

DISSERTATION

Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau

Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin/eines Doktors der technischen Wissenschaften
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec
E 253 – Institut für Architektur und Entwerfen
Fakultät für Architektur und Raumplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von
Dipl. Ing. Julia Bachinger
Matrikelnummer: 9825268
Avenue de Châtelaine 85, CH-1219 Genève –GE, Schweiz

Genf, im April 2010



Deutscher Titel / German title / titre en allemand:

Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau

Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist

Englischer Titel / English title / titre en anglais:

Moisture behaviour of flat roofs in timber-frame construction

Particularly of not-ventilated flat roofs, whose insulation and beam layer are situated between vapour barrier or vapour brake and roof membrane

Französischer Titel / French title / titre en français:

Comportement relatif à l'humidité des toits plats en ossa- ture en bois

Particulièrement de toits plats non-ventilés composé d'une couche d'isolation et de solives entre barre-vapeur ou frein-vapeur et lé d'étanchéité

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Bachinger, Julia:

Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau. Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist
ISBN 978-3-941274-51-8

Alle Rechte vorbehalten

1. Aufl. 2010, Göttingen

© Optimus Verlag

URL: www.optimus-verlag.de

Printed in Germany

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vorwort

Das ansprechende Thema meiner Dissertation verdanke ich einem Vorschlag von DI Dr. Lothar Künz, meinem ehemaligen Arbeitgeber in Vorarlberg. Er erkannte bereits früh, dass die Problematik der nicht hinterlüfteten Flachdächer im Holzbau einer tiefgreifenden Untersuchung bedarf. Er unterstützte mich nicht nur durch den Zugang zu Hintergrundwissen und den Kontakt mit Gutachtern, Architekten und Zimmerleuten in Vorarlberg, sondern auch durch sein Interesse an dem Thema und seine Ermutigungen. Dafür sei ihm und dem ganzen Büro Künz gedankt.

Als ich nach einem Betreuer für meine Doktorarbeit suchte, dachte ich zuerst an Frau Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karin Stieldorf, die mir aus meiner Studienzeit an der TU Wien noch als herzlicher Mensch in Erinnerung war. Sie hatte mich damals stark beeinflusst und mein Interesse an der Bauphysik geweckt. Da sie keine Befugnis zu Betreuung von Dissertationen hatte, empfahl sie mich jedoch weiter an ihren Kollegen Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec.

Da ich Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec anfangs nur wenig kannte, war ich etwas unsicher. Im Nachhinein weiß ich jedoch, dass ich in ihm den besten Betreuer für meine Arbeit gefunden habe. Seine Betreuung war inhaltlich bereichernd und auch motivierend. Die Art der Kommunikation konnte unkompliziert zu einem großen Teil über Email erfolgen und die Treffen mit ihm waren für mich immer mit großer Vorfreude verbunden, weil ich nicht nur fachlichen Rat bekam sondern auch mit neuem Elan wegging. Dafür bin ich ihm sehr dankbar.

Eine große Hilfe waren mir auch die zahlreichen fachlichen Kontakte, die ich während der Erstellung meiner Dissertation hatte. Da waren anfangs die Kontakte mit Gutachtern, Architekten und Zimmerleuten. Hier möchte ich speziell Herrn Dipl.-HTL-Ing. Helmut Kaiser erwähnen, der mich mit seinem Enthusiasmus ansteckte und mir auch mit etlichen Informationen weiterhalf.

Außerdem möchte ich an dieser Stelle noch Herrn Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger von der Holzforschung Austria, Herrn Heinz Weber von der Berner Fachhochschule und Herrn Univ. Prof. DI Hermann Kaufmann, meinem Zweitbegutachter, danken. Sie haben mir durch ihr Interesse an meinem Thema den Sinn meiner Arbeit vor Augen geführt.

Da meine Dissertation ausschließlich in meiner Freizeit entstanden ist, stand mein privates Umfeld in engem Kontakt mit meiner Arbeit. Mein Freund Christian musste alle Höhen und Tiefen hautnah miterleben und mittragen. Seine Gründlichkeit beim Korrigieren von Textpassagen, zahlreiche Diskussionen und seine Hilfestellung mit Literatur zu wissenschaftlichem Publizieren haben mir immer wieder neue Anregungen gebracht.

An dieser Stelle möchte ich auch meiner ganzen Familie, meinen Freunden und Arbeitskollegen danken, die mir durch die verschiedensten Diskussionen geholfen haben, Probleme von einem anderen Gesichtspunkt aus zu sehen und neue Ideen zu finden.

Besonders Angelika, meine Schwester, hat mir durch viele Gespräche und mit dem Erfahrungsaustausch zum Doktoratsstudium geholfen, meinen Weg zu finden. Sie stand mir mit fachlichem Rat zu Fragen der Chemie zur Seite und sie hat mich auch bei meinen vielen Wien-Aufenthalten beherbergt.

Auch meine Eltern haben – vermutlich ohne ihr Wissen – wesentlich zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen. Durch ihren Beistand bei vielen alltäglichen Dingen trotz der Entfernung, ihr starkes Interesse an meinen Aktivitäten und ihren uneingeschränkten Respekt gegenüber meinen Entscheidungen haben sie mir in vielen Situationen Kraft und Selbstvertrauen gegeben.

Die Arbeit an meiner Dissertation hat mir in den vergangenen Jahren immer wieder Halt und Richtung gegeben und mich auch auf meinem beruflichen Weg stark beeinflusst. Ich konnte mich mit dem Fortschritt der Dissertation weiterentwickeln und mich orientieren. Ich habe in dieser Zeit in drei verschiedenen Büros gearbeitet, in zwei verschiedenen Ländern gewohnt und zwei verschiedene Sprachen gesprochen. Meine Dissertation war dabei Ruhepol und Orientierungshilfe.

Kurzfassung

Die größeren Dämmstoffdicken, die Anforderungen an die Ästhetik eines flachen Dachaufbaus und größere Spannweiten haben zur Entwicklung des voll ausgedämmten, vorgefertigten Multibox-Elementes als Flachdach geführt. Durch die Anordnung der tragenden Holzelemente zwischen der Dampfsperre und der Dachhaut ohne Hinterlüftungsebene ist die Konstruktion aus bauphysikalischer Sicht nicht unproblematisch. Außerdem haben sich in den letzten Jahren die Schadensfälle an solchen Konstruktionen gehäuft.

In der vorliegenden Arbeit werden die wesentlichen Schwachpunkte der Multibox-Dächer herausgearbeitet und Hinweise zur Vermeidung von Schadensfällen gegeben. Dazu wurden in der Region Vorarlberg Daten zu realisierten Flachdächern gesammelt, um die Untersuchung auf möglichst realitätsnahen Bauteilaufbauten zu basieren.

In einem weiteren Schritt wurden die Materialkennwerte der üblichen in Vorarlberg verwendeten Dampfbremsen /-sperrern und Dachfolien ermittelt.

Vor der eigentlichen Untersuchung der Konstruktion wurde ein offenes Interview mit Architekten, Zimmerer-Betrieben und Sachverständigen für Schadensbegutachtung geführt. Das Interview gibt Einblick in das allgemein vorhandene Wissen zur Problematik des Multibox-Daches.

Den Kern der Arbeit stellt die Analyse des Feuchteverhaltens der gesammelten Bauteilaufbauten mit der Berechnung nach Glaser und einer dynamischen Berechnung mit dem Programm WUFI dar, die für jeden Aufbau mit den Klimadaten von drei verschiedenen Standorten in Vorarlberg durchgeführt wurden. Diese Berechnung erlaubt eine Analyse der Einflussfaktoren auf das Feuchteverhalten.

Die Untersuchung der Auswirkung der klimatischen Randbedingungen gibt Anhaltspunkte zum Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Bauteil. Durch den Vergleich des Feuchteverhaltens der Multibox-Dächer unter verschiedenen Klimabedingungen konnte ein bedeutender Einfluss der Strahlung auf den Feuchtegehalt der untersuchten Bauteilaufbauten nachgewiesen werden.

Weiters wurde das unterschiedliche Verhalten von Dämm- und Trägerebene untersucht und das Feuchteverhalten der Holzbauteile in der Trägerebene

wurde detailliert ausgewertet. Dadurch konnte aufgezeigt werden, dass in der Trägerebene vor allem die Holzbauteile im äußeren Randbereich durch Feuchteanreicherung gefährdet sind. Außerdem wurde durch die Analyse der Feuchteverteilung im Trägerquerschnitt gezeigt, dass Verformungen des Trägers aufgrund von Feuchteverlagerungen zu erwarten sind.

Konkreter werden die Anhaltspunkte für die Planung durch die Analyse der Auswirkung der Materialeigenschaften von Dampfsperre, Dachhaut und Dämmung. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem ein niedriger s_d -Wert und ein hoher Absorptionsgrad für Sonnenstrahlung (dunkle Farbe) der Dachhaut das Feuchteverhalten von Multibox-Dächern positiv beeinflussen.

Aufgrund der festgestellten Einflussnahme der Strahlung auf das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten, wurde eine weitere Berechnung mit dem Glaserverfahren vorgenommen, für die die Außenlufttemperaturen unter Berücksichtigung der solaren Strahlung und des langwelligen Strahlungsaustausches in Strahlungslufttemperaturen umgerechnet wurden.

Den Abschluss der Berechnung der gesammelten Bauteilaufbauten bildet ein Vergleich der Ergebnisse aus der Glaserberechnung und der dynamischen Berechnung. Es können die Grenzen des Glaserverfahrens und der in der Norm festgelegten Maximalwerte aufgezeigt werden.

Weiters werden Vorschläge zur Verbesserung der Feuchtesituation im Bauteil ausgearbeitet und Möglichkeiten aufgezeigt, die Feuchtebelastung der Holzbauteile zu verringern. Es werden aber auch Einschränkungen der Verbesserungsmöglichkeiten herausgestrichen und festgestellt, dass aufgrund von standort- und materialabhängigen Einflüssen individuelle Berechnungen notwendig sind.

Abstract

After the development of the prefabricated elements in timber-frame construction and their common application for non-ventilated flat roofs (so called „Multibox“ flat roof), the cases of damage for these flat roofs increased in Vorarlberg (Austria).

The arrangement of timber elements between vapour barrier or vapour brake and roof membrane without any ventilation layer provokes critical hygrothermal conditions in the construction element. Due to the lack of investigations on factors influencing moisture behaviour of non-ventilated flat roofs, the reasons of damage are often difficult to determine. The present study investigates on the main factors of influence on the hygrothermal behaviour of “Multibox” flat roof systems.

For this purpose, data of realized flat roofs were collected in the Vorarlberg region, in order to base the investigation on realistic assemblies. Besides, a research on the material characteristics of the commonly applied vapour barrier, vapour brake and roof membrane materials was carried out.

Furthermore, architects, carpenters and claim experts have been interviewed to get an overview of the commonly available knowledge on the sensibility of “Multibox” flat roof systems.

The 25 flat roof types obtained by this enquiry were examined by calculations according to Glaser and a dynamical simulation. Both calculation methods were applied in three different climate locations in the Vorarlberg region.

The analysis of the results of these comparative studies reveals the influence of climate conditions on the hygrothermal behaviour of “Multibox” flat-roof systems. Primarily, it turns out that a Glaser-calculation based on Austrian standards is inadequate to reproduce realistic results for those constructional elements. Moreover, a Glaser-calculation based on radiant air temperature values discloses the inadequateness of this calculation method to provide realistic data on moisture behaviour of non-ventilated flat roofs. Climate conditions are further proved to have a significant influence on the total amount of moisture within the Multibox flat-roof systems. One major factor, highly influencing the process, is solar radiation.

Furthermore, the comparison of the hygrothermal behaviour of insulation layer and beam layer shows a higher moisture charge for the timber elements in the beam layer. Especially, the border area near the outer surface of the beam shows increasing moisture content. Both border areas of the beam – near the exterior surface and near the interior surface of the element – feature opposed moisture increase and decrease during the winter and summer period. Thus, the periodical deformation of the beam is explained by moisture migration.

In addition, the investigation focuses on the impact of material properties of vapour brake, roof membrane and insulation on the hygrothermal conditions of “Multibox” flat roof systems. The s_d -value of the roof membrane and its color (value of absorption of solar radiation) are identified as the main factors of influence.

In a final step, the analysis of proposals of improvement of the hygrothermal conditions of timber elements in “Multibox” flat roof systems reveals possibilities of reduction of the moisture charge in the construction elements. However, the limits of these measures are highlighted. Moreover, the necessity of individual dynamical simulations of the assemblies due to their location and material properties is shown.

Résumé

Dans la région de Vorarlberg, en Autriche, un élément préfabriqué en ossature en bois servant comme toit plat a été développé dans les années 90. Plusieurs caractéristiques de ce toit nommé « Multibox » ont contribué à son emploi fréquent : L'isolation arrangée entre solives peut être effectuée plus épaisse tout en répondant aux exigences des architectes à l'esthétique d'une structure fine. De plus, l'effet de contreventement des panneaux trois-plis permet l'exécution des distances de portée plus importantes.

La position des éléments en bois entre pare-vapeur et lé d'étanchéité du toit sans aucune zone de ventilation apporte des difficultés hygrothermiques. Ces dernières années, le nombre de dégâts concernant des constructions de toits plats non ventilés a augmenté dans la région de Vorarlberg.

Cette étude identifie les principaux points faibles des toits « Multibox » et donne des conseils sur la prévention de dégâts.

Tout au début, une enquête entreprise dans la région de Vorarlberg a permis d'accéder aux données concernant la matérialisation de ces toits, pour que l'investigation puisse être basée sur des composants réalistes. Puis, les caractéristiques des matériaux des pare-vapeurs et lés d'étanchéité couramment utilisés à Vorarlberg ont été déterminées.

Avant l'analyse de l'état hygrothermique des toits « Multibox », des architectes, des charpentiers et des experts en évaluation de dégâts ont été interviewés pour acquérir une connaissance de leur savoir sur la problématique des toits plats non-ventilés.

La détermination des principaux facteurs d'influence au comportement relatif à l'humidité des toits « Multibox » a été effectuée par un calcul selon Glaser et une simulation dynamique basé sur le climat de trois différentes villes à Vorarlberg. L'analyse de l'impact climatique sur l'humidité des éléments de construction des toits plats non-ventilés permet de déterminer l'influence des conditions climatiques sur ces toits. En particulier, cette étude révèle la radiation solaire comme le plus important paramètre climatique.

Par ailleurs, une évaluation de la méthode Glaser a été étudiée afin de juger sa validité pour l'analyse de l'humidité des toits plats non-ventilés. Pour inclure la radiation solaire, un calcul supplémentaire basé sur des températures ra-

diantes de l'air ambiant a été intégré. La comparaison des résultats de ce deuxième calcul selon Glaser avec les résultats de la simulation dynamique démontre l'incapacité de cette méthode de générer des données correctes.

En outre, l'analyse du comportement différent relatif à l'humidité de la zone de la poutre et de la zone isolante indique, pour la première une accumulation d'humidité dans les éléments en bois au niveau extérieur du composant. Une étude détaillée de la quantité d'eau dans la zone de la poutre démontre l'effet de la déformation de celles-ci dû au transfert d'humidité.

Ensuite, l'investigation sur l'influence des matériaux de construction sur le comportement relatif à l'humidité des toits plats non-ventilés révèle des indications précises concernant la matérialisation de l'isolation, du pare-vapeur et du lé d'étanchéité. Il est constaté qu'une valeur s_d faible et une valeur d'absorption solaire élevée (couleur foncée) du lé d'étanchéité implique un impact positif sur la quantité d'humidité des éléments en bois des toits « Multi-box ».

Enfin, des propositions d'amélioration de la situation relative à l'humidité des pièces en bois des toits plats non-ventilés ont été élaborées. Leur analyse permet de démontrer la limitation du niveau minimal de la charge d'humidité des éléments en bois.

En conclusion, il est démontré que les caractéristiques des matériaux et la situation géographique exigent des simulations individuels des toits plats non-ventilés.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Hinweise für den Leser	2
1.3	Einführung	3
1.3.1	Das Multibox-Element	3
1.3.2	Holz / Eigenschaften von Holz	10
1.3.2.1	Aufbau von Holz	10
1.3.2.2	Holz als Baustoff	12
1.3.2.3	Zusammenspiel von Holzstruktur und Holzeigenschaften	18
1.3.2.4	Feuchtespezifische Eigenschaften von Holz	20
1.3.2.5	Holzschädlinge und ihre Lebensbedingungen	26
1.3.3	Bauphysik / Berechnungsverfahren	34
1.3.3.1	Feuchtetransport und Feuchtespeicherung	34
1.3.3.2	Anforderungen an den Feuchteschutz: ÖNORM, DIN und SIA	36
1.3.3.3	Dynamische Berechnung des Feuchteverhaltens	37
1.3.3.4	Strahlung	39
2	Kennwerte zur Untersuchung der Flachdachaufbauten	43
2.1	Materialkennwerte	43
2.2	Klimatische Randbedingungen	45
2.2.1	Außenklima	45
2.2.2	Innenklima	49
2.2.3	Wärmeübergangswiderstand	49
2.3	Beurteilungskriterien	49
2.4	Bauteilaufbauten	52

3	Interview	55
4	Rechnerische Untersuchungen des hygrothermischen Verhaltens von Multibox-Dächern	59
4.1	Diskussion der Ergebnisse eines ausgewählten Beispiels	60
4.1.1	Berechnung nach dem Glaserverfahren – Bauteilaufbau Nr. 03	60
4.1.2	Dynamische Berechnung – Bauteilaufbau Nr. 03	60
4.2	Resultate der Glaserberechnungen mit Klimadaten nach ÖNORM	64
4.2.1	Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse	64
4.2.2	Vergleich von Dämmebene und Trägerebene	70
4.2.3	Problemstellen der Aufbauten gemäß der Berechnung nach dem Glaserverfahren	73
4.3	Resultate der dynamischen Berechnungen	74
4.3.1	Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse	74
4.3.1.1	Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$	74
4.3.1.2	Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf Δu_m	81
4.3.1.3	Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%	88
4.3.1.4	Hygrothermische Zustände	91
4.3.1.5	Vergleich der Klimadaten	93
4.3.1.6	Zusammenfassung der Untersuchung der Klimastandorte	98
4.3.2	Vergleich Dämmebene und Trägerebene	99
4.3.2.1	Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$	99
4.3.2.2	Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf Δu_m	104
4.3.2.3	Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%	110
4.3.2.4	Hygrothermische Zustände	111
4.3.2.5	Zusammenfassung Vergleich Dämmebene und Trägerebene	116
4.3.3	Untersuchung der Feuchteverteilung in Träger und Holzschalung der Trägerebene	118
4.3.4	Einfluss der Materialeigenschaften auf die Berechnungsergebnisse	123

4.3.4.1	Dämmmaterial	124
4.3.4.2	s_d -Wert der Dampfsperre	131
4.3.4.3	s_d -Wert der Dachhaut	135
4.3.4.4	Strahlungsabsorption und -emission der Dachhaut	139
4.3.4.5	Zusammenfassung Materialien	150
4.3.5	Übersicht über die Erkenntnisse aus der Berechnung mit WUFI	152
4.4	Resultate der Glaserberechnungen mit Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten	153
4.4.1	Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse	154
4.4.2	Vergleich der Klimadaten nach ÖNORM und der Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten	159
4.5	Vergleich der Glaserberechnungen und der Berechnung mit WUFI	161
5	Untersuchung von Verbesserungsvorschlägen	165
5.1	Dämmung über der äußeren Holzschalung	165
5.2	Feuchtevariable Dampfbremse	174
5.3	Feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremse	184
5.4	Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik	192
6	Wege der Vermeidung von Schäden bei Flachdächern im Holzbau, Hinweise für Planung und Normung	196
6.1	Berechnung nach Glaser	196
6.2	Dynamische Simulation	197
6.3	Einfluss und Verhalten einzelner Materialien	201
6.4	Vorschläge zur Verbesserung des hygrothermischen Verhaltens von nicht hinterlüfteten Multibox-Dachaufbauten	203
6.5	Empfehlungen für die Normung	205
6.6	weiterführende Forschung	206
7	Übersicht über Zeichen und Einheiten	207
8	Literaturverzeichnis	208

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schematische Darstellung eines aufgeschnittenen Multibox-Elementes als Fertigteil auf Wandelementen	4
Abbildung 1.2:	Schematische Darstellung des Aufbaus eines Multibox-Elementes als Flachdach	4
Abbildung 1.3:	Typische Schadensbilder von nicht hinterlüfteten Flachdächern mit Dämmung in der Trägerebene	6
Abbildung 1.4:	typische Schadensbilder von nicht hinterlüfteten Flachdächern mit Dämmung in der Trägerebene	7
Abbildung 1.5:	Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz. Aus: (Niemz 1993)	12
Abbildung 1.6:	Aus: (pro:Holz 2002)	13
Abbildung 1.7:	Aus (HTS-Träger 2009).....	14
Abbildung 1.8:	Deckensysteme. Aus: (pro:Holz 2002)	15
Abbildung 1.9:	Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers. Aus: (Niemz 1993)	23
Abbildung 1.10:	Feuchtespeicherisotherme für Holz (Fichte) (WUFI Pro 2005).....	24
Abbildung 1.11:	Lasteinfluß auf die Sorptionsisotherme von Holz.. Aus (Niemz 1993)	25
Abbildung 1.12:	Sorptionsisothermen von Hemicellulose, Holocellulose, Klason-Lignin und Holz. Aus: (Niemz 1993)	25
Abbildung 1.13:	Verallgemeinertes Isoplethensystem von Sedlbauer (Sedlbauer 2001)Für die Sporenauskeimungszeit wird die Dauer in Tagen (d) angegeben. Das Myzelwachstum wird in mm/Tag (mm/d) angegeben.	31
Abbildung 1.14:	Übersichtsmodell zur kritischen Temperatur und relativen Luftfeuchte für Schimmelpilzwachstum auf Holz. Aus: (Viitanen 2001).....	32

Abbildung 1.15:	Spektrale spezifische Ausstrahlung M_λ der Strahlung des schwarzen Strahlers nach dem Planckschen Gesetz. Aus: Lutz et al. 2002.....	39
Abbildung 1.16:	Schematische Darstellung der spektralen spezifischen Ausstrahlung M_λ schwarzer (a), grauer (b), selektiver (c) Strahlung. Aus: Lutz et al. 2002.....	40
Abbildung 3.1:	Markante Ausführungsfehler.....	58
Abbildung 4.1:	Verteilung des Wassergehaltes über den Querschnitt. Mittelwertkurve für Bauteilaufbau Nr. 10, Standort Schröcken. (Berechnung mit WUFI)	122
Abbildung 4.2:	Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Dämmebene, Aufbau Nr. 03 (Berechnung mit WUFI)	144
Abbildung 4.3:	Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Dämmebene, Aufbau Nr. 10 (Berechnung mit WUFI)	145
Abbildung 4.4:	Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Trägerebene, Aufbau Nr. 03 (Berechnung mit WUFI)	146
Abbildung 4.5:	Strahlungslufttemperatur für Bregenz im Januar mit unterschiedlichen Absorptionsgraden α und Emissionsgraden ϵ	148
Abbildung 4.6:	Strahlungslufttemperatur für Bregenz im Juli mit unterschiedlichen Absorptionsgraden α und Emissionsgraden ϵ	148
Abbildung 5.1:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 00.....	166
Abbildung 5.2:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 01.....	166
Abbildung 5.3:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 02.....	167
Abbildung 5.4:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 00.....	169
Abbildung 5.5:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 01.....	169
Abbildung 5.6:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 02.....	170

Abbildung 5.7:	Systemskizze des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik.....	193
Abbildung 5.8:	Mittelwertkurve über das Bauteilprofil des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik, Trägerebene.....	193
Abbildung 5.9:	Wassergehalt der äußeren Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik.....	194
Abbildung 5.10:	Wassergehalt des Trägers des Multibox- Elementes zur Verbesserung der Raumakustik.....	195

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Übersicht zu den unterschiedlichen Angaben in der Literatur zur relativen Luftfeuchte und Temperatur, ab der mit Pilzwachstum auf Holz zu rechnen ist.	30
Tabelle 1.2:	Mould growth index in Abhängigkeit von der prozentualen Flächenbelegung und verbale Charakterisierung. Aus: (Sedlbauer 2001, p 51)	33
Tabelle 1.3:	Übersicht zu den Anforderungen an den Feuchteschutz im Bauteilinneren der nationalen Normen in Österreich, Deutschland und der Schweiz.	37
Tabelle 1.4:	Emissionsgrad technischer Oberflächen zwischen 0 und 100°C nach E.Schmidt, Eckert und Reinders. Aus: Lutz et al. 2002	41
Tabelle 1.5:	Richtwerte für den Strahlungsabsorptionsgrad α verschiedener Oberflächen im energetisch wirksamen Spektrum des Sonnenlichts. Aus: DIN 4108-6, Tabelle 8.....	42
Tabelle 2.1:	Die langjährigen Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte liegen in Bregenz in den Monaten August bis Januar über dem lt. ÖNORM B 8110-2 vorgegebenen Werten.	48
Tabelle 2.2:	Übersicht zu den Materialien der Bauteilaufbauten	54
Tabelle 4.1:		101
Tabelle 4.2:		107
Tabelle 4.3:		111
Tabelle 4.4:		160
Tabelle 4.5:	Anzahl der Bauteilaufbauten mit unzureichender Verdunstung (*Str = Strahlungslufttemperatur).....	162
Tabelle 4.6:	Mittelwert der Höhe der Schwankung im Jahresverlauf und Mittelwert der Höhe des Kondensatausfalls (*Str = Strahlungslufttemperatur, **Mittelwerte ohne Berücksichtigung von Bauteilaufbau Nr. 14 und Nr. 25).....	163

Tabelle 4.7: Anzahl der Bauteilaufbauten, deren äußere Holzschalung einer Schädigung unterliegt, weil ihr massebezogener Feuchtegehalt im Jahresverlauf mehr als 3% ansteigt (*Str = Strahlungslufttemperatur)	164
Tabelle 5.1: Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung in der Dämmebene bei unterschiedlicher Außendämmung.....	167
Tabelle 5.2: Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung in der Trägerebene bei unterschiedlicher Außendämmung.....	170
Tabelle 5.3: Feuchteverhalten des Trägers bei unterschiedlicher Außendämmung.	172
Tabelle 5.4: Liste einiger gängiger feuchtevariabler Dampfbremsen	174
Tabelle 5.5: Übersicht zu den untersuchten Varianten.....	175
Tabelle 5.6: Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene für Variante A	175
Tabelle 5.7: Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene für Variante B	176
Tabelle 5.8: Übersicht über feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremsen ...	184
Tabelle 5.9: Übersicht zu den untersuchten Varianten	185

Anhang

Anhang A: Materialkennwerte

Anhang A1: Materialkennwerte der verwendeten Materialien

Anhang A2: Materialkennwerte von PVC-Dachbahnen

Anhang A3: Materialkennwerte polyolefiner Dachbahnen

Anhang A4: Materialkennwerte bituminöser und kautschukhaltiger Dachabdichtungen

Anhang A5: Materialkennwerte von Dampfbremsen /-sperrern

Anhang A6: Quellenangaben zu den Materialkennwerten von Dachbahnen und Dampfbremsen /-sperrern

Anhang B: Übersicht Klimadaten

Anhang C: Übersicht Beurteilungskriterien

Anhang D: Interview

Anhang D1: Fragenkatalog des Interviews

Anhang D2: Auswertung der Interviews

Anhang E: Berechnungsergebnisse Bauteilaufbau Nr. 03