GEBÄUDESIMULATION DES PARADESCHLAFZIMMERS IN SCHLOSS LINDERHOF UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER BESUCHER

Stefan Bichlmair[1], Kilian Ralf[1], und Martin Krus[1]
[1]Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen

KURZFASSUNG

In dem vom bayerischen König Ludwig II. erbauten Schloss Linderhof wird anhand der messtechnisch erfassten Raumklimadaten und Bauwerksuntersuchungen für einen Raum, das Paradeschlafzimmer, eine Gebäudesimulation erstellt. Das Raumklima spielt für die dauerhafte Erhaltung von Kunstgegenständen eine entscheidende Rolle. Insbesondere können sich hohe Schwankungen der relativen Luftfeuchte ungünstig auf Kunstgegenstände und Baumaterialien auswirken und diese nachhaltig schädigen. Eine bedeutende Fragestellung ist dabei der Einfluss der Besucher. Die Untersuchungen zeigen, wie sich die Besucher und der Luftwechsel auf das Ergebnis der berechneten relativen Luftfeuchte auswirken. Das Simulationsergebnis wird dabei mit einer in der Präventiven Konservierung häufig angewendeten statistischen Analyse der Schwankungsbreite der relativen Feuchte überprüft. Die Simulation wird mit einem virtuellen Versuch auf Ihre Anwendbarkeit getestet. Das Versuchsergebnis zeigt eine hohe Übereinstimmung mit dem theoretisch erwarteten Ergebnis.

Abstract

A building simulation model was made of Linderhof Palace, built by the Bavarian King Ludwig II. The input data of the building simulation is based on measured data of the room climate and on investigations on building materials and construction details. The room climate plays a decisive role for the durable preservation of art. Especially high fluctuations of relative humidity can cause damages to the work of art and building components. Also an important question is the influence of visitors. The investigations show how the vistiors and air change rate influence the results of indoor relative humidity.

The simulation is tested on a modified climate analysis on the fluctuation range of relative humidity which is typically used for preventive conservation. A virtual scenario tests the calibrated simulation on its usability. The results of the computation fit well to the compared measured data.

EINLEITUNG

Um das von bayerischen König Ludwig II. erbaute Schloss Linderhof und sein Raumklima besser zu verstehen, wurden die wesentlichen Randbedingungen der Baukonstruktion, Nutzung durch Besucher und Belüftung untersucht und die Raumklimata zwischen 2008 und 2011 in einem Langzeit-Monitoring aufgezeichnet (Krus et al 2012). Diese Daten werden in die Gebäudesimulation für einen Jahreszyklus integriert. Dabei wird der Schwerpunkt der Simulation auf einen Raum mit speziellen Raumklimabedingungen und Baukonstruktion gelegt: das Paradeschlafzimmer. Für ein tieferes Verständnis des Simulationsmodells wird die Baugeschichte des Schlosses kurz erläutert und auf die Baukonstruktion des Paradeschlafzimmers eingegangen. Die Umsetzung der Baukonstruktion und die Implementierung der angrenzenden Klimata in das Simulationsmodell WUFI®-Plus wird erläutert. Das Raumklima spielt eine entscheidende Rolle für die Erhaltung der Inneneinrichtung. Insbesondere sind hohe Schwankungen der relativen Feuchte von Interesse, da diese Schäden an den wertvollen Oberflächen verursachen können. Um die 3000 Besucher pro Tag kommen in den Sommermonaten nach Schloss Linderhof (Abbildung 1). Die relative Luftfeuchte hängt in unbeheizten Gebäuden im Wesentlichen von der Feuchteproduktion durch innere Quellen (wie Besucher) sowie der Belüftung des Gebäudes ab. Um die unterschiedlichen Einflüsse der Besucher und des Aussenklimas mit Hilfe einer Gebäudesimulation voneinander trennen zu können, ist ein gut kalibriertes Simulationsmodell erforderlich.

Abbildung 1: Das linke Bild zeigt die Vorderansicht von Schloss Linderhof mit dem Haupteingang. Rechts die Rückansicht mit den drei großen Fenstern des Paradeschlafzimmers im mittleren Gebäudeteil. (Quelle: Bayerische Schlösserverwaltung BSV).

GEBÄUDE SCHLOSS LINDERHOF

Baugeschichte und Konstruktion

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

In Abbildung 2 sind die unterschiedlichen Bauphasen mit farbigen Bereichen gekennzeichnet. Diese Teilabschnitte mit partiellem Abbruch, Überbau und Neuaufbau von Teilen erschwerte die Ermittlung der Baukonstruktion. Die Inneneinrichtung im Obergeschoss ist reichhaltig ausgestattet. Abbildung 3 gibt einen Eindruck aus dem Paradeschlafzimmer mit der einmaligen Einrichtung.

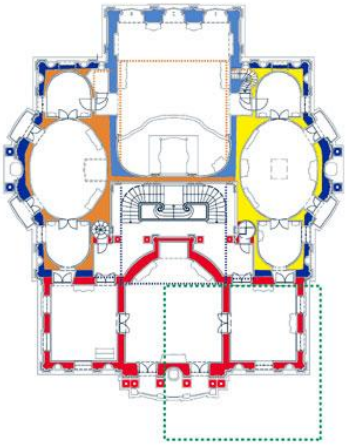

Abbildung 2: Grundriss des Obergeschosses in Schloss Linderhof mit den sechs farbig gekennzeichneten Bauphasen. Das Paradeschlafzimmer ist der größte Raum (hellblau) und wurde in der letzten Bauphase nach dem Tod von König Ludwig im Jahr 1886 fertiggestellt (BSV).

Abbildung 3: Das linke Bild zeigt das Paradeschlafzimmer, den größten Raum mit einem Volumen von ca. 805 m³. Die Besucher queren den Raum vor der Balustrade. Im rechten Bild ist die Außenwand mit Kastenfenster und geschlossenen Innenklappladen und Vorhang zu sehen (BSV).

Bauteile

Die Außenwände 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 aufgebracht. Auf der als Holzkonstruktion ausgeführten und verputzten Gewölbedecke ist auf der Rauminnenseite eine Malschicht ausgeführt, wie in Abbildung 3 zu sehen. Die Bodenkonstruktion ist mit massiven Holzbalken aufgebaut, die mit einer Kiesschüttung im Fehlboden verschlossen ist. An der Unterseite im Erdgeschoss ist größtenteils Putz aufgebracht.

Die Fenster sind aus der Bauzeit erhalten und überwiegend als Einfachfenster ausgeführt. Im Paradeschlafzimmer sind die Fenster als Kastenfenster mit zwei Fensterflügeln mit Einfachverglasung gestaltet 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. Diese Maßnahmen reduzieren den natürlichen Luftwechsel.

Ein Konstruktionsdetail der Außenwand mit einem angrenzenden Fenster zeigt Abbildung 4. Dieses Bauteil wird ebenfalls in Abbildung 8 in der Bauteilkonfiguration der Simulationssoftware WUFI®-Plus gezeigt.

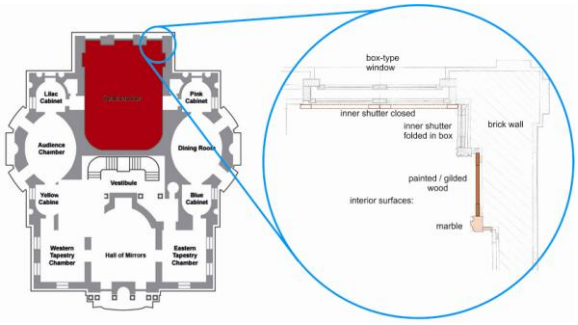

Abbildung 4: Detail der Außenwand mit Kastenfenster. Die Innenoberfläche besteht hauptsächlich aus bemalten oder vergoldeten Holzfüllungen in Rahmenkonstruktion. Die geöffneten Klappläden werden in einem seitlichen Kasten eingeklappt.

Besucher und Lüftung

Die meisten Besucher kommen im Sommer in das Schloss. Die Öffnungszeiten sind in den Sommermonaten von 8.00 bis 18.00 Uhr. Von Dezember 2009 bis Dezember 2010 kamen ca. 450.000 Besucher nach Linderhof. Das Schloss ist täglich bis auf fünf Tage im Jahr für Besucher geöffnet. An fünf Stationen erläutern die Schlossführer geschichtliches. Die

Besucher-Route verläuft im Uhrzeigersinn, entsprechend den grünen Pfeilen in Abbildung 5.

Während der Öffnungszeiten werden die Fenster zur Belüftung durch die Schlossführer bedient. Die Fenster werden nach Ermessen geöffnet, d. h. im Sommer bleiben die Fenster im Obergeschoss die meiste Zeit offen. Lediglich die Fenster im Paradeschlafzimmer verbleiben ganzjährig geschlossen, da diese nur schwer bedient werden können. Die blauen Pfeile in Abbildung 5 zeigen die Fenster, die für die Lüftung verwendet werden.

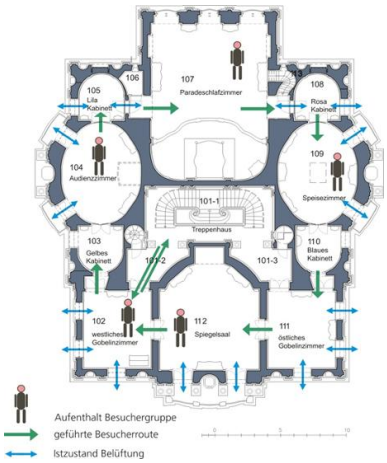

Abbildung 5: Obergeschoss mit Besucherroute (grüne Pfeile). Die blauen Pfeile zeigen die zur Lüftung verwendeten Fenster, sowie die Belüftung des Schlafzimmers über die Nachbarräume (BSV, Fraunhofer IBP).

KLIMADATEN

Erste Messungen des Raumklimas begannen im Jahr 2008. Für die Simulation wurde der Zeitraum vom 1. Dezember 2009 bis 30. November 2012 festgelegt. Die Daten wurden im 5-Minuten-Intervall gemessen. Für die Simulation werden stündliche Daten verwendet und aus den gemessenen Daten als stündlicher Mittelwert generiert. Ein Jahr besteht aus 8760 Stunden. Wegen Messausfällen sind die Daten teilweise nicht vollständig. Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse und der statistischen Angaben ist dies zu berücksichtigen.

Relative Feuchte (r.F.) des Außenklimas und Paradeschlafzimmers

Mit 90,8 % r.F. ist die relative Außenluftfeuchte im Jahresmittel sehr hoch. Dies kann durch die Lage in dem Hochtal bedingt sein. Die relative Feuchte ändert sich im Tageszyklus mit den Temperaturen und sinkt im Sommer bis auf 24 % r.F. ab.

Die Raumluftfeuchte im Paradeschlafzimmer liegt ebenfalls auf einem hohen Niveau. So beträgt die durchschnittliche relative Feuchte ca. 70 % r.F. Eine saisonale Schwankung des gleitenden Monatsmittels zwischen 60 % r.F. im Sommer und 80 % r.F. im Winter kann beobachtet werden.

Temperaturen des Außenklimas und Paradeschlafzimmers

Die durchschnittliche Außentemperatur liegt in dem Jahreszeitraum bei 5,4 °C, mit einem Maximum von 30,5 °C und einem Minimum von -17,3 °C. Im monatlichen gleitenden Mittel wird ein Maximum von 15,1 °C im Sommer und ein Minimum von -5,6 °C im Winter erreicht. Die Innentemperatur des unbeheizten Gebäudes folgt der Außentemperatur und reicht von -1,5 °C bis 26,5 °C im stündlichen Mittel. Das Jahresmittel der Innentemperatur beträgt 11,4 °C und ist damit um ca. 5,9 Kelvin höher im Vergleich zum Außenklima.

Schwankungen der relativen Feuchte

Die Schwankungen der relativen Feuchte sind für die Erhaltung von Kunstgegenständen von hoher Bedeutung. Für Bereiche akzeptabler Schwankungsbreiten gibt es verschiedene Angaben aus der Literatur. Zum Beispiel sind in (ASHRAE 2011) Definitionen für verschiedene Klimabereiche für Museen und Archive angegeben. Für denkmalgeschützte Gebäude werden wiederum andere Festlegungen für akzeptable Klimabereiche genannt (KILIAN 2007). In dieser Arbeit wird auf die unterschiedlichen Definitionen nicht weiter eingegangen, es wird jedoch daraus eine Kriterium zur Güte der Simulation abgeleitet. Eine übliche Betrachtung ist die tägliche Klimaschwankung. Dazu werden für jeden Tag der maximale und der minimale Wert der relativen Feuchte verglichen. Die Differenz ergibt die maximale Schwankungsbreite. Der hier vorgestellte neue Ansatz verwendet nicht die Schwankung an einem Tag, sondern stündlich gleitend über ein 24 Stunden-Intervall. Das heißt, es wird die maximale Schwankungsbreite in einem 24 Stunden-Intervall gleitend zu jeder Stunde über das Simulationsjahr betrachtet. Mit dieser Methode ist eine weiterentwickelte Untersuchung der Schwankungsbreite im Vergleich zur äquidistanten (täglichen) Betrachtung möglich. Die gleitende Schwankungsbreite wird hier im 24 Stunden Intervall als Vergleichsmaß zur Güte der Simulation verwendet.

Angrenzende Klimate

Insgesamt grenzen zwölf verschieden Klimata an das Paradeschlafzimmer als Randbedingung an: im gleichen Geschoss, im darunter liegenden Geschoss und darüber liegendem Dachgeschoss, Hohlräume über und zwischen den angrenzenden Räumen, in Wandrundungen sowie das Außenklima. Abbildung 6 zeigt einen Gebäudeschnitt quer zum Paradeschlafzimmer mit den Durchgängen zu den angrenzenden Räumen. Im Schnitt sind die umgebenden Klimata dargestellt.

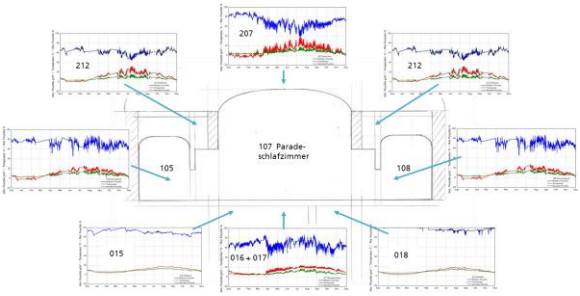

Abbildung 6: Skizze des Gebäudeschnittes im Paradeschlafzimmer mit den angrenzenden Klimata der umgebenden Räume und Hohlräume. Es sind die Messdaten der relativen Feuchte und Temperatur sowie die berechnete absoluten Feuchte für das Simulationsjahr von 12/2009 bis 12/2010 abgebildet.

MODELL DER GEBÄUDESIMULATION

Kongruente Flächen- und Volumenabbildung

Das Rechenprinzip der Software WUFI® Plus beruht auf einer Koppelung von eindimensionalen Bauteilberechnungen über die jeweiligen Flächen mit zonaler (raumweiser) Bilanzierung der Größen (Holm et. al. 2003, Künzel et. al. 2006). Inhomogenitäten der Wand, Wärmebrücken oder Bauteildicken können dabei nicht mit abgebildet werden. 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.

Die Abbildung des Paradeschlafzimmers in der Software ist aufgrund von Einschränkungen bei der Software nur bedingt realitätsnah möglich. So sind bei der Eingabe z.B. keine runden Flächen möglich. Diese können zwar fast beliebig durch Polygone angenähert werden, jedoch steigt der Eingabeaufwand dadurch unverhältnismäßig an. In dem hier vorgestellten Modell werden die realen gerundeten Flächen deshalb stark vereinfacht abgebildet.

Die genaue Ermittlung der Bögen und Rundungen ist wegen der komplexen Geometrie und begrenzter Mitteleinsatz nicht möglich. Für die Ermittlung der realen Flächen wurden die Rundungen der Wände und Decken mit Kurven und Ellipsenradien abschätzend angenähert. Um die realen Flächen und Volumina im Paradeschlafzimmer abbilden zu können und damit eine Flächen und volumenkongruentes Modell zu erhalten, wurden die Bauteilgröße (Länge) im Modell angepasst. Die horizontalen Wandrundungen wurden zu rechte Winkel vereinfacht, das Deckengewölbe wurde mit einer 45 ° geneigten Fläche angenähert. Ein Vergleich der realen Längen, Flächen und Volumina zum Modell ergibt eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von unter 2 %.

Simulationsmodel

Die Bauteilabmessungen wurden aus den vorhanden Plänen und Aufmaßen vor Ort entnommen und in die Software übertragen. Dabei wurden die einzelnen Bauteilaufbauten und angrenzenden Klimata zu den einzelnen Flächen in Modell entsprechend Abbildung 7 zugeordnet.

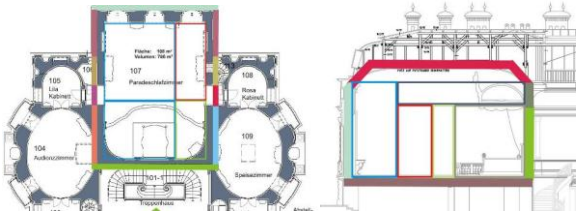

Abbildung 7: Links der Grundriss im Obergeschoss mit Skizze des vereinfachten Raummodells und der Wandunterteilung bzw. anstehenden Klimata. Die Rechtecke zeigen die Räume im Erdgeschoss, wie sie in der Simulation angeordnet sind. Das rechte Bild zeigt den Längsschnitt in dem die Unterteilungen der Wandfläche dargestellt sind (BSV).

Abbildung 8 zeigt im linken unteren Fenster das in den Berechnungen verwendete WUFI® -Plus Modell mit den Flächenunterteilungen. Zu jeder einzelnen Fläche werden in der Software die jeweiligen Aufbauten sowie die Klimata zugeordnet. Die nicht gefüllten Flächen, angrenzend zum Paradeschlafzimmer, stellen die Umrisse des Schlosses dar. Oberhalb des 3-D Modells ist die Konstruktionsliste zu erkennen und rechts davon der Bauteilaufbau der bereits geschilderten Außenwand mit berechneter Feuchte- und Wärmeverteilung zu einem Zeitpunkt des Rechengangs.

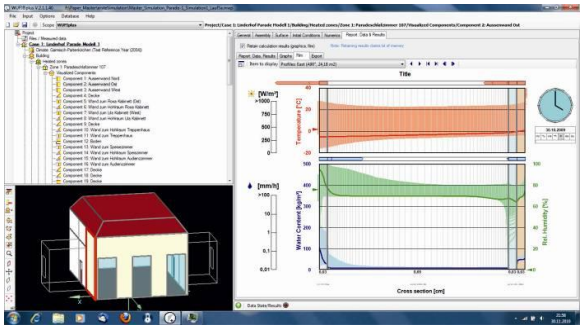

Abbildung 8: Screenshot des WUFI® -Plus Modells des Paradeschlafzimmers. Das rote Rechteck im 3-D Modell kennzeichnet das im rechten Bildteil dargestellten Bauteil. Der Bauteilaufbau mit Außenputz, Ziegelmauer, Luftschicht und Holzpanelle ist gut zu erkennen.

Bauteile und Materialdaten

Ein Beispiel für das Bauteil Außenwand ist in Abbildung 4 und dessen Implementierung in die Software in Abbildung 8 gegeben. Neben den Geometriedaten werden die Materialeigenschaften für jedes Bauteil benötigt. Für die hygrothermische Simulation sind zusätzlich zu den thermischen Eigenschaften weitere Materialdaten erforderlich: Porosität, feuchteabhängiger Diffusionskoeffizient, kapillarer Transportkoeffizient und die Feuchtespeicherfunktion. Diese Daten wurden aus der WUFI®-Plus Datenbank entnommen. Die hygrothermische Daten können auch für viele Materialien über eine öffentlich zugängliche Datenbank abgerufen werden (www.masea-ensan.de). Die Materialeigenschaften von 130 Jahre gealterten Materialien sind jedoch nicht so umfangreich untersucht wie neue Baumaterialien. Einige hygrothermische Eigenschaften aus der Bauzeit von Schloss Linderhof wurden von (Wehle 2010) bestimmt. Es wurden Daten für drei Materialien aus dieser Arbeit verwendet: vergoldetes Holz, gefasstes Holz und Brokat-Seide.

GEBÄUDE SIMULATION

Möbel und Einbauten

In dem Simulationsmodell wurden die größeren Möbel und Einbauten als hygrothermische wirkende Massen und Oberflächen mit eingebaut: Öfen, Türportale, Balustrade, Spiegel, Möbel, Bettbehang und Lüster. Diese Materialien bestehen hauptsächlich aus Marmor, Ziegel, Holz, Glas, Metall, Porzellan und Seide. Die Möbel und Einbauten wurden abschätzend vermessen und überschlägig als zusätzliche Masse von circa 10.000 kg kalkuliert.

Fenster und Innerer Klappladen

Der U-Wert der Kastenfenster wurde gemäß DIN EN 10077-1 kalkuliert. Die Fensterfläche für ein Fenster beträgt 6,57 m² mit einem Rahmenanteil von 59 %. Mit einer Einscheibenverglasung an beiden Flügeln und einer Holzpaneele im unteren Rahmenbereich berechnet sich der U-Wert zu 1,85 [W/m²K]. Bei jedem Fenster ist ein innerer Klappladen mit angeordnet (Abbildung 3). Jeden Tag werden die Klappläden nach den Öffnungszeiten durch die Schlossführer geschlossen. Der U-Wert ändert sich dadurch während Tag und Nacht.

Eine U-Wertermittlung erfolgte für die Klappläden als pauschaler Aufschlag für Abschlüsse in Anlehnung an DIN EN 10077-1. Der U-Wert verringert sich dadurch mit geschlossenen Klappläden auf 1,32 [W/m²K]. Eine Überprüfung der Auswirkung des variablen U-Wertes wurde mit der Simulation getestet. Fenster U-Werte kleiner als 2 [W/m²K] hatten dabei nur noch eine untergeordnete Auswirkung.

Ergebnis der Ausgangssimulation

In der Ausgangssimulation wurden für die Randbedingungen jährliche Durchschnittswerte gemäß Tabelle 1 gewählt. Die Werte für die inneren Quellen basieren auf typischen Werten für Wärme-, Feuchte- und Kohlendioxidabgabe des Menschen. Die Beschreibung der ermittelten Parameter folgt weiter unten.

Tabelle 1: Eingabedaten der Ausgangssimulation für den Luftwechsel und innere Quellen.

AUSGANGS SIMULATION	∅ JAHR	EINHEIT
Luftwechselrate n	0,2	[1/h]
Wasserdampfproduktion	3,4	[kg/d]
Wärmeproduktion	9,8	[kW/d]
Kohlendioxidproduktion	3,5	[kg/d]

Das Ergebnis der Ausgangssimulation für die relative Feuchte, Temperatur und absolute Feuchte im direkten Vergleich zu den Messdaten zeigt Abbildung 9. Bereits die Ausgangssimulation zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten und den aus der Temperatur und relativen Feuchte berechneten Werten der absoluten Feuchte. Im weiteren wird die relative Feuchte gesondert betrachtet, da deren korrekte Darstellung die größte Herausforderung ist. Die Messwerte (MW) sind im Diagramm dunkelblau, die Simulationsergebnisse (Sim) hellblau dargestellt. Die Simulation der relativen Feuchte zeigt teilweise, zumindest in der Lage, eine grundlegende Übereinstimmung. Jedoch sind auch erhebliche Abweichungen erkennbar. Der Verlauf der Daten in den vier schraffierten Bereichen wird wegen fehlender Messdaten der Eingangsklimate in diesem Bereich für die weitere Auswertung nicht herangezogen.

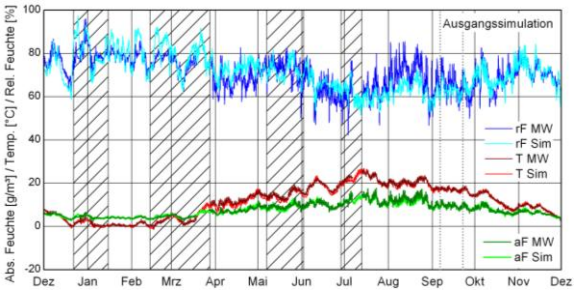

Abbildung 9: Messdaten (MW) und Ausgangssimulation (Sim) mit den im nachfolgenden nicht mehr betrachteten vier schraffierten Bereiche mit teilweise fehlenden Messdaten der Eingangsklimata, Zeitraum 12/2009 bis 12/2010.

Ein Vergleich der Schwankungen der relativen Feuchte mit gleitenden 24 Stunden-Intervall zeigt Abbildung 10. Während im Dezember die Werte gut übereinstimmen, sind die Simulationswerte im Februar etwas zu hoch. Von April bis Oktober sind die simulierten Schwankungen zu gering. Sie bilden die realen Verhältnisse nicht richtig ab. Ab November

nähern sich die Werte wieder an. In diesen Übergangszeiten nähern sich vermutlich die durchschnittlichen Eingabewerte den realen Randbedingungen an. Für eine bessere Anpassung werden also saisonale oder stündliche Profile benötigt.

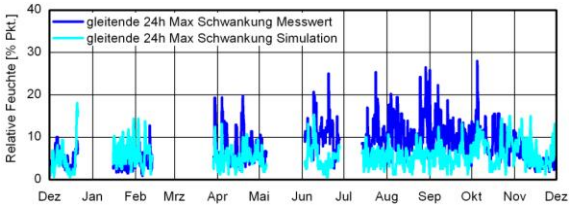

Abbildung 10: Vergleich der Ausgangssimulation mit den Messwerten der maximalen Schwankung der relativen Feuchte innerhalb 24 Stunden mit stündlich gleitendem Intervall, von 12/2009 bis 12/2010, nur mit den gültigen Bereichen.

Kalibrierung, Validierung und Varianten der Simulation

Zum Testen und Kalibrieren des Simulationsmodells und einiger Parameter wurden die Eingabedaten variiert. In Tabelle 2 sind die verschiedenen untersuchten Parameter und Kombinationen gelistet. Auf die blau markierten Varianten näher eingegangen.

Tabelle 2: Übersicht der Simulationen mit den zugeordneten Profilen und Oberflächenparametern. Die blau markierten Varianten werden hier diskutiert.

VAR. SIM	PROFIL LUFTW	INNERE QUEL-LEN	INTER-ZONAL LUFT	MATERIAL / SD-WERT
Aus-gangs-Sim	Konstant	Konstant	-	Ausgangswert
Var. 1	Saisonal	Saisonal	-	Ausgangswert
Var. 2	Saisonal	Stündl.	-	Ausgangswert
Var. 3	Stündl.	Saisonal	-	Ausgangswert
Var. 4	Stündl.	Stündl.	-	Ausgangswert
Var. 5	Stündl.	Stündl.	Saisonal	Ausgangswert
Var. 6	Stündl.	Stündl.	Stündl.	Ausgangswert
Var. 7	Stündl.	Stündl.	Saisonal	MaxPufferung
Var. 8	Stündl.	Stündl.	Saisonal	MinPufferung
Opt. Sim	Stündl.	Stündl.	Saisonal	Optimierter Wert

Profile der inneren Quellen

Die Besucherzahlen schwanken stark saisonal. Während in der Winterperiode die geringsten Besucherzahlen mit durchschnittlichen 299 Besuchern/Tag zu verzeichnen sind, mit zum Teil 50 Besuchern und weniger pro Tag, kommen in den Sommermonaten von Juli bis September durchschnittlich 2391 Besucher täglich, mit bis zu 3500 Besuchern und mehr an den Spitzentagen. Die Besucherzahlen wurden aus den verkauften Eintrittskarten ermittelt.

Die Besucher geben Wasserdampf, Wärme und Kohlendioxid an die Raumluft ab. Zur mengenmäßigen Bestimmung der Emissionen im Paradeschlafzimmer wurde die Aufenthaltsdauer der Besucher gemessen. Die tatsächliche Anwesenheit im Paradeschlafzimmer wurde mit 4,7 Minuten/Besucher ermittelt. Anhand der Besucherzahlen, der Aufenthaltsdauer und der nach (VDI 2078) zugrunde gelegten Feuchte- und Wärmeabgabe pro Personen konnten detaillierte stündliche Emissionsprofile für das Simulationsjahr erstellt werden. Zum Beispiel ergeben 2391 Besucher am Tag rechnerisch eine äquivalent anwesende Anzahl von 18,7 Besuchern, die sich ständig während der Öffnungszeit im Paradeschlafzimmer aufhalten. In Abbildung 11 sind die stündlichen und saisonalen Profile für Wärme- und Feuchtproduktion inklusive zusätzlicher Wärmeabgabe durch Leuchten dargestellt. Für den betrachteten Zeitraum werden durch die Besucher rechnerisch 3521 kWh Wärme und 1236 kg Wasserdampf allein im Paradeschlafzimmer abgegeben.

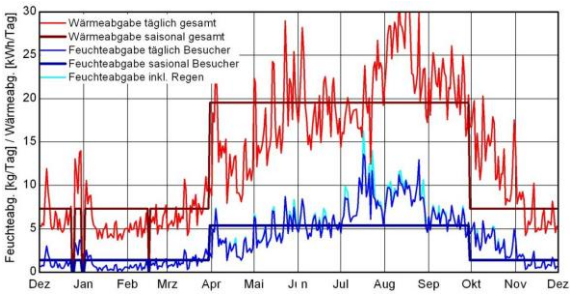

Abbildung 11: Stündliches Wärme- und Feuchteprofil der äquivalent anwesenden Besucher im Schlafzimmer im Zeitraum 12/2009 bis 12/2010. Zusätzlich sind die saisonal gemittelten Profile eingetragen.

Lüftungsprofil mit stündlichen Werten

Die Idee zu diesem Lüftungsprofil wurde aus den Beobachtungen des Lüftungsverhaltens vor Ort abgeleitet. Hier zeigte sich ein starkes temperatur- bzw. besucherabhängiges Lüftungsverhalten sowie ein ausgeprägter Tag- und Nachtrhythmus. Im Sommer mit den meisten Besuchern sind die Fenster fast ganztägig offen, hingegen sind im Winter mit wenigen Besuchern die Fenster überwiegend geschlossen. Zur Klärung der Luftwechselraten wurden mehrere Messungen mit der passiven homogen Spurengasmethode (Tracergas) durchgeführt (Kilian et.al, 2011).

Anhand der Ergebnisse der Luftwechselmessung wird der Luftwechsel für die Simulation an die Innentemperatur des Paradeschlafzimmers, sowie mit den Betriebszeiten des Schlosses gekoppelt. Aus der Tag- und Nachtmessung des Luftwechsels sowie dem Ergebnis der Tracergasmessungen wird ein ganzjähriger gleichmäßiger Infiltrationsluftwechsel angenommen. Die Tabelle 3 beschreibt die Mittelwerte, wie sie für die Simulation und Profile in Abbildung 12 verwendet wurden.

Tabelle 3: Durchschnittswerte der Luftwechselrate für die Gebäudesimulation in [1/h].

LUFT-WECHSEL	TAG	NACHT	SOMMER	WINTER
Werte der Simulation	0.469 [1/h]	0.101 [1/h]	0.261 [1/h]	0.126 [1/h]

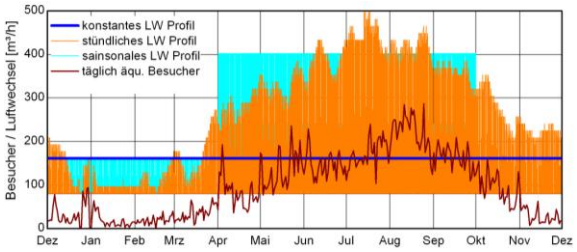

Abbildung 12: Temperatur- und besucherabhängiges Lüftungsprofil mit stündlichen Werten (orange), saisonal und konstante Profile für den Zeitraum 12 / 2009 bis12 / 2010. Zusätzlich ist das Profil der äquivalent anwesenden Besucher dargestellt (braun).

Interzonaler Luftaustausch

Die interzonale Luftbewegung bzw. der Innenluftwechsel wurden nicht gemessen. Wie bereits angeführt erfolgt die aktive Belüftung nur durch die angrenzenden Räume. Es wird angenommen, dass bei der Durchströmung der angrenzenden Räume die Außenluft zusammen mit vorkonditionierter Innenluft der angrenzenden Räume zum Paradeschlafzimmer gemeinsam einströmt. Eine Abschätzung anhand der gemessenen Außenluftwechsel ergibt einen interzonalen Luftaustauschrate von 1,5 [h^{-1}] im Sommer und 0,9 [h^{-1}] im Winter. Mit zusätzlichen Messungen der Luftgeschwindigkeit in den Verbindungstüren konnte die Größenordnung des Luftaustausches für die Einzelmessung bestätigt werden.

Mit den Simulationsvarianten 5 und 6 aus Tabelle 2 wurden zwei unterschiedliche Profile, saisonal und stündlich, getestet. Hierbei zeigte sich mit dem stündlichen Profil keine Verbesserung. Hingegen wurde mit der Variante 5 im Vergleich zu den Varianten ohne interzonalen Luftfluss für die Sommermonate Juli bis September eine Verbesserung in der Anpassung der relativen Feuchte zu den Messwerten erreicht. Die Schwankungen der relativen Feuchte verbesserten sich jedoch nur geringfügig.

Feuchtepufferung

Die bereits erwähnten Möbel und Einbauten und auch die Oberfläche der Bauteile selber haben einen wesentlichen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Raumluft. Die Oberflächen in Schloss Linderhof bestehen aus Stoff, Malschichten und vergoldeten Holzflächen und vergoldeten Schnitzereien (Abbildung 3). All diese Verzierungen, Schnitzereien, Ornamente und Einrichtungen haben eine wesentlich größere Oberfläche im Vergleich zu der vereinfachten Abbildung des Gebäudes im Simulationsmodell. Zu den bereits beschriebenen zusätzlich in das Modell implementierte Massen wurde eine Oberfläche von 534 m² im Modell eingefügt, die die unterschiedlichen vorhandenen Materialien in etwa repräsentiert. Mit dieser Maßnahme wird das Simulationsergebnis realistischer.

Ebenso unbekannt wie die tatsächliche Fläche ist das tatsächliche hygrothermische Übergangsverhalten der realen Oberflächenschichten. Mit einem speziellen Tool kann in der Software auf den Oberflächen ein zusätzlicher s_d-Wert als hypothetische Dampfbremse angelegt werden. Damit ist es möglich die feuchtepuffernden Eigenschaften zu steuern. Für die Ausgangssimulation wurde ein zusätzlicher s_d-Wert von 0.328 [m] ausgewählt. Dies erscheint notwendig für die mit Malschicht versehenen Oberflächen der Stuckdecke, bemalte Holzoberflächen und vergoldete Holzoberflächen. Nur für den Bettstoff wurde der gemessene Diffusionswiderstandswert verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Effekte der Feuchtepufferung auf die hygrothermische Gebäudesimulation in historischen Gebäuden, sowie hygrothermische Messwerte von historischen Materialien wird in (Wehle 2010) gegeben.

Zur Eingrenzung des Einflusses der Feuchtepufferung wird dieser s_d-Wert in den Varianten 7 und 8 gezielt verändert. Für die Simulation mit niedriger Feuchtepufferung wurde in der Variante 7 ein relativ hoher s_d-Wert von 0,5 [m] angenommen. Die Auswirkungen der verringerten Feuchtepufferung können klar beobachtet werden. Als Folge daraus erhöhen sich die Schwankungen der relativen Feuchte. Zusätzlich wurde zum Testen der Auswirkungen die Simulation mit einem s_d-Wert von 1 m und 2 m berechnet. Die Ergebnisse weichen nur unerheblich in den etwas stärkeren Schwankungen gegenüber der Simulation mit einem s_d-Wert von 0,5 [m] ab.

In der Variante 8 wurde kein zusätzliche s_d-Wert angelegt. Der Effekt zeigt sich in wesentlich geringeren Schwankungen der relativen Feuchte gegenüber den Messwerten. Für die optimierte Simulation wurde ein s_d-Wert 0.328 [m] auf allen Oberflächen angelegt.

Optimierte Simulation

Im Vergleich zu der Ausgangssimulation wurden folgende Anpassungen (Tabelle 2) vorgenommen: stündliches Besucherprofil (Wärme- und Feuchteemissionen), stündliches Lüftungsprofil, interzonaler Luftaustausch, optimierte Feuchtepufferung.

Die optimierte Simulation zeigt mit der relativen Feuchte in Abbildung 13 eine gute Übereinstimmung zu den Messdaten. Während im Februar die relative Feuchte der Simulation etwas zu trocken ist, zeigt sich im Juni eine etwas höher relative Feuchte gegenüber den Messwerten. Insgesamt zeigt sich ein etwas

niedrigeres Feuchteniveau in der Simulation im Vergleich zu den Messwerten.

Ein Vergleich mittels einer statistischen Auswertung der sechs Teilbereiche (TB) mit Boxplots für das Simulationsjahr ist in Abbildung 14 dargestellt. Es werden die Maxima und Minima mit den Whiskern angezeigt. Die Kreuze zeigen das 1% und 99 % Perzentil. Die Box beginnt und endet mit dem 10 % bzw. 90 % Perzentil und verjüngt sich bei den 25 % und 75 % Perzentilen. Der Mittelstrich kennzeichnet den Mittelwert, das Viereck zeigt den Median. Jeweils links sind die Messwerte (MW) angegeben und rechts davon zum direkten Vergleich werden die Werte der Simulation (SIM) gezeigt. Für die TB 1 und 2 zeigen die Verteilungen zu geringe Werte für die relative Feuchte in der Simulation.

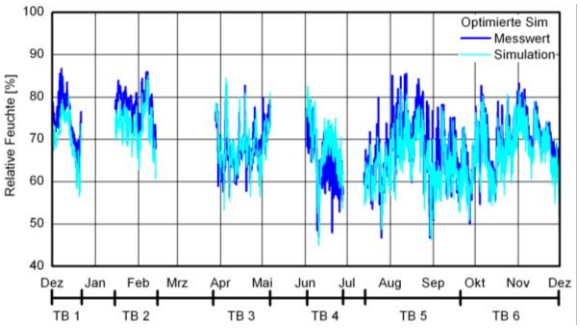

Abbildung 13: Vergleich der relativen Feuchte der optimierten Simulation mit den Messdaten, nur gültige Bereiche, von 12/2009 bis 12/2010.

Entgegen der optischen Auswertung der Graphen in Abbildung 13 zeigen die Boxplots für die Teilbereiche 5 und 6 ebenfalls Verteilungen mit niedrigeren Werten gegenüber den Messwerten. Insgesamt ergibt sich damit im Rahmen der Messungenauigkeit für die Simulation ein Mittelwert mit 67,7 % relativer Feuchte im Vergleich zu den Messwerten mit 69,5 % relativer Feuchte. Die Streuungen der 25 % und 75 % Perzentile der Simulation passen gut mit den Messwerten zusammen. Die Differenz liegt innerhalb der Messungenauigkeit der Sensoren (± 0.5 K, ± 3 % r.F.)

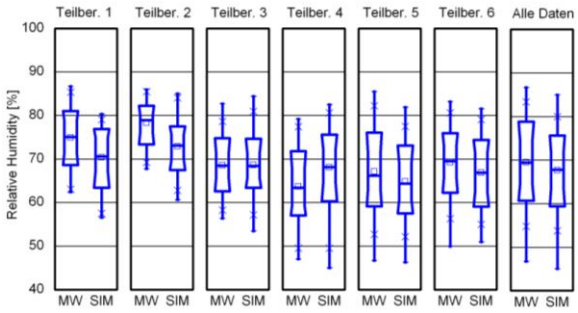

Abbildung 14: Vergleich der relativen Feuchte der Messdaten (MW) mit der Simulation (SIM) mit Boxplots entsprechend der Einteilung in Abbildung 13, von 12/2009 bis 12/2010.

Schwankungen der relative Feuchte

Abbildung 15 zeigt die maximale gleitende 24 Stunden Schwankung der relativen Feuchte der optimierten Simulation. Es kann eine gute Übereinstimmung über den gesamten Zeitraum beobachtet werden, sogar die höchsten Schwankungsbreiten werden in den Sommermonaten fast erreicht.

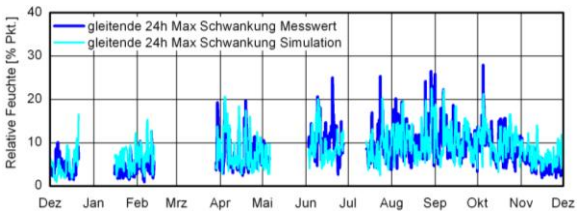

Abbildung 15: Vergleich der optimierten Simulation mit den Messwerten der maximalen Schwankung der relativen Feuchte innerhalb 24 Stunden mit stündlich gleitendem Intervall, von 12/2009 bis 12/2010.

Szenario des Paradeschlafzimmers ohne Besucher

Mit diesem Szenario wird der Einfluss der Besucher auf das Raumklima nachgewiesen, sowie das Simulationsmodell überprüft. Wenn keine interne Feuchtequellen, d. h. Besucher, vorhanden sind, stellt sich theoretisch im Mittel der absolute Feuchtegehalt der Außenluft ein. Die Simulation des Szenarios erfolgt auf Basis der optimierten Simulation, jedoch ohne Besucher und ohne interzonalen Luftaustausch. Das Szenario geht davon aus, dass wenn keine Besucher im Schloss sind, der Luftwechsel gleichmäßig niedrig ist, und wurde deshalb mit 0,15 h^{-1} angenommen. In Abbildung 16 sind die Verläufe der absoluten Feuchte als gleitender Monatsmittelwert der optimierten Simulation und den stündlichen Mittelwerten der Messwerte im Paradeschlafzimmer gegenübergestellt. Der absolute Feuchtegehalt der Simulation stimmt gut mit den Messwerten überein. Lediglich die Sommermonate sind etwas zu trocken.

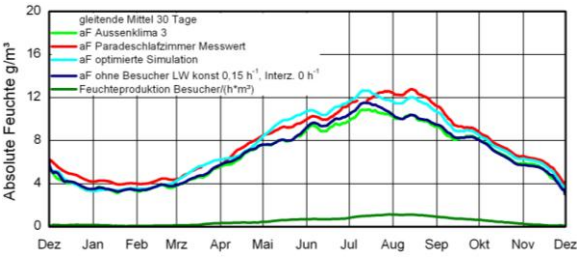

Abbildung 16: Vergleich der absoluten Feuchte der Messdaten innen (rot) mit Simulation mit Besucher (hellblau) und Vergleich Außenklima mit Szenario ohne Besucher (dunkelblau). Der Einfluss der Besucher ist klar erkennbar. Die untere dunkelgrüne Linie ist die Feuchteemission der Besucher pro m³ und Stunde. Zeitraum von 12/2009 bis 12/2010.

Die dunkelblaue Linie ist der gleitende Mittelwert der absoluten Feuchte aus dem berechneten Szenario (ohne Besucher), die grüne Linie der gleitende Mittelwert der absolute Feuchte des Außenklimas. Die

absolute Feuchte des berechneten Szenarios ohne Besucher liegt sehr dicht an der absoluten Feuchte des Außenklimas. Das Szenario bestätigt die aufgestellte These mit einer sehr guten Übereinstimmung.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem hier dargestellten Simulationsmodell ist die vereinfachte Abbildung des Raumklimas von Schloss Linderhof gut gelungen. Die konsequente Überprüfung des Einflusses verschiedener Randbedingungen erlaubt ein vertieftes Verständnis der unterschiedlichen Auswirkungen auf das Raumklima. Ein besonderer Fokus wurde auf die Simulation der relativen Feuchte im Paradeschlafzimmer gelegt. Mit einer neuartigen Auswertung der Schwankungsbreite in einem gleitendem 24 Stunden Intervall der relativen Feuchte wurden die einzelnen Varianten bewertet. Beginnend mit konstanten Durchschnittswerten für Luftwechsel und Besucheremissionen für ein Simulationsjahr wurde bereits eine gute Annäherung an die Messdaten erreicht. Jedoch konnten die Schwankungen der relativen Feuchte zu Beginn nur ungenügend nachgebildet werden. Mit detaillierteren Profilen wurde eine erhebliche Annäherung an die Messwerte in den Schwankungsbreiten der relativen Feuchte erreicht. Weitere Varianten und Untersuchungen zur Feuchtepufferung und interzonalem Luftaustausch wurden durchgeführt. Mit dem kalibrierten und überprüften Simulationsmodell wurde ein Szenario zum Besuchereinfluss durchgeführt, dass eine gute Übereinstimmung mit dem erwarteten Wert erreicht. Der neue Ansatz ermöglicht eine Kalibrierung der Simulation für die speziellen Anforderungen in der Präventiven Konservierung. Damit können Szenarien entwickelt und Aussagen getroffen werden, die im Sinne der Präventiven Konservierung zum Erhalt empfindlicher Kulturgüter einen wichtigen Beitrag leisten.

Weitere Untersuchungen sind in Vorbereitung zur Verbesserung der Simulation zum multizonalen Luftwechsel und Entwicklung eines neuen Lüftungskonzeptes in Schloss Linderhof.

DANKSAGUNG

Die Untersuchungen sind Teil des national geförderten Projektes “Klimastabilität Historischer Gebäude” und das von der EU geförderten Projektes “Climate for Culture – Damage risk assessment, economic impact and mitigation strategies for sustainable preservation of cultural heritage in the times of climate change”, Grant agreement no.: 226973. FP7-ENV-2008-1 Theme 6 Environment (including climate change).

Die Autoren danken der Bayerischen Schlösserverwaltung für Ihre Unterstützung der Projekte.

LITERATUR

ASHRAE Handbook HVAC Applications, 2011. Chapter 23: Museums, Galleries, Archives and Libraries.

Bichlmair, S. & Kilian, R., 2011. Room climate in Linderhof Palace. Impact of ambient climate and visitors on room climate with a special focus on the bedchamber of King Ludwig II. In Developments in climate control of historic buildings. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

DIN EN 10077. Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Beuth Verlag, Berlin 2006 + AC:2009.

Holm, A., Künzel, H.M., Sedlbauer, K., 2003. The hygrothermal behavior of rooms: Combining building simulation and hygrothermal envelope calculation. 8th IBPSA Conference, p. 499-506, Eindhoven, Netherlands 2003.

Kilian, R., Bichlmair , S., Wehle, B.& Holm, A., 2011. Passive sampling as a method for air exchange measurements for whole building simulation of historic buildings. 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, Proceedings V3, p. 1135- 1142, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

Kilian, R.: „Umgang mit Klimadaten im Vergleich zwischen Museen und Denkmalpflege“, in: Jeberin, A. (Hrsg.): „Preventive Conservation - Von der ‚Passiven Konservierung’ zum Risk Management’ - Erfahrungen und Konzepte zur Präventiven Konservierung in der gegenwärtigen restauratorischen Praxis“, Berlin 2007

Krus, M., Kilian, R., Bichlmair, S. Wehle B., Sedlbauer K. 2012. Schadensdiagnostik und Bewertung in historischen Gebäuden. In: Fouad N.A., (Hrsg.). Bauphysikkalender: Gebäudediagnostik. 2012, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Künzel, H.M., Sedlbauer, K., Holm, A., Krus, M. 2006. Entwicklung der hygrothermischen Simulation im Bauwesen am Beispiel der Softwarefamilie WUFI®. In: wksb, V. 55, p. 7-14, Ludwigshafen 2006

VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume, Verein Deutscher Ingenieure VDI, Beuth-Verlag, Berlin 1996, bestätigt 2007.

Wehle, B. 2010. Simulation des Raumklimas unter Berücksichtigung der Feuchtepufferungseigenschaften des Türkischen Saales im Königshaus am Schachen, Diploma Thesis, Rosenheim 2010.