurden anfangs von den Wetterstationen Hohenpeißenberg und Zugspitze bezogen. Im November 2009 wurde zudem dann in Kooperation mit der Technischen Universität München eine Wetterstation aufgestellt, die nun Wetterdaten in der unmittelbaren 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 nun auf ein Minimum.

Vergleicht man die statistische Auswertung der Jahre 2006/2007, 2007/2008 und 2009/2010 (Bilder 15–17), so wird deutlich, dass die Außenluftfeuchte seit 2006 stetig gestiegen ist. Damit lässt sich auch der im Türkischen Saal beobachtete Anstieg der relativen Feuchte erklären, worauf in Abschnitt 4.3.2 näher eingegangen wird.

4.3.2 Raumklima im Türkischen Saal

Das Königshaus am Schachen hat weder eine Heizung noch eine sonstige Klimatisierung. Demnach sind die klimatischen Verhältnisse innen allein durch das Außen-



Bild 15. Streudiagramm der gemessenen Außenklimawerte von 1.10.2006 bis 30.9.2007. Bei der Temperaturmessung liegt ein Softwarefehler bei der Datenerfassung vor, es fehlen die Werte zwischen 0 und -1 °C, daher die erkennbare Linie bei 0 °C Unten: statistische Auswertung des

Messjahres

Nabil A. Fouad · Bauphysik-Kalender 2012 H:/v/vch/03996_Bauphysik_2012/satz/D_03_Bauphysik2012.3d – Seiten 1–54 10.01.2012, Seite 1





100 80 Relative Feuchte [%] 60 40 20 0 -20 -10 0 10 20 30 -30 Temperatur [°C] Minimum Median Maximum Mittelwert SD P5 P95 r.F. [%] 74,07 21,3 9,33 33,37 79,93 99,20 99,50 16,22 24,85 2 44 -12.20 2.70 T [°C] 8.48 -19.48

Bild 16. Streudiagramm der gemessenen Außenklimawerte von 1.10.2007 bis 30.9.2008. Bei der Temperaturmessung liegt ein Softwarefehler bei der Datenerfassung vor, es fehlen die Werte zwischen 0 und –1 °C, daher die erkennbare Linie bei 0 °C

Unten: statistische Auswertung des Messjahres

Bild 17. Streudiagramm der gemessenen Außenklimawerte von 1.10.2009 bis 30.9.2010. Unten: Statistische Auswertung des Messjahres. Die Messdaten wurden mit der am Schachen errichteten Wetterstation aufgezeichnet und sind im Bereich der Messungenauigkeit fehlerfrei und konsistent Unten: statistische Auswertung

klima, die Konstruktion des Gebäudes und die Besucher bestimmt. Wegen der Lage im Gebirge ist mit rauem Klima und schnellen Wetterwechseln zu rechnen. Diese Aspekte und die Tatsache, dass der Erhaltungszustand dennoch gut ist, machen eine nähere Untersuchung des Raumklimas im Königshaus interessant. 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 werden die relative Luftfeuchte und die Raumlufttemperatur. Die Datenaufzeichnung erfolgt ebenfalls mithilfe von Datenloggern.

Jede Klimamessung ist mit Ungenauigkeiten behaftet. Im Fall des Königshauses kommt erschwerend hinzu, dass eine Überprüfung der Messvorrichtung nur von Juni bis Oktober möglich ist, weshalb es vor allem in den Wintermonaten immer wieder zu Messausfällen kam. Es lässt sich feststellen, dass aufgrund des Fehlens jeglicher Klimatisierung oder Beheizung das Innenklima zeitverzögert und gedämpft dem Außenklima folgt. Im Inneren des Schachenhauses herrschen eher kühle Temperaturen. Die erste Messperiode 2006 bis 2007 war geprägt durch relativ milde Wetterverhältnisse (vgl. Bild 18), was sich auch an den Messdaten innen zeigt. Die Temperatur liegt zu 95 % unter 16,2 °C, der Medianwert ist bei 6,4 °C. Frost kommt häufig vor, der niedrigste gemessene Wert beträgt -10,4 °C bei mehr als 5 % der Werte liegt die Temperatur unter -3,6 °C (Bild 18, Mitte). Die relative Feuchte liegt zu 95 % zwischen 45 % und 70 % r. F.

Das Streudiagramm in Bild 19 zeigt, dass die hohen Feuchtewerte bei geringen Temperaturen auftreten. Temperatur und relative Feuchte sind als Wertepaar aufgetragen und als Streudiagramm bzw. Punktwolke im Kontext eines Einteilungsschemas dargestellt. Dieses Einteilungsschema wurde von *Kilian* entwickelt

Das Königshaus am Schachen 21

[41] und aus vorhandenen Modellen zusammengestellt. In dem Schema werden Beurteilungskriterien der Qualität des Raumklimas im Kontext der präventiven Konservierung dargestellt. Die Raumklimawerte (kleine Quadrate) sollten hier idealerweise in keinem der eingefärbten Bereiche liegen, welche die Gefährdung durch biologische Faktoren (Mikroorganismen) anzeigen.

Aus Bild 19 ist ersichtlich, dass das Risiko der Schimmelbildung für die Ausstattung des Türkischen Saals niedrig ist. An der Ausstattung trat nur geringfügige Schimmelbildung, meist in Zusammenhang mit Wassereintrag auf. Akuter Befall wurde bei der restauratorischen Untersuchung 2009 nicht festgestellt.

Nachfolgend werden die vorhandenen Raumklimamesswerte des Türkischen Saals für den Messzeitraum Oktober 2009 bis Oktober 2010 beschrieben. Die Liniendiagramme der Messwerte im Messzeitraum zeigen eine größere Schwankung der Werte von Temperatur



Bild 18. Raumklima im Türkischen Saal und Außenklima, gemessen am Balkon auf der Nordseite des Schachenhauses, vom 1. Oktober 2006 bis 30. September 2007



Bild 19. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte im Türkischen Saal, gemessen von 1.10.2006 bis 30.9.2007. Mitte: Histogramme der relativen Feuchte (links) und der Temperatur (rechts) der stündlich gemessenen Werte. Unten: statistische Auswertung des Messjahres. Bei der Temperaturmessung fehlen Messwerte zwischen –1 °C und 0 °C, was auf eine einen Defekt des Loggers bzw. der Software zur Datenspeicherung schließen lässt

und relativer Feuchte. Die relative Luftfeuchte im Türkischen Saal steigt auf Werte über 75% r. F. an und im Winter werden nun deutlich kältere Temperaturen bis zu -17°C erreicht (Bild 20).

Das Innenklima des Türkischen Saals steht wie bereits erwähnt in direktem Zusammenhang mit dem Außenklima. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, zeigt der Vergleich der Außenklimamesswerte insgesamt einen jährlichen Anstieg der relativen Außenluftfeuchte, was den Anstieg innen erklärt.

Die Auswertung des gesamten Messzeitraums von Oktober 2006 bis Oktober 2010 zeigt eine größere Schwankung der Werte von Temperatur und Luftfeuchte. Die relative Luftfeuchte im Türkischen Saal steigt, und im Winter werden deutlich kältere Temperaturen erreicht. Über den gesamten Messzeitraum gesehen lag der Median der Temperatur im Türkischen Saal bei 4,1 °C, das

bedeutet, dass es in 50% der Zeit kälter war. Der niedrigste gemessene Wert betrug -14,5 °C, in 5 % der Zeit lag die Temperatur unterhalb von -6,6 °C. In den Sommermonaten stieg die Temperatur auf maximal 23,6 °C an. Der Median der relativen Luftfeuchte liegt mit 66,1% ungefähr 6% höher als im ersten Messjahr. Die Luftfeuchte im Türkischen Saal erreichte insgesamt einen Maximalwert von 89,9%. In 90% der Zeit bewegte sich die relative Feuchte in einem Bereich von 50% bis 80% und damit ungefähr auf einem 10% höheren Niveau als im ersten Messjahr (vgl. Bild 21). Die Ausstattung des Türkischen Saals wird in der Regel einmal pro Jahr von Restauratoren der Bayrischen Schlösserverwaltung gereinigt und auf Schäden geprüft. Trotz der in den letzten Jahren gestiegenen relativen Feuchte der Raumluft wurde bisher kein Schimmelbefall festgestellt.



Bild 20. Verlauf der relativen Luftfeuchte, der Lufttemperatur sowie der absoluten Luftfeuchte im Türkischen Saal und außen, gemessen mit der Wetterstation im nahe gelegenen Alpengarten, für die Messjahre 1.10.2009 bis 30.9.2010. Für die Zeiten der Messausfälle wurden keine Innenklimawerte eingezeichnet



Bild 21. Oben: Streudiagramm der gemessenen Raumklimawerte im Türkischen Saal von 1.10.2006 bis 30.9.2010. Kompletter Messzeitraum.

Mitte: Histogramme der relativen Feuchte (links) und der Temperatur (rechts) der stündlich gemessenen Werte. Unten: statistische Auswertung des Messjahres. Bei der Temperaturmessung fehlen Messwerte zwischen –1 °C und 0 °C, was auf eine einen Defekt des Loggers bzw. der Software zur Datenspeicherung schließen lässt

4.4 Hygrothermische Gebäudesimulation

Die Gebäudesimulationssoftware WUFI[®]-Plus wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt. Mithilfe von WUFI[®]-Plus können sowohl die hygrothermischen Bedingungen im Raum und an den Innenoberflächen als auch die Wärmeverluste durch Transmission, Verdunstung und Lüftung bestimmt werden. Dies geschieht in Abhängigkeit des Außenklimas, der Heizungs- und Lüftungsgegebenheiten, der Raumnutzung sowie der Baukonstruktion und der Materialien. So können Aussagen bezüglich Behaglichkeit in Innenräumen getroffen werden, aber auch Risikoabschätzungen und Klimatisierungsstrategien in Abhängigkeit von unterschiedlichen Feuchtelasten entwickelt werden.

4.4.1 Simulation des Türkischen Saals

Alle vorher ermittelten Kenndaten und die Ergebnisse der bauphysikalischen Untersuchungen zum Schachenhaus gingen in die Gebäudesimulation ein. Gegenstand der Simulationen war hauptsächlich der Türkische Saal sowie das Dachgeschoss. Diese Gebäudeteile sind hinsichtlich ihrer Konstruktion und den bauphysikalischen Eigenschaften im Detail erfasst. Dadurch kommt die Simulation der Realität sehr nahe. Insgesamt passen Simulationsergebnisse und Messwerte gut zusammen (s. Bild 22), was für die Richtigkeit der zugrunde gelegten Eingabeparameter spricht.

Durch Variantenberechnungen wurden die verschiedenen, das Raumklima beeinflussenden, Faktoren in der Simulation berücksichtigt. Das Dachgeschoss und der Türkische Saal wurden als zwei getrennte Zonen angesetzt. 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. Mithilfe der ermittelten Materialkennwerte wurden in der Datenbank der WUFI®-Software neue Materialien definiert. In der Simulation wurde u. a. der Einfluss der textilen Materialien auf die Raumklimastabilität sichtbar. Diese Materialien vermindern durch ihre Feuchtepufferwirkung Minimal- und Maximalwerte der relativen Luftfeuchte, was für den Erhalt der Kunstwerke im Türkischen Saal von großer Wichtigkeit ist.

Die beste Übereinstimmung von Messwerten und Simulationsergebnissen im ersten Teil des Jahres zeigte sich bei einer konstanten Luftwechselrate von n = 0,6 h⁻¹ für Oktober bis Februar und von n = 0,45 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 Bereich von n = 0,43 bis 1,0 h⁻¹ angesetzt. Insgesamt lagen die Werte für die Luftwechselrate in der Simulation höher als die in der Tracergas-Messung ermittelten. Der Einfluss der Besucher als zusätzliche Wärme- und Feuchtequelle wurde in der Simulation ebenfalls berücksichtigt.



Bild 22. Verlauf relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur im Türkischen Saal in Simulation und Messung für den Zeitraum 1.10.2006 bis 30.9.2007

4.4.2 Statistischer Vergleich von Messung und Simulation

Starke Raumklimaschwankungen führen zu Dimensionsänderungen der Materialien und verursachen Schäden an Kunstwerken und historischer Ausstattung. Besonders Kurzzeitschwankungen bei der relativen Feuchte sind als kritisch anzusehen. Durch eine statistische Auswertung des Raumklimas wurden die stündlichen, täglichen und wöchentlichen Schwankungsbreiten der relativen Luftfeuchte in Simulation und Messung ermittelt und verglichen. Dazu wurde der Mess- und Simulationszeitraum Oktober 2006 bis Oktober 2007 herangezogen.

Zur Bestimmung der Häufigkeiten der täglichen Schwankungen wurde eine Klassenbreite von 1% relativer Feuchte festgesetzt. Die täglichen Schwankungsbreiten von Messung und Simulation stimmen gut überein.

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 Schachenhaus unterstützt damit die These aus neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen [26], dass Änderungen in diesem Bereich weitestgehend unkritisch für gefasste Holzoberflächen sind.





Bild 23. Histogramm der Schwankungsbreite der relativen Feuchte innerhalb eines Tages in Messung und Simulation

4.5 Feuchtepufferung durch Materialien

Ein Großteil der Ausstattung des Türkischen Saals hat feuchtepuffernde Eigenschaften, das heißt sie nimmt Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung auf und gibt diese bei sinkender relativer Feuchte wieder ab. Durch ihre Sorptionseigenschaft beeinflussen die Materialien entscheidend das Raumklima. Die Flächenberechnung ergab, dass die Ausstattung zu je etwa einem Drittel aus Textilien, vergoldeten sowie gefassten Holzoberflächen besteht. Durch Simulationen kann gezeigt werden, dass die sich feuchtepuffernden Materialien stabilisierend auf das Raumklima im Türkischen Saal auswirken. Bild 24zeigt das Streudiagramm der simulierten Raumklimawerte des Türkischen Saals mit sämtlichen im Raum und den inneren Umschließungsflächen vorhandenen Materialien. Werden alle textilen Materialien in der Simulation entfernt, so sind minimale und maxi-



Bild 24. Streudiagramm der simulierten Raumklimawerte des Türkischen Saals mit allen im Raum und den inneren Umschließungsflächen vorhandenen Materialien

male Raumluftfeuchten stärker ausgeprägt (Bild 25). Zu den textilen Materialien zählen die Brokatseidenvorhänge, der Perserteppich sowie die Polstermöbel des Türkischen Saals. Noch deutlicher wird der puffernde Einfluss erkennbar, wenn in der Simulation alle feuchtepuffernden Eigenschaften ausgeschlossen werden (Bild 26). Der Vergleich mit Bild 24 belegt eindrucksvoll, dass die feuchtepuffernden Materialien einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität des Raumklimas haben.

4.6 Berechnung des Schimmelpilzrisikos durch erhöhtes Besucheraufkommen

In den Jahren 2007 bis 2011 traten im Schachenhaus immer wieder auch höhere Werte der relativen Luftfeuchte auf. An der Ausstattung konnte jedoch kein akuter Schimmelbefall festgestellt werden. Es war nur



Bild 25. Streudiagramm der simulierten Raumklimawerte des Türkischen Saals ohne textile Materialien



Bild 26. Streudiagramm der simulierten Raumklimawerte des Türkischen Saals komplett ohne feuchtepuffernde Materialien

sehr geringfügig Schimmelbildung an einigen Stellen aufgrund von Wassereintrag durch starke Gewitter vorhanden. Eine Laboranalyse am Fraunhofer-Institut ergab, dass keine der entnommenen Proben aktives Schimmelpilzwachstum aufwies. Es stellt sich allerdings die Frage, ob durch ein erhöhtes Besucheraufkommen und den damit erhöhten Feuchteeintrag eine Schädigung durch Schimmelpilze zu befürchten ist. Der Einfluss der Besucher auf das Innenklima und damit auch auf die Situation an der Außenwandinnenoberfläche kann mithilfe des Raummodells WUFI[®]-Plus berechnet werden. Unter Zugrundelegung dieser Oberflächenbedingungen kann mit WUFI[®]-Bio abgeschätzt werden, ob Schimmelpilzwachstum zu erwarten ist.

Im Folgenden wird dazu die Situation für ein normales derzeit vorliegendes Besucheraufkommen mit denen bei doppeltem und vierfachem Aufkommen verglichen. Da das Schachenhaus nur im Sommer für Besucher geöffnet ist, wird hierzu der Zeitraum von Juni bis September betrachtet.

Bild 27 zeigt den Einfluss der Besucher auf die Taupunkttemperatur der Raumluft. Mit steigendem Besucheraufkommen steigt die Taupunkttemperatur teilweise deutlich an.

Die relative Raumluftfeuchte steigt dagegen deutlich geringfügiger an (s. Bild 28 oben), was darin begründet ist, dass die Besucher auch zu einem Anstieg der Raumlufttemperatur führen (Bild 28 unten). Allerdings werden bei vierfachem Besucheraufkommen zeitweise Raumluftfeuchten von etwa 95% erreicht.

Der Einfluss auf die Oberflächentemperatur und die Oberflächenfeuchte – als Grundlage für das Schimmelpilzprognosemodell – ist in Bild 29 dargestellt. Man erkennt, dass bei vierfachem Besucheraufkommen bereits zeitweise Tauwasser an der Oberfläche auftritt.

Die in Bild 29 dargestellten Oberflächenfeuchten und -temperaturen dienen als Eingangsdaten für WUFI[®]-Bio. Als Untergrund wird von einem gut verwertbarem Material (Substratgruppe I) ausgegangen. Die Ergebnisse für die drei Besucheraufkommen zeigt Bild 30.

Man erkennt, dass bei normalem Besucheraufkommen der Wassergehalt der Spore stets unterhalb des Grenzwassergehalts bleibt. Somit ergibt sich rechnerisch keinerlei Schimmelpilzwachstum. Verdoppelt sich die Besucheranzahl, wird der Grenzwassergehalt zeitweise geringfügig überschritten. Das berechnete Schimmelwachstum ist aber so minimal, dass der Mould-Index deutlich unter 1 liegt. Bei vierfachem Besucheraufkommen wird der Grenzwassergehalt im Herbst zwar deutlicher überschritten, aber auch hier ergibt sich nur ein äußerst geringes Wachstum von 5 mm und damit ein Mould-Index, der bei nur ca. 0,01 liegt. Ein zu beobachtendes Schimmelwachstum dürfte auch hiermit ausgeschlossen sein.

Diese Unempfindlichkeit des Türkischen Saals gegenüber erhöhtem Besucheraufkommen dürfte in den besonderen Randbedingungen dieses Saals begründet sein. Zum einen liegen die Oberflächentemperaturen häufig so niedrig, dass trotz hoher Oberflächenfeuchten geringe Schimmelpilzwachstumsgefahr gegeben ist. Zum anderen bewegen sich hier die Außenwandinnenoberflächentemperaturen aufgrund des Fehlens einer Beheizung und der geringen thermischen Masse stets nur geringfügig unterhalb der Raumlufttemperaturen.



Bild 27. Einfluss des Besucheraufkommens auf die Taupunkttemperatur der Raumluft; a) Sommerperiode, b) ausgewählte Woche



26 D 3 Schadensdiagnostik und Bewertung in historischen Gebäuden

Bild 28. Einfluss des Besucheraufkommens auf die Raumluftfeuchte (oben) und die Raumlufttemperatur (unten); a) Sommerperiode, b) ausgewählte Woche



Bild 29. Einfluss des Besucheraufkommens auf die Oberflächenfeuchte (oben) und die Oberflächentemperatur (unten)

Das Königshaus am Schachen 27



Bild 30. Für den Sommer für die Wandoberfläche im türkischen Saal berechneter Verlauf des Grenzwassergehalts und des Wassergehalts der Spore (oben); des daraus resultierenden berechneten Schimmelpilzwachstums in mm (Mitte) und des sich damit ergebenden Mould-Indexes MI (unten) für normales, doppeltes und vierfaches Besucheraufkommen

4.7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen im Königshaus auf dem Schachen zeigen, dass ein stabiles Raumklima entscheidend zur Erhaltung von Kunstwerken und Ausstattung historischer Gebäude beiträgt. Im Vergleich zum Schachenhaus treten in Schloss Linderhof, das durch die vielen Besucher eine erheblich stärkere Belastung erfährt und damit auch höhere Schwankungen des Raumklimas aufweist, deutlich mehr Schäden auf.

Trotz des extremen Bergklimas verfügt das Gebäude über ein relativ stabiles Raumklima innerhalb bestimmter Grenzen. Dies ist zum einen durch einen relativ geringen Luftwechsel infolge einer dichten Gebäudehülle der Haus-in-Haus Konstruktion bedingt, zum anderen durch die Feuchtespeicherung der Materialien der Innenausstattung. Auch lange Frostperioden scheinen den Kunstmaterialien keine größeren Schäden zuzufügen.

Simulationsergebnisse und Tracergas-Messung belegten, dass der Luftwechsel im Königshaus in einem für ein historisches Gebäude niedrigen Bereich liegt und erheblich zur Klimastabilität beiträgt. Weitere Luftwechselmessungen zu anderen Jahreszeiten erscheinen sinnvoll, da die Wetterbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben. Vor allem eine Messung im Winter würde zusätzlich Aufschluss geben zum Luftwechsel bei geschlossenem Zustand des Hauses in über 8 Monaten des Jahres.

Die durchgeführte Materialkenndatenerfassung ist ein weiterer Schritt zur Bestimmung des feuchtetechnischen Verhaltens historischer Baustoffe. Vor allem die textilen

Materialien und die Holzoberflächen der Ausstattung des Türkischen Saals wirken sich puffernd auf Feuchtespitzen und Minimalfeuchten aus, wie in der Simulation aufgezeigt werden konnte. Die genaue Erfassung der Eingabeparameter ist die Voraussetzung dafür, dass Simulationsergebnisse und Messwerte relativ gut übereinstimmen. Die hygrothermische Gebäudesimulation ist somit ein sinnvolles Werkzeug, um die Einflussfaktoren auf das Raumklima in historischen Gebäuden näher bestimmen zu können und zukünftige Maßnahmen abzuschätzen. Auch in Zukunft wird auf dem Schachen weiter geforscht werden. Das Königshaus ist Teil des EU-Forschungsprojekts "Climate for Culture", welches sich von 2009 bis 2014 mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das europäische Kulturerbe befasst.

5 Schloss Linderhof

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 einfachen Lösungen wie feuchtegesteuerte Temperierung und Lüftung wird heute bei der Klimatisierung oft der Vorzug gegenüber Vollklimaanlagen gegeben, die 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 infrage kommen. Gerade für derartige Maßnahmen sind messtechnische Untersuchungen in Verbindung mit rechnerischer Simulation zur Beurteilung der klimarelevanten Auswirkungen ein wesentliches und Schaden vermeidendes Hilfsmittel.

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Klimastabilität historischer Gebäude" wurden dazu detaillierte Untersuchungen zu Gebäudekonstruktion, Nutzung, Lüftung und Raumklima am Schloss Linderhof durchgeführt. Ziel ist es, für Schloss Linderhof eine Risikoabschätzung für die Kunstwerke und die wertvolle Ausstattung 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. Das Paradeschlafzimmer konnte dabei erfolgreich abgebildet werden. Mit dem validierten Modell werden Szenarien und Falluntersuchungen zum Besuchereinfluss, Lüftung und Beheizung im Paradeschlafzimmer durchgeführt und hinsichtlich der Klimastabilität diskutiert.

5.1 Allgemeines

Wie bereits mehrfach erwähnt ist in historischen Gebäuden ein stabiles Raumklima wichtig für die Erhaltung der Inneneinrichtung wie auch der Gebäudekonstruktion. Insbesondere werden starke Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit für Schäden an Kunstwerken aus organischen hygroskopischen Materialien verantwortlich gemacht. Die relative Luftfeuchtigkeit hängt dabei 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 Ergebnisse aus der Simulationsrechnung 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 schließlich auch der Erstellung eines Konzepts zur Verbesserung des Raumklimas.

5.2 Baugeschichte und Konstruktion

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 Parklandschaft steht es relativ offen in dem ansonsten bewaldetem Tal- und Berggelände (Bild 31 a). Das Schloss wurde kurz nach dem Tod von König Ludwig II. im Jahr 1886 zur Besichtigung für Besucher freigegeben.

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 Zentimetern vorgesetzt. Auf dieser flächigen Holzkonstruktion sind vergoldete Schnitzereien, Malschichten und weitere Dekorationen wie Tapisserien aufgebracht. Auf der als Holzkonstruktion ausgeführten und verputzten Gewölbedecke liegt in den Prunkräumen auf der Rauminnenseite oft die Malschicht eines Deckenbildes, wie in Bild 31 b zu sehen. Die Bodenkonstruktion des Obergeschosses ist mit massiven Holzbalken ausgeführt, die mit einer Kiesschüttung im Fehlboden verschlossen ist. An der Unterseite im Erdgeschoss ist größtenteils Putz aufgebracht. Für die Simulation wurden die entsprechenden feuchtetechnischen Kennwerte der im Schloss verbauten historischen Materialien aus der Datenbank der Software WUFI® und durch eigene Messungen am Fraunhofer IBP ergänzt.

Die Fenster sind aus der Bauzeit erhalten und überwiegend als Einfachfenster ausgeführt. Im Paradeschlafzimmer sind die Fenster als Kastenfenster mit zwei



Bild 31. a) Vorderansicht von Schloss Linderhof mit Haupteingang, b) königliches Schlafzimmer mit Paradebett (Bilder Bayerische Schlösserverwaltung)

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 sind zusätzlich als Lichtschutz Vorhänge angebracht, die auch bei geöffneten Fenstern meist geschlossen bleiben.

5.3 Nutzung Schloss Linderhof

Die Nutzung hat aus bauphysikalischer Sicht einen erheblichen Einfluss auf interne Feuchtelasten (wie Besucher) und den Luftwechsel und damit auf den Einfluss des Außenklimas.

5.3.1 Besucher, Aufenthaltsdauer, Profile für Wärme- und Feuchteabgabe

Schloss Linderhof ist bis auf fünf Tage ganzjährig für Besucher geöffnet, die meisten Besucher kommen im Sommer. Die Öffnungszeiten sind im Sommerhalbjahr von 8 bis 18 Uhr, im Winterhalbjahr von 10 bis 16 Uhr. Im Jahreszeitraum 12/2009 bis 12/2010 kamen 450.756 Besucher nach Linderhof. Während in den Wintermonaten von Dezember bis Februar mit durchschnittlich ca. 300 Besucher pro Tag die geringsten Besucherzahlen zu verzeichnen sind, kommen in den Sommermonaten von Juli bis September durchschnittlich ca. 2400 Besucher 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 2078 zugrunde gelegten Feuchteund Wärmeabgabe pro Person wurden detaillierte stündliche Emissionsprofile für das Simulationsjahr erstellt.

5.3.2 Lüftung, Luftwechselrate und Luftwechselprofil

Das Schloss wird im Sommer ab 7.00 Uhr durch das Personal geöffnet. 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 [28] die Luftwechselrate im Paradeschlafzimmer und angrenzenden Räumen gemessen. Es wurde jeweils im

 Tabelle 2. Mit der Tracergasmethode ermittelte sowie für die Simulation verwendete Luftwechselraten im Paradeschlafzimmer. Im Sommer fand eine zusätzliche Tag/Nacht-Messung statt

Außenluftwechsel	Tag [h ⁻¹]	Nacht [h ⁻¹]	Durchschnitt [h ⁻¹]
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



Bild 32. Obergeschoss mit Führungsroute und Lüftungsmöglichkeiten (Grundriss BSV). Die kleinen Pfeile zeigen den Weg entlang der Führungsroute, die großen Pfeile die zur Lüftung verwendeten Fenster

Sommer und im Winter über einen Zeitraum von 2 Wochen während des normalen Besucherbetriebs die Luftwechselrate als Durchschnittswert ermittelt. Die Werte sind bemerkenswert niedrig, trotz teilweise im Sommer täglich bis zu 11 Stunden geöffneter Fenster.

Die Windintensität während der Luftwechselmessung im Sommer vom 06.09.2010 bis 22.09.2010 war nur gering und wurde 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 "schwachen Brise". Bei höheren Windgeschwindigkeiten würde sich also auch eine höhere Luftwechselrate einstellen.

5.4 Raumklima

Das Raumklima im Schloss wird vor allem durch die Besucher und das Außenklima beeinflusst. Ein Überblick zeigt, wie sich die einzelnen Räume im Schloss klimatisch unterscheiden. In der Folge wird exemplarisch das Raumklima im Paradeschlafzimmer beschrieben, die Ergebnisse sind übertragbar auf die anderen Prunkräume.

5.4.1 Die Prunkräume im Vergleich

Die Klimamessungen haben in Linderhof im Februar 2008 begonnen. Seit Dezember 2009 werden stündliche Messdaten in fast allen Räumen aufgezeichnet. Es werden die relative Feuchte und Temperatur für ein Messjahr im Obergeschoss im Vergleich dargestellt.

Vergleich der relativen Feuchte im Obergeschoss:

Treppenhaus – Lila Kabinett – Paradeschlafzimmer – Rosa Kabinett – Speisezimmer – östliches Gobelin – Spiegelsaal

In Bild 33 sind die Verläufe der relativen Feuchte der angrenzenden Räume des Paradeschlafzimmers und der Verlauf der relativen Luftfeuchte des Spiegelsaals im Obergeschoss sowie des Außenklimas gegenübergestellt. Das Audienzzimmer wurde hier nicht mit dargestellt. Das Klima entspricht im Wesentlichen dem des Speisezimmers.

Entsprechend dem Jahresverlauf des Außenklimas zeigen die Innenklimate generell eine Anpassung. So sind in Perioden mit geringeren Schwankungen außen auch überwiegend geringere Schwankungen innen zu verzeichnen, erkennbar im Speisezimmer, Rosa und Lila Kabinett und Paradeschlafzimmer. Das Niveau der relativen Feuchte ist in den Räumen Speisezimmer, Rosa und Lila Kabinett im Mittel sehr gleichmäßig. Im Paradeschlafzimmer sinkt es, wie das Außenklima, in den Sommermonaten etwas ab. Das Treppenhaus zeigt eine andere zeitliche Entwicklung. Die Schwankungen der relativen Feuchte sind ganzjährig gleichmäßig stark ausgeprägt. In den Sommermonaten steigt die relative Feuchte stark an. Ein saisonaler Verlauf entsprechend der Temperatur ist erkennbar. Der Anstieg der relativen Feuchte erfolgt durch das Abkühlen der eingelüfteten warmen Außenluft. Dieser Effekt ist im Treppenhaus stärker ausgeprägt als in den anderen Räumen, da die



Bild 33. Vergleich der relativen Feuchte der Räume im Obergeschoss angrenzend zum Paradeschlafzimmer sowie Spiegelsaal mit östlichem Gobelinzimmer von 12/2009 bis 12/2010. Ein direkter Vergleich der Messkurven zeigt die unterschiedliche Verhältnisse der relativen Feuchten in den Räumen in Kurzzeitverhalten und Langzeitschwankung untereinander auf

saisonale Temperaturerhöhung geringer ist, wie in Bild 33 zu erkennen. Die starken Schwankungen der relativen Feuchte im Treppenhaus deuten auf einen hohen Luftwechsel hin. Die Schwankungen in den anderen Räumen sind etwas geringer ausgeprägt, was auf einen niedrigeren Luftwechsel als im Treppenhaus schließen lässt. Im Paradeschlafzimmer sind die Schwankungen der relativen Feuchte noch einmal geringfügig kleiner. Hier wird der geringste Luftwechsel angenommen.

Vergleich der Temperaturverläufe im

Obergeschoss:

Treppenhaus – Lila Kabinett – Paradeschlafzimmer – Rosa Kabinett – Speisezimmer

Alle Räume im Obergeschoss zeigen einen ähnlichen langfristigen (saisonalen) und mittelfristigen (Wo-

chen-)Temperaturverlauf (Bild 34). Die Räume Speisezimmer, Rosa Kabinett und Lila Kabinett haben hierbei die größte Ähnlichkeit. Die saisonale Temperaturspreizung ist mit kühleren und wärmeren Temperaturen größer als im Paradeschlafzimmer. Ebenso sind die kurzfristigen (täglichen) Schwankungen, vor allem im Sommerhalbjahr, deutlich ausgeprägter. Es wird vermutet, dass dies am schlechteren Verhältnis von Raumvolumen zu Außenwandflächen und Raumvolumen zum größeren Fensteranteil (mit niedrigeren U-Werten) liegt. Zudem werden in diesen Räumen die Fenster zum Lüften geöffnet, was wiederum einen höheren Luftwechsel und damit einen stärkeren Einfluss des Außenklimas begünstigt. Im innen liegenden Treppenhaus ist die saisonale Temperaturspreizung wesentlich geringer und auch komplett frei von Frost. Obwohl kei-





Bild 34. Vergleich der Temperaturen der Räume im Obergeschoss angrenzend zum Paradeschlafzimmer sowie Spiegelsaal mit östlichem Gobelinzimmer von 12/2009 bis 12/2010. Die saisonale Schwankung bildet sich in allen Räumen ähnlich aus. Jedoch zeigen die Räume abweichende Temperaturniveaus, saisonale Amplituden und Kurzzeitschwankungen

ne direkte Verbindung nach außen besteht, ist die kurzfristige (tägliche) Schwankung in den Sommermonaten sehr deutlich ausgeprägt. Dies lässt auf einen deutlich erhöhten Luftwechsel in diesen Monaten schließen.

5.4.2 Raumklima im Paradeschlafzimmer

Im Folgenden werden die Klimadaten für das Paradeschlafzimmer im Kontext des Außenklimas für den Zeitraum 12/2009 bis 12/2010 näher betrachtet (Bild 35). Das Außenklima geht als Randbedingung in die Simulation mit ein. Das gemessene Raumklima wird als Referenz zum Simulationsergebnis verwendet, um das rechnerische Model zu kalibrieren und zu validieren.

Die Raumluftfeuchte im Paradeschlafzimmer befindet sich über das Jahr betrachtet auf einem hohen Niveau, so liegt der Median der relativen Feuchte 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 Innentemperatur beträgt 11,4 °C und ist damit um ca. 5,9 K höher im Vergleich zum Außenklima. Zusätzlich wurden an den angrenzenden Räumen zum Paradeschlafzimmer die Klimadaten zur relativen Feuchte und Temperatur erfasst und für die Simulation aufbereitet. Insgesamt wurden neben dem Außenklima zehn angrenzende Raumklimate als Randbedingung aufbereitet und in der Simulation verwendet.

Bewertung des Raumklimas im Kontext der Präventiven Konservierung

Die relative Feuchtigkeit ist aus Sicht der Präventiven Konservierung zu hoch. Wie aus dem Streudiagramm in Bild 36 ersichtlich ist, besteht eine Gefährdung durch biologische Mikroorganismen. Auch bedeutet eine hohe relative Feuchte eine verstärkte Belastung mit organischen Keime bei Klimaschwankungen im Vergleich zu einem mittleren Feuchtebereich [33].



Bild 35. Gemessene relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer im Kontext des Außenklimas in Linderhof von 12/2009 bis 12/2010

Histogramme der Feuchte und Temperaturverteilung

Aus dem Histogramm in Bild 36 kann die Häufigkeit der einzelnen relativen Feuchtebereiche abgelesen werden. Als Intervallgröße wurde 1%-Punkt relativer Feuchte gewählt. Die deutlich trockneren und feuchteren Bereiche sind entsprechend der Verteilung mit wenigen hunderten Stunden ein geringer Anteil der Feuchteverteilung. Insgesamt lässt sich das sehr hohe Feuchteniveau hier gut erkennen. In dem Histogramm der Temperaturverteilung ist die Anzahl der Stunden mit einem Intervall von 1 K aufgetragen.

Statistische Werte

Die hier angegebenen statistischen Werte beziehen sich auf den kompletten Messbereich vom 01.02.2008 bis 01.06.2011. Der gesamte Zeitraum umfasst 29185 stündliche Werte. Wegen Messausfällen können sich Einschränkungen in der Aussagekraft der Diagramme ergeben.



Bild 36. Gesamte 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 1.2.2008 bis 01.6.2011. Im Histogramm der Temperaturverteilung sind relativ wenige Werte zwischen 6 und 17 °C. Dies deutet auf einen raschen Übergang im Frühjahr und Herbst hin





5.4.3 Besucherkomfort und Schwüle

Wie im Diagramm von Bild 37 zu sehen, werden in dem betrachteten Messjahr 1. 12. 2009 bis 30. 11. 2010 die Grenzwerte für als schwül definierte Luft häufiger überschritten. Die unter Grenze beginnt nach *Steadman* [31] bei einem Wasserdampfpartialdruck von 1600 Pa. Dies entspricht einem absoluten Wassergehalt der Luft von ca. 12 g/m³. Aus den Klimadiagrammen lassen sich mit diesem einfachen Kriterium die Zeiträume mit Schwüle identifizieren. Im Diagramm wurden zwei weitere Grenzlinien anderer Autoren für als schwül empfundene Luft angegeben.

Eine Auswertung des Messzeitraums ergab für diesen Zeitraum mit dem Kriterium nach *Steadman* [31] insgesamt 1295 Stunden, die über der Schwülegrenze von **Bild 37.** Streudiagramm Temperatur und relative Feuchte von 1.12.2009 bis 30.11.2010 im Kontext von Schwülekriterien. Die Wertepaare rechts der angegebenen Grenzen werden von Menschen als schwül empfunden. Besonders im Sommer wird die Grenze temperaturbedingt oft überschritten

12,07 g/m³ lagen. Betrachtet man nur die Zeiträume während der Öffnungszeiten ergeben sich immer noch 597 Stunden. Dies entspricht in etwa 80 Tagen. 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 extrem verstärkt.

5.4.4 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 Schwankungen in den Sommer-



Bild 38. Tägliche und maximale Schwankungen in einem Zeitraum von 24 Stunden der relativen Feuchte im Spiegelsaal (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 1.12.2009 bis 1.12.2010

monaten (Bild 38). Im Paradeschlafzimmer sind diese in den Sommermonaten stärker ausgeprägt. Hier scheint sich der Besuchereinfluss deutlicher bemerkbar zu machen als im Spiegelsaal. 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 und durch je 4 weitere Räume getrennt sind.

5.5 Gebäudesimulation des Paradeschlafzimmers

Um das Raumklima und die Wechselwirkungen mit Besuchern und Außenklima besser zu verstehen, wurde eine hygrothermische Gebäudesimulation mit der Software WUFI[®]-Plus durchgeführt. Die Simulation des Paradeschlafzimmers ist dabei als sehr 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 berücksichtigt werden muss sowie zahlreiche angrenzende Klimata, die den Raum mit beeinflussen.

5.5.1 Gebäudemodell Paradeschlafzimmer

Die Abbildung des Paradeschlafzimmers ist aufgrund von Einschränkungen bei der Software nur bedingt realitätsnah möglich. So lassen sich z. B. keine runden Flächen eingegeben. 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 39 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.



Bild 39. In die Software WUFI[®]-Plus implementiertes Gebäudemodell des Paradeschlafzimmers. Die hellen Flächen stellen die Fenster auf der Nordseite dar

Schloss Linderhof 35

Die nicht gefüllten Flächen, angrenzend zum Paradeschlafzimmer, stellen die Umrisse des Schlosses und die Kabinette dar.

Das Rechenprinzip von WUFI[®]-Plus 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 Istmaße 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.

5.5.2 Ablauf und Ergebnisse der Simulation

Zum Testen des Modells bzw. der Parameter werden die Eingangsdaten variiert und deren Auswirkungen auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation in Variantenrechnungen überprüft. Auf diese Weise wird das Modell iterativ kalibriert. Abschließend wird eine "optimierte Simulation" mit denjenigen Parametern durchgeführt, die das am besten angepasste Ergebnis im Vergleich zu den Messdaten liefert. Nachfolgend wird die Güte der Ergebnisse der optimierten Simulation im Vergleich zu den Messwerten vorgestellt. Dies erfolgt mit einem direkten grafischen Vergleich. Hierbei wird der Fokus auf die relative Feuchte gelegt. Die Bilder 40 und 41 zeigen nicht ausgewertete Zeitbereiche auf. Hier können die Simulationsdaten wegen fehlender Messdaten (Randbedingungen) der Umgebungsklimata nicht ausgewertet werden.

Die optimierte Simulation zeigt mit der relativen Feuchte in Bild 40 in den Teilbereichen 1, 3, 5 und 6 eine gute Übereinstimmung zu den Messdaten. Der Teilbereich 2 ist in der Simulation eher zu trocken, der 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 noch nicht geklärt werden. In Bild 41 wird die stündlich gleitende 24-h-Schwankungsbreite der relativen Feuchte verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Simulationswerte mit den Schwankungsbreiten der Messwerte. Die höchsten Schwankungsbreiten werden in der Simulation fast erreicht.

Die Simulation kann damit über weite Bereiche als gut an die Messwerte angepasst angesehen werden. Insbesondere die Schwankungen der relativen Feuchte, die für eine Risikoabschätzung ausschlaggebend sind, werden über den kompletten Simulationszeitraum gut abgebildet.





Bild 40. Vergleich der relativen Feuchte im Paradeschlafzimmer der optimierten Simulation mit den verifizierten Messdaten, eingeteilt in Teilbereiche 1 bis 6 (TB) von 12/2009 bis 12/2010



Bild 41. Vergleich der maximalen Schwankung der relativen Feuchte innerhalb von 24 Stunden mit stündlich gleitendem Intervall im Paradeschlafzimmer der optimierten Simulation mit den verifizierten Messdaten

5.5.3 Simulation einer Änderung der Belüftung

Bei den Raumklimauntersuchungen in Schloss Schönbrunn bei Wien wurde durch *Kippes* [29] festgestellt, 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.

Es erfolgt deshalb 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 h⁻¹ angenommen. Eine Unterscheidung in Tag und Nacht erfolgt nicht. Die Variante mit verringertem und konstantem Luftwechsel wird nicht nur mit den Messwerten, sondern auch mit der Simulation mit realen Luftwechselraten gemäß Tabelle 3 verglichen. Ab dem Frühsommer bleibt das hohe Niveau der relativen Feuchte bis zum Herbst bestehen. Dadurch wird die saisonale Schwankung mit trockeneren Sommermonaten verringert. Der absolute Wassergehalt der Luft steigt jedoch in den Sommermonaten im erheblichen Maße an (Bild 42 b) und damit auch die relative Feuchte. Die Bedingungen für Besucher werden durch das hohe Schwülepotenzial der damit sehr feuchten Luft (beginnend ab 12 g/m³ nach *Steadman* [31] nochmals

 Tabelle 3. Variante 4 mit stündlich variierenden Werten der inneren Quellen und der Luftwechselrate

Simulation Variante 4	Einheit	Tag	Nacht	Ø Jahr
Luftwechselrate n	[-]	stündlich	0,1	0,21
Wasserdampfproduktion	[kg/d]	stündlich	-	3,433
Wärmeproduktion	[kWh/d]	stündlich	-	9,807
Kohlendioxidproduktion	[kg/d]	stündlich	-	3,560



deutlich verschlechtert. Der Gehalt des Kohlendioxids steigt sehr stark an, wie in Bild 42 c gut zu erkennen ist. Die Werte der Kohlendioxidkonzentration steigen auf über 4000 ppm. Die Luftqualität sinkt damit deutlich ab. Gemäß DIN EN 13799 wird die Luftqualität bereits ab 1400 ppm als schlecht eingestuft. Die Simulation des dichten Gebäudes zeigt den starken Einfluss der Besucher auf das Raumklima, wenn die Reduzierung von Feuchte und CO₂-Gehalt durch den Außenluftwechsel wegfallen würde.

5.6 Berechnung des Schimmelpilzrisikos im Raum Anrichte

Am Beispiel der Ankleide im Untergeschoss von Schloss Linderhof wird im Folgenden eine weitere Anwendung des Schimmelpilzprognosemodells WU-FI[®]-Bio gezeigt.

5.6.1 Istzustand

In Bild 43 ist das in der Ankleide gemessene Raumklima dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die für einen Innenraum sehr hohen Luftfeuchten (Bild 43 oben), die auf der Außenwandoberfläche aufgrund dessen niedrigeren Oberflächentemperaturen über längere Zeit**Bild 42.** Relative Feuchte, absoluter Feuchtegehalt und Kohlendioxidkonzentration der Luft im Paradeschlafzimmer mit Messwert und Werten der Simulation mit realem Luftwechsel und mit Szenario geschlossener Fenster (verringerter konstanter Luftwechsel) für den Zeitraum 12/2009 bis 12/2010. Die Simulation zeigt, dass eine Abdichtung des Gebäudes ohne zusätzliche, gesteuerte Lüftung zu einem starken Anstieg der CO₂-Konzentration über die Grenze von 1400 ppm und zu höherer absoluter Feuchte im Innenraum führen würde



perioden zu Oberflächenfeuchten deutlich über 90% r. F. führen.

Mithilfe dieser Oberflächenbedingungen kann mit dem Schimmelpilzprognosemodell WUFI®-Bio das Risiko von Schimmelpilzwachstum beurteilt werden. Dabei muss vorab der Untergrund einer Substratgruppe zugeordnet werden. Ein Innenputz ist typischerweise der Substratgruppe II zuzuordnen, da er keine nennenswerten Nährstoffe für Schimmelpilze enthält. Im vorliegenden Fall handelt es sich aber um eine alte Oberfläche, bei der sich im Lauf der Jahre mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Menge Verschmutzungen abgelagert haben wird, die für das Schimmelpilzwachstum günstige Nährstoffe enthalten können. Aus diesem Grund wird bei den folgenden Berechnungen von Substratgruppe I ausgegangen. Bild 44 zeigt das Ergebnis der Berechnungen.

Man erkennt, dass der Grenzwassergehalt frühzeitig und deutlich überschritten wird (Bild 44 oben). Nur im Winter wird aufgrund der niedrigen Temperaturen und dem daraus resultierendem Ansteigen des Grenzwassergehalts dieser wieder unterschritten. Die Folge ist ein Stillstand des Wachstums in dieser Periode. Insgesamt wird ein prognostiziertes Schimmelwachstum von mehr als 500 mm erreicht und damit ein Mould-Index, der am Ende der einjährigen Berechnung fast den Wert 6 beträgt. Somit geben die Berechnungen den derzeit beobachteten Zustand realistisch wieder.





Bild 43. Für ein Jahr gemessener Verlauf (oben) des Raumklimas in der Ankleide (Temperatur und rel. Luftfeuchte) sowie der Verlauf der Oberflächentemperatur mit der daraus resultierenden Oberflächenfeuchte (unten)



Bild 44. Für ein Jahr für die Wandoberfläche in der Ankleide berechneter Verlauf des Grenzwassergehalts und des Wassergehalts der Spore (links oben); des daraus resultierenden berechneten Schimmelpilzwachstums in mm (rechts oben) und des sich damit ergebenden Mould-Indexes MI (rechts unten)



5.6.2 Zur Schimmelpilzvermeidung erforderliche Maßnahmen

Dieses Prognosemodell kann natürlich auch genutzt werden, um abzuschätzen, welche Maßnahmen erforderlich sind, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden. Im Folgenden soll als relativ einfache Maßnahme die Trocknung der Raumluft auf eine maximale Luftfeuchte untersucht werden. Dies bedeutet, dass ein Raumlufttrockner die Raumluft nicht ungeregelt trocknet, sondern nur dann arbeitet, wenn eine Luftfeuchtegrenze überschritten wird. Es stellt sich nun die Frage, welche maximale Luftfeuchte zulässig ist, ohne Schimmelpilzwachstum zu bewirken. Ausgehend von einer maximalen Raumluftfeuchte von 75% r. F wird dazu die Raumluftfeuchte in 5%-Schritten reduziert, bis ein positives Ergebnis erzielt wird. Mithilfe des Raummodells WUFI®-Plus wird die daraus resultierende Oberflächenfeuchte als Randbedingung für das Prognosemodell berechnet.



Bild 45. Für ein Jahr gemessener Verlauf der Raumluftfeuchte in der Ankleide und die sich im Vergleich dazu ergebenden Luftfeuchten a) bei eine Begrenzung der maximalen Luftfeuchte auf 75, 70 und 65 % sowie b) die sich daraus berechneten Verläufe der Oberflächenfeuchte

Bild 45 a zeigt den Verlauf der Raumluftfeuchte und der sich im Vergleich dazu ergebenden Luftfeuchten bei einer Begrenzung der maximalen Luftfeuchte auf 75, 70 und 65%. In Bild 45 b sind die aus den Raumluftfeuchten berechneten Oberflächenfeuchten dargestellt. Bild 46 zeigt die Ergebnisse des Prognosemodells bei den unterschiedlichen maximalen Raumluftfeuchten. Eine Reduzierung der Raumluftfeuchte auf 75% ergibt bereits eine deutliche Verbesserung der Situation. Das



Bild 46. Für ein Jahr für die Wandoberfläche in der Ankleide berechneter Verlauf des a) Grenzwassergehalts und des Wassergehalts der Spore, b) des daraus resultierenden berechneten Schimmelpilzwachstums in mm und c) des sich damit ergebenden Mould-Indexes MI für die auf 75, 70 und 65 % begrenzten Raumluftfeuchten

nach einem Jahr berechnete Schimmelpilzwachstum reduziert sich von über 550 mm auf ca. 325 mm und somit der Mould-Index von 5,8 auf 3,9. Damit wird unter diesen Randbedingungen auf jeden Fall noch sichtbares Schimmelpilzwachstum zu erwarten sein. Bei einer maximalen Raumluftfeuchte von 70% liegt das berechnete Wachstum bei knapp unter 200 mm und der Mould-Index bei etwa über 2. Erst ab einem Mould-Index von unter 2 ist aber gemäß dessen Definition sichtbares Schimmelpilzwachstum auszuschließen. Mit einer Begrenzung auf 70% r.F. ist somit die Grenze der erforderlichen Trocknung fast erreicht. Bei 65% maximaler Raumluftfeuchte ergeben sich bereits mit berechneten 60 mm und einem Mould-Index von unten 0,2 völlig unkritische Werte, bei denen keinerlei sichtbares Schimmelpilzwachstum zu befürchten ist.

5.7 Zusammenfassung und Maßnahmenempfehlungen

Die Auswertung der erhobenen Klimadaten am Schloss Linderhof und die Gebäudesimulation des Paradeschlafzimmers zeigen, dass im Wesentlichen zwei Faktoren für das Raumklima in Schloss Linderhof maßgeblich sind:

- Hohe relative Feuchten in Kombination mit hohen Temperaturen, die zum einen den Komfort der Besucher stark einschränken (Schwüle), die aber auch zum anderen eine Gefährdung der Kunstwerke durch Quellvorgänge der Materialien wie auch durch Mikroorganismen bedeuten.
- Starke und vor allem häufige Kurzzeitschwankungen der relativen Luftfeuchte innerhalb von 24 Stunden, die zu einem dauernden Quellen und Schwinden der Kunstmaterialien führen, das über die Zeit zur Ablösung von Vergoldungen und Malschichten führt und damit zu einem langsamen, aber kontinuierlichen Verfall beiträgt.

Wenn man das Schloss und seine Ausstattung dauerhaft über die nächsten Jahrhunderte mit seinen originalen Materialien und Oberflächen erhalten will, besteht hier dringender Handlungsbedarf.

Es konnte gezeigt werden, dass das Raumklima eng mit dem Außenklima in Zusammenhang steht. Auch 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 natürlichen Lüften besteht. Dieses Lüften führt zu den beschriebenen verstärkten Schwankungen. Die im Vorfeld erhobenen Konstruktionsdaten bildeten die Grundlage für die Gebäudesimulation. Das Gebäudemodell der Simulation wurde, soweit notwendig und zulässig, gegenüber den realen Verhältnissen vereinfacht. Hier wurde ein großes Augenmerk auf die Flächen- und Volumenkongruenz zwischen realem Gebäude und dem Modell gelegt. Zur Auswirkung des Luftwechsels auf den Feuchtegehalt der Raumluft im Paradeschlafzimmer wurde ein Szenario mit verringertem Außenluftwechsel simuliert und dargestellt. Es zeigt sich eine Anhebung der CO₂-Konzentration der Luft und der relativen Feuchte im Sommerhalbjahr mit hohen absoluten Feuchtegehalten.

Im Laufe der Arbeiten hat sich die interzonale Strömung als wichtige Einflussgröße für die Simulation herausgestellt. Hierzu und zur Erfassung von Strömungsmustern ist weiterer Forschungsbedarf gegeben. Die Untersuchungen in Linderhof bieten darüber hinaus die Möglichkeit, viel über die Wechselwirkungen zwischen Raumklima und Kunstwerken, Techniken und Materialien zu lernen. In der Betrachtung der Kunsttechniken und deren Erhaltung unter den gegebenen klimatischen Bedingungen liegt eine große Chance, einen wichtigen Beitrag zur internationalen Diskussion um die richtigen Klimawerte in Museen und historischen Gebäuden zu leisten. Weitere konservatorische Untersuchungen sind dazu geplant.

Vorgeschlagen wird ein mehrstufiges Lüftungskonzept, 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 Kurzzeitschwankungen. 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 Beund Entlüftung der Räume, nahe am derzeitigen hauptsächlich durch freie Fensterlüftung erzeugten Klima, erfordert dabei einen erheblich geringeren Energieeinsatz als eine "Vollklimatisierung". Das generelle Klima im Schloss wird im Wesentlichem 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.

6 Renatuskapelle, Lustheim

Baugeschichte und Lage

Die Renatuskapelle befindet sich im südlichen Pavillon des Schlosses Lustheim im Park von Schleißheim. Sie war Teil einer Klause, die zu Beginn des 17. Jahrhunderts entstand und ab 1686 an die jetzige Stelle verlegt wurde. So enthielt der Neubau *Henrico Zuccallis* Wohnraum für zwei Franziskanermönche, die Kapelle



Bild 47. Ansicht der Fassade des südlichen Pavillons in Lustheim. Die Renatuskapelle liegt im linken Teil des Pavillons

und im Emporenbereich Plätze für die kurfürstliche Familie. Dadurch kam die Renatuskapelle in ihrer Funktion einer Schlosskapelle gleich. Sie besitzt einen längsovalen, in ein Rechteck eingeschriebenen Grundriss, der auf römische Vorbilder zurückgeht [41]. Die im nördlichen Teil des Pavillons gelegene Kapelle ist nach Osten ausgerichtet und von außen nicht als Kirchenraum erkennbar.

Im 20. Jahrhundert war sie für mehrere Jahrzehnte in Vergessenheit geraten. Die Ausstattung wurde bereits Ende der sechziger Jahre ausgelagert. Es folgte der Einbau einer Horizontalsperre durch das Mauersägeverfahren, der Putz am Sockel wurde innen und außen abgeschlagen, die Fassade war von Efeu bewachsen, die ehemaligen Klausner-Unterkünfte lagen unbewohnt und verlassen. In den neunziger Jahren begann schließlich die Sanierung der beiden Pavillons nördlich und südlich von Schloss Lustheim und damit auch die Suche nach einem Konzept für die Kapelle.

Wegen langer Frostperioden im Winter und Kondensatproblemen durch die hohe Feuchte im Inneren wurde mit der Gesamtsanierung Ende 2002 eine Bauteiltemperierung eingebaut. Die Ziele, die damit verfolgt wurden, waren das Anheben der Temperatur im Winter, um Frost zu vermeiden, und die Reduzierung der relativen Luftfeuchte während der warmen Jahreszeit, um die Kondensation von Feuchte an kalten Wandoberflächen zu verhindern. Beides wurde durch kontinuierliches Beheizen des Wandsockels mit zwei unter Putz liegenden Heizrohren erreicht. Die Temperierung in der Renatuskapelle dient dabei weniger dem Beheizen des Raums für den Komfort von Besuchern, sondern ist vielmehr als konservatorische Maßnahme zum Erhalt der Bausubstanz und der Kunstwerke zu verstehen.

Der südliche Pavillon liegt, wie sein nördliches Ebenbild, zwischen dem erst in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts gegrabenen Ringkanal und dem älteren äußeren Kanal. Der Ringkanal wird aus dem äußeren Kanal gespeist, der über den *Schleißeimer Kanal* mit der Isar und den Karlsfelder Kanal mit der Würm in Verbindung steht [37].

Das Bodenniveau der Kapelle ist nur geringfügig höher als der Wasserspiegel. Wie sich jedoch bei Arbeiten an den Fundamenten der Pavillons gezeigt hat, sind die Kanäle dicht [34]. Durch die umgebenden Bäume und die lange Allee im Westen ist die Kapelle vor starkem Wind geschützt.

Ausstattung

Die Ausstattung umfasst Kunstgegenstände aus einer Vielzahl verschiedener Materialien. Der "Wiesheiland" und die Seitenaltäre sind aus Holz und tragen polychrome Fassungen auf Kreidegrund. Die Klosterarbeiten



Bild 48. Der "Wiesheiland", Teil der Ausstattung der Renatuskapelle in Lustheim

sind, wie auch die Kerzenleuchter, aus Metall gefertigt. Sie enthalten in ihrem Inneren kleine Wachstafeln und sind mit Textilien ausgekleidet. Es finden sich Vergoldungen sowohl an den Ausstattungsgegenständen als auch an Raumschale und der Rahmung des Altarblattes. In der Kapelle ist eine Vielzahl historischer Kunstmaterialien vertreten. Die Wahl geeigneter Klimawerte muss somit zwangsläufig einen Kompromiss darstellen. Eine Risikoabschätzung kann dabei aufzeigen, an welchen Punkten akuter Handlungsbedarf besteht und welche Materialien besonders gefährdet sind. Die Ausstattung wurde 1968 ausgelagert, befand sich seither im Depot und kam mit dem Abschluss der Restaurierungsarbeiten im Frühjahr 2005 zurück.

Sanierung des südlichen Pavillons

Im Zuge der Sanierung des Schlosses Lustheim 1968–1971 war im südlichen Pavillon eine Horizontalsperre mit dem Mauersägeverfahren eingebaut worden. Die Putze der Sockelzone wurden dabei innen und außen bis auf eine Höhe von ca. 1,20 m abgeschlagen. Die Sägefuge wurde mit Zementmörtel verschlossen. Das Ziegelmauerwerk blieb offen stehen, vermutlich um eine bessere Trocknung zu erreichen. Die Horizontalsperre wurde nur an den Außenmauern eingesetzt, die Innenmauern wurden nicht bearbeitet.

Trotz des Einbaus der Horizontalsperre war der ungenutzte Kapellenbereich weiterhin feucht und kalt, wie Klimadaten aus den Jahren 1991 bis 1993 und 2001/2002 belegen [33]. Im nordwestlichen Bereich der Kuppel entstanden durch eine Undichtigkeit des Daches Feuchteschäden, auch das Deckenbild zeigt in diesem Bereich Schäden. Die Folgen waren Fehlstellen und Schollenbildung, die 1996 eine Konservierung notwendig machten. Schimmelbildung in den dunkleren Partien der Malerei wurde als Hinweis auf ungünstige Klimabedingungen gedeutet.

Im Rahmen der konstruktiven Sanierung des Pavillons nach 1992 wurden drei für das Klima besonders relevante Maßnahmen durchgeführt: Die Erneuerung der Wärmedämmung über der Kuppel bei der Dacherneuerung 1996, der Einbau der Wandtemperierung 2002 und die Abdichtung der Raumschale mit der Restaurierung der historischen Fenster 2003.

Über der Kuppel des Deckenbildes wurde im Fehlboden eine Wärmedämmung aus Flachswolle eingelegt. Im Fehlboden zwischen den Balkenlagen des Dachbodens wurde eine Schüttung aus Blähton eingebracht. Dadurch wurde der Temperatur- und Feuchtegradient zwischen der Oberfläche des Deckenbildes und der Raumluft verringert.

Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle verfügt über zwei Heizkreisläufe, jeweils mit Vor- und Rücklauf. Der Vorlauf liegt direkt über der Oberkante des Bodenbelags, noch unterhalb der Horizontalsperre, der Rücklauf liegt ca. 90 cm darüber. Der südöstliche Heizkreis fährt die Süd- und Ostwand im Erdgeschoss ab, steigt in der Nordwest-Ecke ins Obergeschoss auf, um einmal die kleine Galerie zu umfahren und dort umzukehren. Der nordwestliche Kreislauf umfasst Westwand, Sakristei und Nordwand. Die verlegten Heizrohre haben eine Gesamtlänge von 136,25 m, die sich in etwa gleichmäßig auf beide Heizkreise aufteilt. Einbau und Probelauf der Wandtemperierung erfolgten zwischen dem 19. und 21. November 2002. Die Kupfer-Rohre wurden eingeputzt und dann in Betrieb genommen. Das Metall dehnt sich dabei aus und es entsteht der für Bewegungen der Rohre in Längsrichtung notwen-



Bild 49. a) Schnitt durch die Außenwand mit Kennzeichnung der Lage der Horizontalsperre und des Vorlaufs bzw. Rücklaufs der Temperierung, b) Ausschnitt mit unterem Rohr (Vorlauf) der Temperierung unter dem Innenputz am Sockel der Renatuskapelle

dige Freiraum. Der endgültige Beginn der Temperierung erfolgte am 9. Dezember 2002. Zu diesem Zeitpunkt begannen auch Putzarbeiten in der Kapelle, die bis zum 18. Dezember 2002 dauerten. Die Sockelzone wurde mit einem Grundputz versehen.

Trotz der nach historischem Vorbild bleiverglasten Fenster wurde eine ausreichende Dichtigkeit des Gebäudes erreicht. Lediglich die Außentür und die obere Tür zum Dachboden bedurften weiterer Abdichtung. Das bewusste Lüften der Kapelle an drei Tagen im Frühjahr 2004 hat starke Schwankungen der relativen Luftfeuchte ausgelöst, daher wurde mit der Öffnung der Renatuskapelle für den Besucherverkehr ein Windfang eingebaut.

6.1 Problemstellung

Hier soll gezeigt werden, wie sich das Klima in der Renatuskapelle in Lustheim derzeit verhält. Daraus sollen Rückschlüsse gezogen werden, welchen Einfluss die Nutzung, der Einbau der Feuchtesperre in den aufgehenden Wänden und die Temperierung nach $Gro\beta e$ schmidt [44] auf das Raumklima in der Kapelle sowie auf ihre Ausstattung hat.

Eine besondere Fragestellung stellt dabei die Art des Feuchtetransports dar, der durch die Temperierung verursacht wird, wie auch die Frage nach dem Energiebedarf des Systems im Vergleich zu konventionellen Systemen. Zu diesem Zweck wurden Simulationen mit der Software WUFI[®] 2D angefertigt, die diese Fälle näher beleuchten.

6.2 Klimamesstechnik

Um die Veränderungen durch die Sanierung zu dokumentieren, erfolgten in den Jahren 2001 bis 2004 ausführliche Klimamessungen. Diese begannen zur Erfassung des Vorzustands im Winter 2001/2002, ein Jahr vor dem Einbau der Wandtemperierung, um auf der Basis dieser Daten später die Ziele für die Sanierung zu formulieren. Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen in der Renatuskapelle wurden durch das Labor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege, Dr. Eberhard Wendler durchgeführt. Im Winter 2000/2001 wurde die Anlaufphase der Temperierung dokumentiert und im Winter 2003/2004 das Klima nach einem Jahr Betrieb. Diese Fülle von Daten, zusammen mit dem detaillierten Bautagebuch der in der Kapelle arbeitenden Restauratoren, eröffnete die Möglichkeit für die Beschreibung und Auswertung der klimatischen Veränderungen [33]. Es wurden erneut Daten im Zeitraum vom 20.12.2007 bis zum 21.04.2011 erhoben und ausgewertet. Für die Aufzeichnung der Daten wurden Datenlogger und Sensoren einer kleineren Firma eingesetzt, die Partner im Projekt sind. Während der Messungen kam es immer wieder zu Ausfällen der Datenlogger (s. Bild 51), insgesamt lässt sich jedoch ein gutes Bild vom Raumklima in der Kapelle nach den ersten 7 Jahren Betrieb der Bauteiltemperierung gewinnen.

6.2.1 Messpositionen

Es kamen unterschiedliche Messsysteme zum Einsatz. Ein MIG-03-Datenlogger wurde mit vier Sensoren versehen, die Temperatur und Feuchte an der Innenoberfläche der Außenwand auf Höhe des Vorlaufs und auf



Bild 50. Foto und Thermografie der Altarwand im Winter. Auf der Thermografie ist sowohl der Vorlauf als auch der Rücklauf der Temperierung deutlich zu erkennen. Oberhalb des erwärmten Bereichs mit den Rohren ist die Temperatur der Wände und auch des Altarbildes sehr homogen





Bild 51. Übersicht über die vorhandenen Daten, die seit Messbeginn aufgezeichnet wurden



Bild 52. Datenlogger MIG 03 mit den Oberflächensensoren auf der Wand auf Höhe des Vorlaufs (unten) und des Rücklaufs (oben) der Temperierung



Bild 53. Lage der Sensoren für das Außenklima, wobei ein MIG-05-Datenlogger im Außenbereich auf dem Gesims und der Zweite im Innenbereich hinter der Tür liegen

Loggernummer und Typ	Lage	Messung				
011 (MIG 03)	im Innenraum	Temp (Oberfläche), r. F. (innen), Temp (innen)				
142 (MIG 05)	im Dachraum	r. F. (Dach), Temp (Dach)				
148 (MIG 05)	außen	r. F. (außen), Temp (außen)				
150 (MIG 05)	im Innenraum hinter dem Seitenaltar	r. F. (innen), Temp (innen)				
152 (MIG 05)	im Innenraum	r. F. (außen), Temp (außen)				
173 (MIG 05)	im Innenraum	r. F. (innen), Temp (innen)				

Tabelle 4. Übersicht über die verwendeten Datenlogger in der Renatuskapelle in Lustheim

Höhe des Rücklaufs sowie das Innenraumklima aufzeichnen (Bild 52).

Im Juli und August 2010 wurden die Datenlogger neu kalibriert und zeichnen seit ihrem Wiedereinbau am 9. September 2010 durchgängig auf. Des Weiteren wurden fünf MIG-05-Datenlogger eingesetzt, die jeweils Lufttemperatur und relative Luftfeuchte im Innenraum, außen und im Dachgeschoss aufzeichneten (s. auch Bilder 51 und 53):

- das Außenklima einmal mit einem MIG-05-Logger, der unter Außenbedingungen gelagert wurde (im Folgenden auch mit außen/außen gekennzeichnet) und einem weiteren MIG-05-Logger, der im Innenraum lagerte und dessen Sensor nach außen verlegt wurde (im Folgenden mit innen/außen gekennzeichnet);
- das Innenklima, als Redundanz zur Aufzeichnung des MIG 03;



Bild 54. Grundriss des südlichen Pavillons mit Lage der Sensoren und Logger in der Renatuskapelle in Lustheim. Logger Nr. 142 liegt im Dachraum über dem Deckengemälde. Logger Nr. 152 liegt innen hinter der Tür und misst das Außenklima über einen Sensor an einem Kabel

im Dach über dem Deckengemälde (Kuppel);
Redundanz für die Messungen im Dach, seit dem 25.5.2009 zur Messung des lokalen Mikroklimas hinter einem der Seitenaltäre.

6.3 Raumklima

Da die Klimaaufzeichnungen Lücken aufweisen, wurde je ein komplettes Referenzjahr für die Bewertung des Raumklimas an den unterschiedlichen Messpunkten nach mehrjährigem Betrieb der Bauteiltemperierung aus Teilbereichen zusammengesetzt. Dazu wurden die Daten, die im Zeitraum vom 9.9.2010 bis zum 12.4.2011 (7 Monate) aufgezeichnet wurden, zugrunde gelegt und mit Messdaten aus dem Jahr 2009 aufgefüllt. Auch für das Außenklima wurde zu Vergleichszwecken ein solches Jahr gebildet (Bild 55).

Insgesamt liegt das Raumklima in einem günstigen Bereich. Auch liegen im Vergleich zu den Messungen vom Winter 2003/2004 keine zu trockenen Bedingungen im Raum mit relativer Feuchte unterhalb 40% r. F vor. Es fällt jedoch auf, dass in den Sommermonaten die relative Luftfeuchte mit Werten bis zu 85% r.F. erheblich ansteigt, also bis in einen Bereich, bei dem die Aktivität von Mikroorganismen wahrscheinlich wird. Das liegt daran, dass die Außentemperaturen im Sommer deutlich über den Innentemperaturen liegen. Da wärmere Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, enthält die Luft außen deutlich mehr absolute Feuchte. Durch natürliche Belüftung des Gebäudes (Infiltration/Fugenlüftung) kommt diese Feuchtigkeit in den Innenraum und führt dort zu der beobachteten hohen relativen Luftfeuchte. Dies tritt ein, obwohl die Temperierung in der Kapelle auch im Sommer betrieben wird. An der Oberfläche liegt daher auch die Feuchte deutlich niedriger. Der Vorlauf wird im Sommer auch auf derselben Temperatur betrieben wie im Winter.

6.4 Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung

Die Vorteile beim Einsatz der Bauteiltemperierung bei örtlich vorliegenden hohen Materialfeuchten an innenseitigen Oberflächen durch aufsteigende Feuchte, Sommerkondensation oder andere Effekte sind unumstritten. Mit dieser Technik kann an den Problemstellen die Feuchte reduziert und z.B. mikrobieller Bewuchs verhindert werden. Es wird aber auch immer wieder das Argument angeführt, dass die Bauteiltemperierung auch eine energiesparende Beheizung des Raums darstellt. Begründet wird dies damit, dass durch die Wandtrocknung die Wärmeleitfähigkeit des Materials sinkt und somit im Vergleich zu einer konventionellen Beheizung die Transmissionsverluste so deutlich reduziert werden, dass sich insgesamt ein merklicher Energieeinspareffekt ergeben wird. Gerade bei der Anwendung in der Renatus-Kapelle stellen sich aber auch eine Reihe zusätzlicher Fragen über die Wirkung einer derartigen Temperierung. Bei diesem Beispiel mit aufsteigender





Bild 55. Jahresverlauf der Temperatur und relativen Feuchte in der Renatuskapelle. Das Referenzjahr setzt sich wegen Lücken in der Aufzeichnung aus drei Bereichen zusammen, vom 1.1.2011 bis 12.4.2011, 12.4.2009 bis 8.9.2009 und 9.9.2010 bis 31.12.2010

Feuchte im Sockelbereich ist von besonderem Interesse, wohin denn die ausgetriebene Feuchte transportiert wird. Trocknet der Wandabschnitt nach außen oder zu einem großen Teil nach innen ab? Wird der bei der aufsteigenden Feuchte auftretende Kapillartransport aus dem Untergrund durch die Temperierung maßgeblich reduziert oder nicht sogar dauerhaft verstärkt? Eine Beantwortung dieser Fragestellungen wird kaum mit messtechnischen Mitteln möglich sein, da in situ keine durch Diffusions- oder Kapillartransportvorgänge

hervorgerufene Feuchtemassenströme im Wandaufbau ermittelt werden können. Aus diesem Grund werden für diese Fragestellungen rechnerische Untersuchung durchgeführt. Diese erlauben einerseits, die ablaufenden Vorgänge im Mauerwerk zu betrachten und ermöglichen andererseits auch den Vergleich der Situation mit konventioneller Beheizung und Bauteiltemperierung unter exakt gleichen Randbedingungen.



Bild 56. Statistische Übersicht über das Innenklima innerhalb eines Jahres, Zeiträume wie Bild 55. Die relative Feuchte liegt zwischen 42 und 84 %, die Temperatur zwischen 5 und 26 °C. In den Sommermonaten ist aufgrund der hohen Feuchte das Risiko von Schimmel- und Algenwachstum vorhanden

6.4.1 Durchführung der Untersuchungen

Für die Berechnungen wird ein Wandaufbau implementiert, der dem der Renatuskapelle möglichst nahe kommt. Die Materialkenndaten entstammen der WU-FI[®]-Materialdatenbank und wurden ggf. für eine bessere Übereinstimmung modifiziert. Eine exakte Abbildung der in der Renatuskapelle vorliegenden Situation ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Die grundsätzlichen Vorgänge werden aber trotzdem richtig wiedergegeben und ermöglichen somit die Beantwortung der oben aufgeführten Fragen.

Als Außenklima wird das Münchner Testreferenzjahr angesetzt. Als Innenklima wird von einem den durchgeführten Messungen nahe kommendem Jahresverlauf ausgegangen, mit einer Raumlufttemperatur zwischen 8 °C und 20 °C und einer Luftfeuchte zwischen 40 % und 65 %. Die Wärmeübergangskoeffizienten liegen innen bei 8 und außen bei 17 W/m². Da die Feuchtetransportvorgänge sehr langsam ablaufen, wird eine Periode von 1,5 Jahren berechnet. Die Berechnungen erfolgen nicht wie üblicherweise in Stundenschritten, sondern in Schritten von 2 Stunden, um die bei dem vorliegenden komplexen Wandaufbau ansonsten extrem langen Berechnungszeiten etwas zu verkürzen. Die Wand ist nach Norden ausgerichtet, sodass ein Schlagregeneinfluss und die solare Einstrahlung weitgehend vernachlässigt werden kann und der größere Zeitschritt keine Ergebnisverfälschung bewirkt.

In Bild 57 ist der implementierte Aufbau dargestellt. Die beidseitig mit Kalkputz versehene Wand besteht aus Vollziegeln. Wie in der realen Renatuskapelle auch ist ca. 10 cm oberhalb des Bodens eine Horizontalsperre eingebaut. Das Vorlaufrohr für die Bauteiltemperierung befindet sich direkt hinter dem Innenputz mit einer Dicke von 1,5 cm in halber Höhe zwischen Boden und Horizontalsperre. Der Rücklauf liegt 1 m oberhalb des Bodens, also deutlich oberhalb der Horizontalsperre. Da im verwendeten Berechnungsprogramm keine runden Geometrien eingegeben werden können, sind die Rohre mit quadratischem Querschnitt implementiert. Die Vorlauftemperatur beträgt 60 °C, die des

в

Renatuskapelle, Lustheim 47

Rücklaufes 55 °C. Da hier vor allem die Transportvorgänge in der Wand von Interesse sind, wurde beim Bodenaufbau neben Wand und Fundament aus Vollziegeln von einem nicht kapillar aktivem Material ausgegangen. Das Fundament steht permanent im Grundwasser, sodass aufsteigende Feuchte stattfindet.

In Bild 57 a ist der komplette für die Berechnungen implementierte Aufbau dargestellt. Bei den Berechnungen ohne Bauteiltemperierung wird der gleiche Aufbau angesetzt, allerdings ohne die Heizungsrohre. Bild 57 b zeigt einen Detailausschnitt des Aufbaus unterhalb der Horizontalsperre. In diesem Bereich werden die wesentlichen Transportvorgänge stattfinden und er wird im Folgenden genauer betrachtet.

6.4.2 Ergebnisse der Untersuchungen

6.4.2.1 Trocknung durch Bauteiltemperierung

Bild 58 zeigt den Wassergehaltsverlauf des Sockelbereichs unterhalb der Horizontalsperre. Man erkennt, dass auch ohne Bauteiltemperierung eine Trocknung erfolgt. Dies ist darin begründet, dass bei den Berechnungen in diesem Bauteilabschnitt von einem mit Wasser gesättigten Zustand ausgegangen wurde und nicht von einem bereits eingeschwungenen Zustand, da es derzeit noch nicht möglich, ist in WUFI[®]-2D zweidimensionale Wassergehaltsverteilungen als Anfangszustand einzule-



Bild 57. a) Implementierter Aufbau zur Berechnung der am Beispiel der Renatuskapelle ablaufenden hygrothermischen Vorgänge bei einer Bauteiltemperierung, b) Detail unterhalb der Horizontalsperre





Bild 58. Verlauf des Wassergehalts im Sockelbereich unterhalb der Horizontalsperre ohne und mit Bauteiltemperierung



Bild 59. Berechnete Temperaturverteilung zu einem ausgewählten Zeitpunkt im Winter (15. Februar). Der Einfluss der Bauteiltemperierung (Vor- und Rücklauf) ist klar erkennbar



Vatercontent [kg/m*] 0 <= x < 25 25 <= x < 50 50 <= x < 75 75 <= x < 100 100 <= x < 125 125 <= x < 150 150 <= x < 175 175 <= x < 200 200 <= x < 225 225 <= x < 250



b)



Vatercontent [kg/m*] 0 <= x < 25 25 <= x < 50 50 <= x < 75 75 <= x < 100 100 <= x < 125 125 <= x < 150 150 <= x < 175 175 <= x < 200 200 <= x < 225 225 <= x < 250

Bild 61. Berechnete Wassergehaltsverteilung nach einem 1,5 Jahren a) mit und b) ohne Bauteiltemperierung. Der Einfluss der Bauteiltemperierung (hier nur Rücklauf) ist klar erkennbar



Bild 62. Verlauf des Wassergehalts im Bereich zwischen Fußbodenoberkante und Horizontalsperre ohne und mit Bauteiltemperierung

sen. Man erkennt aber auch, dass mit Bauteiltemperierung eine verstärkte Trocknung stattfindet.

Der Grund für die schnellere Austrocknung mit Bauteiltemperierung liegt in der starken örtlichen Erwärmung des Mauerwerks. Dies ist gut erkennbar in der Temperaturverteilung, wie sie in Bild 59 für einen ausgewählten Zeitpunkt im Winter dargestellt ist.

In Bild 60 b ist für die Situation ohne Wandtemperierung die Wassergehaltsverteilung nach 1 Monat dargestellt. Man erkennt eine gewisse Trocknung zur Innen- und Außenseite hin. Vergleicht man dies mit dem Ergebnis bei Betrieb der Bauteiltemperierung (Bild 60 a), fällt die starke Austrocknung um das Heizrohr herum sofort ins Auge. Auch im Außenbereich ist eine etwas stärkere Abtrocknung gegeben. Dies ist darin begründet, dass auch hier ein höheres Temperaturniveau vorliegt als ohne Bauteiltemperierung. Noch augenfälliger ist die Situation zum Ende der Berechnungszeit nach 1,5 Jahren (Bild 61). Ein wesentlich größerer Bereich um das Vorlaufrohr ist nun nahezu ausgetrocknet, sodass der Wassergehalt zwischen Fußbodenoberkante und Horizontalsperre deutlich niedriger ist als ohne Betrieb der Bauteiltemperierung. Dies zeigt sich auch, wenn man für diesen Bereich den Verlauf des Wassergehalts darstellt (Bild 62).

49

Renatuskapelle, Lustheim





Bild 63. Integraler Verlauf der Wärmestromdichten über die Außenwand für den Aufbau mit und ohne Wandtemperierung

6.4.2.2 Energieverbrauch

Um zu überprüfen, ob der Betrieb der Bauteiltemperierung aufgrund der Wandtrocknung eine energiesparende Beheizung darstellt, wird der Verlauf des Energieflusses über die Außenwand oberhalb des Bodens (zwischen Punkt A und B in Bild 63, gestrichelte Linie) mit und ohne Temperierung verglichen. Da in beiden Fällen das gleiche Innenraumklima zugrunde liegt, müsste damit eine potenzielle Einsparung erkennbar werden. Man erkennt jedoch, dass mit Bauteiltemperierung deutlich höhere Wärmeströme vorliegen. Verstärkend kommt hier hinzu, dass die Bauteiltemperierung auch außerhalb der üblichen Beheizungszeiten in Betrieb ist.

Betrachtet man die Wärmedurchlasswiderstände- bzw. den Wärmedurchgangskoeffizienten der Wand wird klar, warum dies so sein muss. Zum Ende der Berechnung liegt der mittlere Wassergehalt ohne Temperierung bei 113 kg/m³, mit dagegen nur bei 75 kg/m³. Damit steigt der Wärmedurchlasswiderstand der Ziegelwand von 0,34 m²K/W auf 0,42 m²K/W. Allerdings findet bei der Bauteiltemperierung der Wärmeübergangswiderstand von der Raumluft zur Wand wegfällt. Dies führt dazu, dass trotzdem der Wärmedurchgangskoeffizient von 1,9 auf 2,2 W/m²K steigt.

6.4.2.3 Aufsteigende Feuchte

In Bild 64 ist der Kapillarstrom über die Grenze C-A (s-Bild 57) dargestellt. Mit Bauteiltemperierung ergibt sich ein höherer Kapillarstrom als ohne, d. h. der kapillare Feuchtetransport aus dem Boden wird durch die Temperierung der Wand verstärkt. Dies ist darin begründet, dass durch die Bauteiltemperierung bewirkte Trocknung des Bereiches nahe des Heizrohrs der Wassergehaltsgradient hier vergrößert wird und damit auch die treibende Kraft für den Kapillartransport.



Bild 64. Integraler Verlauf der Kapillarstromdichten über die Grenze C-A (siehe Bild 57) für den Aufbau mit und ohne Wandtemperierung

6.4.2.4 Diffusion nach innen

Bild 65 zeigt den integralen Verlauf der Diffusionsstromdichte über die Grenze C-D (s. Bild 57), also zum Innenraum hin. Mit Bauteiltemperierung ergibt sich ein wesentlich höherer Diffusionsstrom als ohne. Dies bedeutet, dass ein großer Teil der Bauteilfeuchte nach innen abgegeben wird. Der Unterschied zum nicht temperierten Fall ist vor allem anfangs extrem groß, wie sich aus der in Bild 66 dargestellten Diffusionsstromdichte erkennen lässt. Der zu Beginn der Berechnung vorliegende hohe Wassergehalt wird durch die Beheizung sehr schnell ausgetrieben, was zu enorm hohen Diffusionsströmen nach innen führt. Nach etwa 10 Monaten wird aber ein nahezu eingeschwungener Zustand erreicht, sodass sich für beide Fälle die Diffusionsströme annähern. Die Diffusionsströme verlaufen ab die-



Bild 65. Integraler Verlauf der Diffusionsstromdichten über die Grenze C-D (s. Bild 57) für den Aufbau mit und ohne Wandtemperierung

sem Zeitpunkt nahezu parallel. Allerdings ist mit Bauteiltemperierung der Diffusionsstrom nach innen mit etwa doppelter Höhe weiterhin wesentlich größer.

6.4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Zur Beurteilung der hygrothermischen Vorgänge bei einer Bauteiltemperierung wurden zweidimensionale instationäre Berechnungen durchgeführt. Zugrunde gelegt wurde dazu das Beispiel der Renatuskapelle, da hierfür zumindest teilweise messtechnische Untersuchungsergebnisse vorliegen. Es wurde versucht, die dortige Situation möglichst realitätsnah abzubilden. Eine exakte Abbildung ist aber mangels ausreichender Daten für Material und Randbedingungen sowie programmtechnischer Einschränkungen nicht möglich. So kann z. B die Berechnung nicht mit einem eingeschwungenen Zustand des Mauerwerks in Bezug auf die zweidimensionale Feuchteverteilung begonnen werden. Insofern geben die Rechenergebnisse nicht die exakte Situation der Renatuskapelle wieder. Dies war aber auch nicht die Zielsetzung dieser Berechnungen. Der Zweck dieser Untersuchungen liegt darin, die offenen Fragen, die bei einer Bauteiltemperierung auftreten, zu beantworten und die dabei auftretenden hvgrothermischen Vorgänge besser zu verstehen.

Die Berechnungen bestätigen, dass die Bauteiltemperierung ihre eigentliche Aufgabe, das gefährdete Bauteil schnell zu trocknen und damit Schäden durch mikrobiellen Bewuchs, Salzkristallisationswechsel oder Frost sicher zu vermeiden, hervorragend erfüllt. Eine Energie einsparende Beheizung kann sie aber nicht darstellen. Auch wenn durch die Trocknung des Mauerwerks eine gewisse Absenkung von dessen Wärmeleitfähigkeit bewirkt wird, führt das Fehlen des innenseitigen Wärmeübergangswiderstands, der aufgrund des typischerweise schlechten Dämmstandards des Mauerwerks



Bild 66. Verlauf der Diffusionsstromdichten über die Grenze C-D (s. Bild 57) für den Aufbau mit und ohne Wandtemperierung

eine große Rolle spielt, zu insgesamt höheren Wärmeströmen nach außen.

Bei der Anwendung muss, wie die Berechnungen zeigen, beachtet werden, dass durch die Bauteiltemperierung eine ggf. vorliegende aufsteigende Feuchte aufgrund des gestiegenen Wassergehaltsgradienten verstärkt werden kann. Dies bedeutet nicht, dass das Wasser weiter aufsteigt, da durch die lokal vorliegende erhöhte Temperatur eine deutlich erhöhte Verdunstung stattfindet. Aber der kapillare Fluss unterhalb der Temperierung im Bauteilsockel wird damit erhöht. Dies kann im ungünstigen Fall zu einer verstärkten Anreicherung von Salzen im Mauerwerk führen und sollte deshalb im Einzelfall bei der Beurteilung der Maßnahme mit berücksichtigt werden.

Aus den Berechnungen ergibt sich auch, dass die Bauteiltemperierung zu einem erhöhten Diffusionsstrom vom Mauerwerk zur Raumseite führen kann. Dies ist in besonderem Maß zu Beginn der Temperierung gegeben, da in diesem Zeitraum eine große Menge an Wasser aus dem Mauerwerk getrieben wird. Aber auch im langfristigen Betrieb ist aufgrund des oben beschriebenen Ansteigens des Kapillartransports ein erhöhter Diffusionsmassenstrom nach innen gegeben. Dies kann zu einer Erhöhung der Raumluftfeuchte führen, weshalb zumindest in den ersten Monaten nach Inbetriebnahme für eine erhöhte Feuchteabfuhr gesorgt werden sollte. Die Bauteiltemperierung ist in vielen Fällen eine sinnvolle und angebrachte Maßnahme, die richtig eingesetzt wertvolle Kultursubstanz erhalten kann. Vor diesem Hintergrund sollten auch andere Fragestellungen, wie z. B. die Energieeinsparung erst in zweiter Hinsicht Bedeutung haben.

6.5 Zusammenfassung und Vorschläge für Maßnahmen

Durch die erneuten Messungen nach sechs Jahren Betrieb hat sich bestätigt, dass das Klima in der Renatuskapelle durch die Bauteiltemperierung deutlich verbessert wurde. Dies zeigt sich auch in dem guten Zustand, in dem sich die Kapelle nach der Sanierung noch immer zeigt.

Durch das Anheben der Temperatur wurde die relative Luftfeuchte über das gesamte Jahre gesenkt. Im Sommer tritt jedoch eine erhöhte Feuchte auf, was durch Eindringen feuchter und warmer Luft von außen entsteht. Hier sollte durch einen etwas erhöhten Betrieb der Temperierung im Sommer gegengesteuert werden oder aber durch eine Regelung der Temperierung nach der relativen Feuchte, um diese dauerhaft unter 70% r. F. zu halten (siehe auch Maßnahmenvorschläge).

Die relative Feuchte hinter dem Altar ist gering, aber nicht besorgniserregend – dies sollte jedoch weiter beobachtet werden, vor allem in Hinblick auf die Entwicklung von neuen Schäden an den Altären. Derartige Untersuchungen können im Rahmen des EU-Projekts "Climate for Culture" in den nächsten Jahren fortgeführt werden.

Der Einbau einer Wandtemperierung oder jeglicher Heizung allein garantiert kein stabiles und für Kulturgut sicheres Klima, erforderlich ist die gezielte Einregelung des Systems und kontinuierliches Monitoring durch Klimamessungen.

In Hinblick auf das Raumklima in der Renatuskapelle werden zwei Maßnahmen als sinnvolle Ergänzung zur aktuellen Bauteiltemperierung vorgeschlagen:

- Geregelte Lüftung zur Zuführung warmer und trockener Luft über das Dach. Durch eine Lüftungsanalage, die trockene und wärmere Luft aus dem Dachraum in die Kapelle einbringt wäre es möglich, die Feuchte im Raum zu reduzieren und gleichzeitig Energie für die Temperierung einzusparen, da die solaren Wärmegewinne aus dem Dachraum in den Innenraum weitergegeben werden.
- 2. Regelung der Temperierung nach der relativen Luftfeuchte (Conservation Heating), mit dem Ziel die relative Feuchte im Raum < 70% r. F. zu halten. Eine solche Regelung wird zu Energieeinsparung im Winter und den Übergangszeiten führen, dafür aber etwas vermehrtes Heizen im Sommer bedeuten, um die relative Feuchte unter dem Schwellwert für die Aktivität von Mikroorganismen zu halten. Dabei kann auch die relative Feuchte hinter den Seitenaltären mit berücksichtigt werden, damit dort nicht zu geringe Werte erreicht werden. Dazu ist eine Entkoppelung der Temperierung von der bisherigen Heizungsanlage notwendig sowie eine entsprechende Steuereinheit.</p>

7 Fazit und Ausblick

7.1 Klimastabilität historischer Gebäude

Das Raumklima historischer Gebäude wird durch zahlreiche Faktoren mit bestimmt. Innere Feuchtequellen, Klimatechnik, Besucher, Feuchte aus den Baumaterialien oder der Gebäudehülle und nicht zuletzt die natürliche Lüftung beeinflussen den Verlauf und die Stabilität des Raumklimas. Gerade die Reduzierung von kurzfristigen Schwankungen ist extrem wichtig für die dauerhafte Erhaltung von Kunst und Kulturgut.

Von zentraler Bedeutung ist dabei der Luftwechsel. Die Messungen in Linderhof, am Schachen und in der Renatuskapelle haben gezeigt, dass historische Gebäude oft einen geringeren Luftwechsel besitzen, als generell angenommen. Eine Erhöhung der Luftdichtigkeit führt 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 müsste durch eine geregelte Lüftung gegengesteuert werden.

Der zweite wichtige Aspekt für die Stabilität des Raumklimas ist die Frage, wie gut die Innenraummaterialien die Feuchtespitzen abpuffern. Durch Aufnahme und Abgabe von Feuchte (Sorption) tragen sie zu einer Reduzierungen von kurzzeitigen Schwankungen erheblich mit bei, wie die Untersuchungen am Schachenhaus 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 Wohngebäude, wo immer mehr Wert auf ein gesundes Raumklima gelegt wird.

7.2 Raumklima-Simulation von historischen Gebäuden

Die hygrothermische Simulation des Raumklimas bietet zahlreiche interessante Anwendungsbereiche. Aus der Kenntnis des Gebäudes heraus können in der Folge Varianten gerechnet werden, was Klimatisierung, Besucherströme oder mögliche Folgen des Klimawandels angeht. Die aktuellen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Raumklima von historischen Gebäuden hinreichend genau simuliert werden kann. Wichtig ist dabei vor allem die genaue Abbildung der absoluten Lage und Verteilung der Klimadaten über den Jahreszeitraum und der kurzfristigen Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Diese Form der Simulation bedeutet aber derzeit noch einen erheblichen Aufwand, beispielsweise in Bezug auf die Erhebung aller relevanten Daten wie Aufbauten und Materialien. Ziel weiterer Forschungen sollte es sein, Methoden einer weiterführenden, indirekten, zerstörungsfreien Analyse des hygrothermischen Verhaltens der Räume oder Gebäude zu entwickeln. Dazu gehören experimentelle Methoden, aber auch Klimaanalysen mit dem Ziel der Entwicklung sog. Transferfunktionen. Im Laufe der Arbeiten hat sich die interzonale Luftströmung zwischen den Räumen als wichtige Einflussgröße für die Simulation erwiesen. Hierzu und zur Erfassung von Strömungsmustern ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

7.3 Raumklima für die Präventive Konservierung

Klimatische Wirkungen auf Kunstwerke sind normalerweise ein langsamer, schleichender Prozess, der nur über die Jahre sichtbar wird. Das Wissen über die Klimawirkungen ist immer noch sehr beschränkt. Die sicheren Bereiche sind soweit bekannt, nicht jedoch ab wann eine wirkliche Gefahr für Schäden besteht. Eine Vertiefung der Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Raumklima und Schäden an Kunstwerken ist daher notwendig. Dazu müssen einerseits Laboruntersuchungen durchgeführt werden, auf der anderen Seite aber auch konservatorische Untersuchungen an den Gebäuden und Kunstwerken vor Ort. In einem sog. retrospektiven Ansatz wird der Erhaltungszustand von Kunstwerken und Ausstattung im Kontext des jeweiligen "historischen" Klimas betrachtet und daraus Erkenntnisse gewonnen, 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 zugängig sind, zum anderen aber auch eine Vielzahl unterschiedlicher, traditioneller Materialien und Kunsttechniken mit beherbergen, die großteils noch keine Restaurierung erfahren haben und somit Rückschlüsse von festgestellten Schäden auf bisherige Klimaereignisse gezogen werden können.

7.4 Verbesserung des Raumklimas

Die Ansätze zur Klimatisierung von historischen Gebäuden ändern sich in Zeiten knapper öffentlicher Kassen und gesteigertem Bewusstsein zu Fragen der Energieeffizienz zunehmend. Dezentrale Lösungen mit wenig Eingriffen in die Gebäude und hoher Energieeffizienz stehen immer mehr im Fokus. Für Linderhof kann eine gesteuerte Lüftung diese Voraussetzungen erfüllen. Ein entsprechendes Konzept befindet sich in der Entwicklung und wird durch Simulationen und begleitende Messungen geprüft.

Auch die bisher für Museen geforderten, extrem engen Klimabänder sind derzeit weltweit auf dem Prüfstand. Auch wenn diese für historische Gebäude generell nicht anwendbar sind, ist es dennoch notwendig, eine solide wissenschaftliche Basis für die Festlegung von Zielwerten zu legen.

Die Ergebnisse, auf denen dieser Beitrag aufbaut, entstammen dem Forschungsvorhaben des Fraunhofer IBP "Klimastabilität historischer Gebäude" in Kooperation mit der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen und werden in [42] veröffentlicht.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] Rode Pedersen, C.: Combined heat and moisture transfer in building constructions. Dissertation, TU Denmark 1990.

[2] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart 1994.

[3] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation, TU Dresden 1997.

[4] DIN 4108-3:1001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz. Beuth Verlag Berlin.

[5] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Mai 2002.

[6] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.

[7] Karagiozis, A. N.; Salonvaara, M.: Hygrothermal system-performance of a whole building. Building and Environment, Volume 36 (2001), No. 6, pp. 779–787.

[8] Bednar, T.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden – Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation, TU Wien 2000.

[9] Rode, C.; Grau, K.: Synchronous calculation of transient hygrothermal conditions of indoor spaces and building envelopes. Proceedings Building Simulation, Rio de Janeiro, 13–15. Aug. 2001.

[10] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H. M.; Radon, J.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen – Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte. Tagungsbeitrag für das 11. Bauklimatische Symposium der TU Dresden. 26.–30. Sep. 2002, Dresden, S. 562–575.

[11] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H. M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94. Hrsg.: WTA-Publications, München.

[12] DIN EN 15026:2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007.

[13] Mücke, W.; Lemmen, C.: Schimmelpilze. ecomed-Verlag, Landsberg am Lech, 1999.

[14] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart 2001

[15] Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. Bauphysik-Kalender 2003, S. 435–531, Ernst und Sohn, Berlin.

[16] Viitanen H.; Ritschkoff A.: Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forrest Products, Uppsala, 1991.

[17] Viitanen, H.; Ojanen, T.: Improved Model Predict Mould Growth in Building Materials. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, 2007.

[18] Viitanen, H.: Mathematical modelling of moisture behaviour and mould growth in building envelopes. Espoo Finnland: VTT/TTY, 2005–2009.

[19] Krus, M.; Künzel, H. M.; Kießl, K.: Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart, 1996.

[20] Künzel, H. M.; Krus, M.: Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, (1995) S. 5–19.

[21] Künzel, H. M.; Kießl, K.; Krus, M.: Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, (1995) S. 267–279.

[22] Künzel, H. M.; Kießl, K.: Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau (1998).

[23] Künzel, H. M.: Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag, 1999.

[24] Holl, K.: Der Türkische Saal im Königshaus am Schachen. Die Erhaltung der Ausstattung in Hinblick auf das Raumklima. Diplomarbeit, München 2008.

[25] Wehle, B.: Simulation des Raumklimas unter Berücksichtigung der Feuchtepufferungseigenschaften des Türkischen Saals im Königshaus am Schachen. Diplomarbeit, Rosenheim 2010.

[26] Bratasz, Ł.: Acceptable and non-acceptable microclimate variability: the case of wood. In: Camuffo, D.; Fassina, V.; Havermans, J. (Hrsg.): Basic environmental mechanisms affecting cultural heritage. Understanding deterioration mechanisms for conservation purposes. COST Action D42 "Chemical Interactions between Cultural Artefacts and Indoor Environment", Nardini Editore, Florenz 2010, S. 49–58.

[27] DIN EN 13779:2007-09: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. Beuth Verlag, Berlin.

[28] DIN ISO 16000-8:2008-12: Innenraumluftverunreinigungen; Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen. Beuth Verlag, Berlin.

[29] Kippes, W.: Raumklima in historischer Bausubstanz. Ein Beitrag zur materialwissenschaftlichen Begründung der Denkmalpflege. Dissertation, Wien 1999.

[30] Mecklenburg, Marion et al: Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In: Painted Wood: History and Conservation, pp. 464–483.

[31] Steadman, R. G.: The assessment of sultriness, Journal of Applied Meteorology, Volume 18, pp. 861–885.

[32] VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume.w Verein Deutscher Ingenieure VDI, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 1996, Bestätigt 2007.

[33] Kilian, R.: Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim. Auswirkungen auf das Raumklima. Diplomarbeit, Siegl Fachbuchhandel GmbH, München 2004.

[34] Bengler, M.; Donner, C.; Honl, S.: Schloss Lustheim, der nördliche Pavillon, Die Restaurierung der Fassade, im Auftrag des Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen. 2004 a, Teil 4, S. 2 f.

[35] Burmester, A: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und -sanierung: Oder welche Klimawerte sind die richtigen, Raumklima in Museen und historischen Gebäuden. Kongressband, Bietigheim-Bissingen, in Fachinstitut Gebäude-Klima, 2000.

[36] Holm, A. und Künzel, H. M.: Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwollplatten in Wärmedämmverbundsystemen. wksb 43, H. 41 (1998), S. 2–6.

[37] Hoyer, G.; Schmid, E. D.; Langer, B.: Schleißheim, neues Schloss und Garten, Amtlicher Führer. Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, München 1998.

[38] Krus, M.; Künzel, H. M.: Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden. Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.–10. August 1996, S. 493–498.

[39] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart 1994.

[40] Künzel, H. M.: Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag, 1999.

[41] Schmid, E. D.: Schloss Schleißheim. Die barocke Residenz mit altem Schloss und Schloss Lustheim. München 1980.

[42] Kilian, R.: Klimastabilität historischer Gebäude. Kriterien zur Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. Dissertation (in Vorbereitung), Universität Stuttgart 2012.

[43] Ashrae Standard 160P (2009) "Design Criteria for Moisture Control in Buildings".

[44] Großeschmidt, H.: The tempered Building: Renovated Architecture – Comfortabel Rooms – A "Giant Display Case". In : Klima in Museen und historischen Gebäuden: die Temperierung. Hrsg. Kotterer, M.; Großeschmidt, H.; Boody, F.; Kippes, W. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. S. 14–48, 2004.