



Universität für Bodenkultur Wien  
University of Natural Resources  
and Life Sciences, Vienna



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## DIPLOMARBEIT Master's Thesis

### **Einfluss der Zuverlässigkeit unterschiedlicher hölzerner Flachdachkonstruktionen auf die Lebenszykluskosten**

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

unter der Betreuung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar  
und  
Dipl.-Ing. Christoph Harreither

E 206

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz  
Fakultät für Bauingenieurwesen  
Technische Universität Wien

eingereicht an der Universität für Bodenkultur Wien

von

Petra Kalinka  
Matrikelnummer: 0526167

Wien, April 2017

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, April 2017

---

## Danksagung

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar für die Betreuung und die Möglichkeit diese Arbeit am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz verfassen zu können

sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Christoph Harreither für die Betreuung, die Diskussionsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung bei kritischen Fragestellungen.

Ein großes Dankeschön richte ich an alle ausführenden Holzbaufirmen, die mich unterstützt haben und einen wesentlichen Teil der Arbeit möglich gemacht haben.

Meinen Eltern und Geschwistern danke ich für den Rückhalt und die Stärkung, die sie mir fortwährend entgegengebracht haben.

## Kurzfassung

### **Einfluss der Zuverlässigkeit unterschiedlicher hölzerner Flachdachkonstruktionen auf die Lebenszykluskosten**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung einer günstigen hölzernen Flachdachkonstruktion in Bezug auf die Lebensdauer und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten. Ziel dieser Arbeit ist, den Einfluss unterschiedlicher Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise auf deren Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit systematisch zu untersuchen, um damit einen Rückschluss auf die Lebenszykluskosten zu ermöglichen. Anhand von hygrothermischen Simulationen werden vorwiegend Variationen von Ausführungen in Holzrahmenbauweise und Konstruktionen in Form des Holzmassivbaus vergleichsweise analysiert. Das Hauptaugenmerk wird auf den Holzleichtbau gelegt, wobei aufgrund des Schadensrisikos infolge der Möglichkeit des konvektiven Feuchteintrags die beeinflussenden Bedingungen aufgezeigt werden sollen. In diesem Zusammenhang wurden der Einfluss der solaren Absorption der Dachhaut und der Einsatz feuchteadaptiver und konventioneller Dampfbremsen im Hinblick auf Luftleckagen in der Konstruktion untersucht. Kritische Bedingungen und deren Auswirkungen auf die Gebrauchsdauer wurden mit Hilfe des zulässigen Feuchtegehaltes sowie des Risikos für Schimmelpilzbefall bewertet. Die Gebrauchsdauer der Konstruktion bzw. einzelner Konstruktionsbauteile wurde nach dem Bewertungskriterium gesondert ermittelt. Abschließend wurden die Bauwerkskosten den gegenwärtigen Kosten unter Einbezug von anfallenden Sanierungskosten gegenübergestellt und unvorteilhafte Ausführungsvarianten aufgezeigt.

## **Abstract**

### **Effects of reliability of different timber flat roof constructions on the life cycle costs**

The aim of this thesis is the review of advantageous timber flat roof constructions related to life expectancy and the connected influence on the life cycle costs. The focus is on light weight constructions due to numerous events of damage. Air leakages as a consequence of planning and workmanship cause convective moisture transfer that effect the service life significant. Related to this fact, the factor of solar absorbance of roofing and the internal diffusion resistance represent major components on the moisture behavior. On the basis of hygrothermal simulations the service life was analysed in the context of tolerable moisture content and the risk of mould. Concluding the construction costs were faced to the present value in case of restoration and unfavourable systems can be pointed out.

**Inhaltsverzeichnis**

1	Motivation und Problemstellung.....	1
2	Aktueller Stand der Forschung .....	3
3	Methode .....	5
3.1	Hygrothermische Simulationen .....	5
3.1.1	Grundlagen zu den maßgeblichen physikalischen Prozesse .....	5
3.1.2	Hygrothermische Simulationen mit HAM 4D VIE .....	7
3.2	Ermittlung der Gebrauchsdauer .....	11
3.2.1	Ermittlung der Gebrauchsdauer nach dem zulässigen Feuchtegehalt .....	11
3.2.2	Abschätzung des Schimmelpilzrisikos unter den sich einstellenden Bedingungen .....	13
3.3	Ermittlung der gegenwärtigen Kosten auf Grundlage der Gebrauchsdauer mittels Barwertmethode.....	19
4	Grundlagen der Untersuchung .....	22
4.1	Typen der untersuchten hölzernen Flachdachkonstruktionen .....	22
4.1.1	Holzrahmenbau.....	22
4.1.2	Holzmassivbau.....	25
4.2	Grundlagen zu den hygrothermischen Simulationen - Einflussfaktoren.....	27
4.2.1	Materialparameter .....	27
4.2.2	Klimatische Randbedingungen.....	31
4.2.3	Luftdichtheit der Konstruktion - Konvektive Feuchteinträge aufgrund von Leckagen .....	35
5	Ergebnisse - Auswertung .....	38
5.1	Simulationsergebnisse im Hinblick auf den Feuchtegehalt der Konstruktion und die daraus resultierende Gebrauchsdauer .....	38
5.1.1	Feuchtegehalt der Gesamtkonstruktion .....	38
5.1.2	Feuchtegehalt einzelner Bauteilschichten .....	41
5.1.3	Feuchtegehalt einzelner Recorderpositionen .....	48
5.2	Bewertung der Gebrauchsdauer anhand des Modells von Viitanen et al. .	54
5.3	Zusammenfassende Darstellung der Gebrauchsdauer anhand der ausgewählten Kriterien .....	62
5.4	Ökonomische Betrachtung.....	65
5.4.1	Quantifizierung der Bauwerkskosten .....	65
5.4.2	Quantifizierung der anfallenden Kosten auf die gesamte Lebensdauer .....	68
6	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse .....	74
7	Ausblick.....	78
8	Anhang.....	79

---

8.1	Abbildungsverzeichnis .....	79
8.2	Tabellenverzeichnis .....	82
8.3	Ausschreibungsunterlage .....	83
9	Literatur .....	98

## **1 Motivation und Problemstellung**

Historisch rückblickend ist das Flachdach in weiten Teilen des Mittelmeerraums, Asiens und Amerikas seit jeher eine übliche Bauform. In Mittel- und Nordeuropa gewinnt das flache Dach erst seit kurzem an Bedeutung. Zur Zeit des kaiserlichen Wiens setzte sich der kompakte Baustil lediglich im Industriebau durch, da damals die zeitgemäße Architektur und die Meinung der Gesellschaft nicht für neue Formen aufgeschlossen waren. Aus diesem Grund versuchten sich bis zu Beginn des 1. Weltkriegs nur einzelne avantgardistische Architekten an der Gestaltungsform des Neuen Bauens. Nach dem Zusammenbruch der alten Ordnung wurde Raum für neue Ansätze der Gestaltung geschaffen und mit der Entwicklung neuer Bautechniken neue Möglichkeiten eröffnet. Die Nutzung der Dachflächen gewann in einigen Kreisen an Bedeutung, blieb aber noch immer eine Gesinnungsfrage. Die materialtechnologische Entwicklung konnte durch unzureichend gesicherte Erfahrungswerte keinen Beitrag zur Popularität beitragen. Erst nach dem 2. Weltkrieg wurden dem Flachdach durch die Verbreitung des Internationalen Stils auch in Zentraleuropa die Schranken geöffnet. Es entstand im Zuge des Wiederaufbaus und dem Wirtschaftsaufschwung eine Vielzahl von schnell bewerkstelligten Massentbauten, welche jedoch durch deren technische und ästhetische Mangelhaftigkeit dem Image des flachen Daches nachhaltig schaden. [SED10]

Mittlerweile gleicht das Flachdach im Wohnbau einem architektonischen Trend. Aufgrund der geringen Konstruktionshöhe im Holzrahmenbau, dem in Relation geringen Eigengewicht und dem hohen Vorfertigungsgrad erscheint jene Konstruktionsvariante als sehr vorteilhaft. Vor allem in Hinsicht statischer Gegebenheiten beispielsweise bei Dachgeschoßausbauten ist der Holzleichtbau eine kostengünstige Lösung. In den letzten Jahrzehnten wurden jedoch Dachelemente mit Sparrenvollämmung mit beidseitig diffusionsdichten Schichten forciert, wodurch die eingeschlossene Feuchtigkeit innerhalb der Konstruktion zu gravierenden Schäden führte. Infolge der resultierenden Bauschäden war eine Neuausrichtung im Konstruktionsaufbau für den Erhalt des Holzrahmenbaus von entscheidender Bedeutung. Anlässlich der sich häufenden Schadensfälle wurde in Forschung und Entwicklung zu dieser Thematik bzw. Problematik investiert. Folglich wurden Forschungsprojekte zur Untersuchung unterschiedlicher Ausführungsvarianten und den äußeren Einflüssen durchgeführt. Das schwer kalkulierbare Risiko eindringender Feuchtigkeit beeinflusst die Wahl der Konstruktion und deren Risikotoleranz. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass bei der Betrachtung der

unterschiedlichen Konstruktionsaufbauten die Planung und Ausführungsqualität von entscheidender Bedeutung ist. [NUS10a]

Der Einfluss der Ausführungsqualität der luftdichten Hülle und deren Auswirkung auf die Funktionstüchtigkeit dienen in der vorliegenden Arbeit als Indikator für die Zuverlässigkeit unterschiedlicher hölzerner Flachdachkonstruktionen.

Die Problemstellung ergibt sich anhand der verschiedenen Konstruktionsvarianten und deren unterschiedlichen Risikofaktoren im Sinne der Toleranz von konvektiven Feuchteinträgen aufgrund von Undichtheiten in der Konstruktion und deren Auswirkung auf die Funktionstüchtigkeit im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Quantifizierung der zu erwartenden Kosten mit Einbezug der gegebenenfalls notwendigen Sanierungskosten als Entscheidungsgrundlage für den Konsumenten.

## **2 Aktueller Stand der Forschung**

Die derzeit gültige Norm zur Berechnung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Bauelementen ÖNORM EN ISO 13788 [ISO13] bezieht Aspekte wie konvektive Feuchteinträge sowie das solare Absorptionsverhalten nicht mit ein. Auch Einflüsse wie die Beschattung des Bauteils durch äußere Gegebenheiten sind nicht festgehalten. Überdies werden erhöhte Einbaufeuchten der eingesetzten Materialien und der Einsatz von feuchteadaptiven Diffusionswiderständen von Materialien nicht berücksichtigt. Wie bereits einige Untersuchungen gezeigt haben, sind jene genannten Faktoren jedoch maßgebend in Bezug auf das hygrothermische Verhalten von Bauteilen. [NUS10d] Infolge der Komplexität des Feuchtetransports werden in der besagten Norm ÖNORM EN ISO 13788 [ISO13] ausschließlich vereinfachte Berechnungsverfahren festgelegt, die auf dem Feuchtetransportmechanismus der Wasserdampfdiffusion - dem Glaser-Verfahren - beruhen. Maßgebliche Aspekte, wie die Schwankungen von Materialeigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehalts, die kapillare Saugwirkung und der Transport von Feuchte in Baustoffen in flüssiger Form sowie das hygroskopische Verhalten von Baustoffen werden nicht berücksichtigt. Diese Planungsgrundlage stellt somit eine unzuverlässigere Aussage für Bauwerke dar, welche ein hohes Wärme- und Feuchtespeichervermögen aufzeigen und signifikanter Luftleckagen unterliegen. [ISO13]

Durch eine Forschungsk Kooperation der Holzfor schung Austria und der Technischen Universität Wien wurden die Bedeutung des konvektiven Feuchteintrags und der solaren Strahlungs- /Absorptionsbedingungen für die Implementierung in die stationäre Bauteilbewertung nach Euro-Glaser aufgezeigt. Mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen wurden bei einem innenliegenden variablen Diffusionswiderstand unter Einbezug des solaren Absorptionsgrades langfristig gesehen keine Feuchteakkumulation und das Austrocknen erhöhter Einbaufeuchte berechnet. Im Zuge dessen konnte auch der Einfluss der Luftdichtheit und die damit verbundenen konvektiven Feuchteinträge veranschaulicht werden. [NUS10d]

Untersuchungen in Form eines dreijährigen Forschungsprojekts der Holzfor schung Austria in Kooperation mit der Technischen Universität Wien zeigen die Auswirkungen einer Beschattung hölzerner Flachdachelemente anhand von Freilandversuchen. Dabei wurde eine hohe Sensibilität von folienabgedichteten Dächern bei geringer Dachoberflächentemperatur festgestellt. Vollzeitig beschattete Dachelemente wiesen

eine hohe und lang anhaltende relative Luftfeuchte im Gefach auf und an der äußeren Beplankung konnten teilweise kritische Materialfeuchten beobachtet werden. Im Gegenzug wurden bei den besonnten Elementen an der Dampfbremse kritische Klimabedingungen für biologisches Wachstum festgehalten, welche im Vergleich zur äußeren Beplankung stärker ausgeprägt waren. Trotzdem wurde an den Freilandversuchen kein Schimmelbefall festgestellt. Es konnte auch aufgezeigt werden, dass ein höherer innenseitiger Diffusionswiderstand für eine Rücktrocknung bei besonnten Elementen zwar hinderlich ist, jedoch im Falle einer Beschattung auch von Vorteil sein kann. [NUS10a]

Bei der Betrachtung von Gründächern auf Dachabdichtungen konnte ausschließlich eine geringfügige Erwärmung der Dachhaut beobachtet werden. Infolgedessen ist auch das Potential der Umkehrdiffusion nicht in gewünschtem Maße auszuschöpfen. Dadurch kann eine Feuchteakkumulation im Dachaufbau eine mögliche Folge sein, wobei im Falle innenseitiger Leckagen ein hohes Schadensrisiko besteht. Trotz den vorherrschenden Bedingungen für Schimmelbefall an der Gefachaußenseite konnte an den Dachelementen der Freilandversuche kein Pilzbefall festgestellt werden. [NUS10b]

Im Zuge der Untersuchungen von Metaldächern als hinterlüftete und nicht hinterlüftete Konstruktion konnte das günstigste Verhalten im Vergleich zu den Foliendächern und Gründächern verzeichnet werden. Hinterlüftete Metaldächer zeigten zudem trotz einer dauerhaften Beschattung und dem verbundenen geringeren Volumenstrom in der Hinterlüftungsebene keine erhöhten Materialfeuchten und kaum Bedingungen für Schimmelwachstum. [NUS10c]

Bei experimentellen Untersuchungen von Winter et al. [WIN09] konnte festgestellt werden, dass ein sorptiver Dämmstoff wie Zellulose einen guten Feuchtespeicher darstellt, welcher anfallendes Tauwasser aus der Kondensationsperiode sowie Baufeuchte zwischenspeichert und in der Trocknungsperiode wieder abgeben kann. Jener Mechanismus kann folglich dazu beitragen, die Bildung von Kondensat in der kritischen Ebene weitgehend zu verhindern und bei unbelüfteten Flachdächern zur Risikotoleranz beizutragen. Bei der Untersuchung von Flachdächern bei Bestandsgebäuden konnten in deren Untersuchungsrahmen ausschließlich Schäden infolge unplanmäßigem Eintrittes von Regenwasser oder Leckagen in der luftdichten Ebene identifiziert werden. [WIN09]

### **3 Methode**

#### **3.1 Hygrothermische Simulationen**

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, ist das Glaser-Verfahren nur bedingt für die Abschätzung der Dauerhaftigkeit einer Konstruktion anwendbar, da ausschließlich Diffusionsprozesse bei stationären klimatischen Randbedingungen mit einbezogen werden. Um detailliertere Aussagen zu feuchtebedingtem Schadensrisiko in Bauteilen zu treffen, wurden Softwareprogramme entwickelt, welche die Wärme- und Feuchtespeicherung, die Wirkung latenter Wärme und den Transport via Flüssigkeiten und Konvektion unter realistischen Rand- und Anfangsbedingungen mit einbeziehen. [EN07]

##### **3.1.1 Grundlagen zu den maßgeblichen physikalischen Prozesse**

###### **3.1.1.1 Wärmetransport und Wärmespeicherung**

Lokale Temperaturunterschiede verursachen eine Wärmebewegung entlang des Temperaturgefälles. Die Transportmechanismen können je nach Art des Stoffes variieren. In festen Stoffen dominiert der Wärmetransport durch Wärmeleitung, in Gasen und Flüssigkeiten erfolgt dieser darüber hinaus durch Konvektion und bei strahlungsdurchlässigen Materialien durch Wärmestrahlung. Jene Wärmetransportmechanismen können sich unabhängig oder in Kombination ereignen. [FIS08]

Die Wärmeleitung charakterisiert sich durch einen an Materie gebundenen Energietransport zwischen benachbarten Molekülen und wird mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  beschrieben. Diese variiert je nach Struktur und Aufbau des Materials und ist temperaturabhängig. Bei hygroskopischen Stoffen wirkt sich auch der Wassergehalt auf den Wärmetransport aus. [FIS08] Mit steigender Baustofffeuchte nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu, hierbei ist neben der Wärmeleitfähigkeit des in den Poren oder Kapillaren existenten Wassers auch der Energietransfer der in den Poren stattfindenden Wasserdampfdiffusionsvorgänge maßgeblich. [LUT02]

Die natürliche Konvektion in Gasen und Flüssigkeiten wird durch lokale Temperatur- bzw. Druckunterschiede induziert. Diese kennzeichnet sich durch die Fortbewegung von Molekülen mit deren Energieinhalt im verfügbaren Raum. Passiert ein Wärmeaustausch zwischen Molekülen und einem angrenzenden Feststoff, wird dies als Wärmeübergang bezeichnet. Der Wärmeübergang ist abhängig von den

Einflussgrößen Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und den geometrischen Verhältnissen. [FIS08]

Die Wärmestrahlung beschreibt die emittierte elektromagnetische Strahlung eines Körpers, wobei die Intensität und die spektrale Energieverteilung von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit abhängen. [FIS08]

Bei instationären Umgebungsbedingungen werden die Wärmebewegungen nicht ausschließlich durch die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe bestimmt, sondern auch durch deren Wärmespeicherkapazität, welche von der Dichte des Materials abhängt. [LUT02] Hierzu kommt bei hygroskopischen Baustoffen neben der sensiblen Wärme auch die latente Wärme, welche beim Wechsel der Aggregatzustände die aufgewendete bzw. freiwerdende Wärme beinhaltet.

### 3.1.1.2 Feuchtetransport und Feuchtespeicherung

Für den Feuchtetransport in Bauteilen sind die Wasserdampfdiffusion und der kapillare Wassertransport bedeutend. Die Wasserdampfdiffusion beschreibt den Transport von gasförmigen Wassermolekülen entlang eines Konzentrations- bzw. Partialdruckgefälles, welches von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. In porösen Baustoffen wird der Transportprozess durch das Baustoffgefüge behindert. Das Ausmaß dieser Beschränkung wird mit Hilfe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  beschrieben. Die Diffusionswiderstandszahl gibt an, um wie viel geringer die Massenstromdichte durch den Baustoff im Vergleich zu ruhender Luft ist. Für die Betrachtung einer Baustoffschicht wird eine äquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  formuliert, welche sich aus dem Produkt der Diffusionswiderstandszahl des Baustoffes und der Schichtdicke ergibt. [FIS08]

Der kapillare Wassertransport bezeichnet den Transportprozess in ungesättigten Poren. Die Kapillarität bei Flüssigkeiten ist durch die spezifische Kraftwirkung an der Flüssigkeitsoberfläche begründet und wird mit der Grenzflächenspannung beschrieben. Das Eindringen von Wasser in porige Baustoffe erfolgt durch den erzeugten Kapillardruck und wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten  $w$ , welcher die kapillare Saugfähigkeit von Baustoffen festlegt, quantifiziert. [FIS08]

Die Feuchtespeicherung in Baustoffen erfolgt im Wesentlichen adsorptiv sowie durch Kapillarkondensation. Im hygroskopischen Bereich, in dem Diffusionsvorgänge den gewichtigen Feuchtetransport bestimmen, erfolgt die Speicherung mittels Adsorption. [FIS08] Die Adsorption beschreibt die Anlagerung von Wassermolekülen aus der feuchten Umgebungsluft bis zum Erlangen eines Gleichgewichtszustandes. Anhand von Sorptionsisothermen wird die Abhängigkeit der angelagerten

Wassermenge von der relativen Luftfeuchte bei isothermen Verhältnissen dargestellt. [KRU95] Die Kapillarkondensation findet im Feuchtebereich über der Gleichgewichtsfeuchte bei 95 % relativer Luftfeuchtigkeit statt. In dem sogenannten überhygroskopischen Bereich, in dem der kapillare Wassertransport dominiert, füllen sich die benetzbaren Porenbereiche aufgrund des vorherrschenden Kapillardrucks beginnend mit den kleinsten Porenweiten bis hin zu größeren Poren. [FIS08] Da der Sättigungsdruck über Kapillaren kleiner als über ebenen Flüssigkeitsoberflächen ist, kondensiert ein Teil des Wasserdampfes in den Kapillaren. [NIE93] Der vorliegende Kapillardruck wird als Saugspannung bezeichnet und ergibt in Abhängigkeit vom Wassergehalt die Speicherfunktion für den Kapillarwasserbereich. Die messbare Saugspannungskurve weist häufig einen Hystereseeffekt zwischen Be- und Entfeuchtung auf, welche durch die Porengrößenverteilung begründet ist. [KRU95]

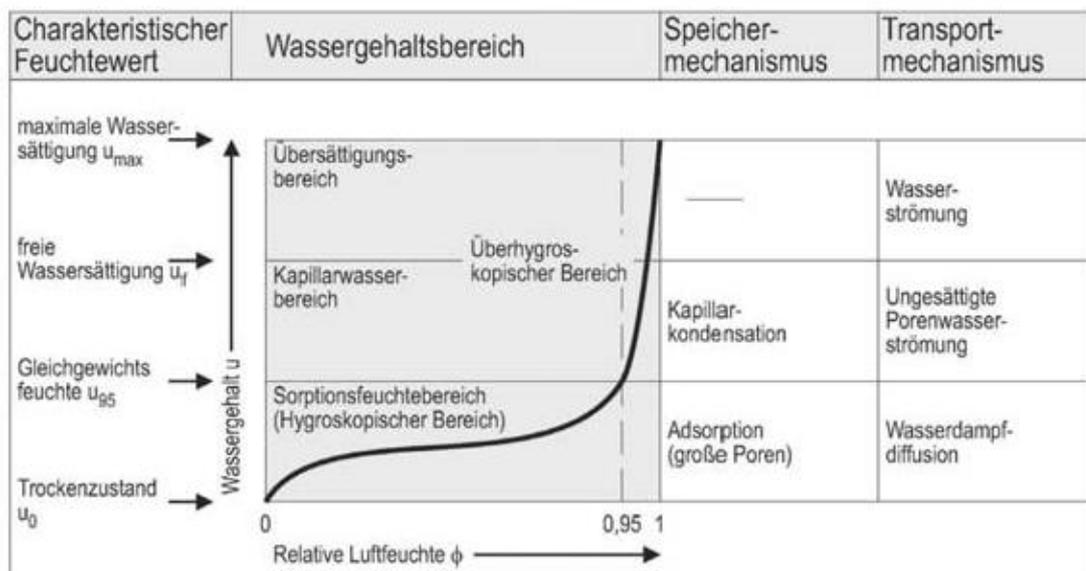


Abb. 1: Wassergehaltsbereiche in einem feinporigen, hygroskopischen Baustoff [FIS08]

### 3.1.2 Hygrothermische Simulationen mit HAM 4D VIE

Das Simulationsprogramm HAM 4D VIE wurde am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der Technischen Universität Wien entwickelt. Mit Hilfe dieses Programmes ist sowohl eine ein-, eine zwei- als auch eine dreidimensionale Betrachtung von Wärme-, Feuchte- und Lufttransportprozessen möglich. HAM 4D VIE löst numerisch Gleichungen zu Wärmespeicherung und -transport, Feuchtespeicherung und -transport sowie zu Lufttransport für die gekoppelten Prozesse bei vorgegebenen Randbedingungen.

Für die hygrothermische Simulation mit HAM 4D VIE sind folgende Eingangsparameter, welche in Kapitel 4 erläutert werden, von Relevanz:

- Materialeigenschaften
- Außenklimadatensatz
- Innenklimadatensatz
- Modellbildung (Geometrie, Zuordnung der Materialien sowie Randbedingungen, etc.)

Anhand der unterstellten Bedingungen werden die Gleichungen numerisch gelöst und man erhält die gewünschten Ausgangsgrößen hinsichtlich der stattfindenden Wärme- und Feuchtetransportprozesse. Darunter fallen beispielsweise Werte zum Temperaturverlauf, zur relativen Luftfeuchtigkeit sowie zum Wassergehalt.

Die Eingabeparameter sind in Form von Text-Dateien hinterlegt. Die Materialeigenschaften der anhand der untersuchten Konstruktionen zu Grunde gelegten Baustoffe sind in der Materialdatenbank festgelegt und können folgende Baustoffeigenschaften beinhalten:

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

Für Baustoffe, welche als Grenzschichten fungieren, wie beispielsweise dampfbremsende Schichten, kann das Material lediglich über die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl definiert werden. Folgende Abbildung zeigt einen schematischen Auszug der Materialdatenbank.

```

2 anzahl_materialien

*ANFANG*
OSB
Farbe_RGB          184  86  0
Dichte_kg/m3      650
SpezWKP_J/kgK     1700
WLF_W/mK          1      0.13
Permeabilitaet_m2 0
Feuchtespeicherfunktion 1      840.  3.e4  0.3  0.
DiffWid_dimlos___my25_my80_my100
                   1      165  80  10
Flleitzaehl       0

*ANFANG*
Weichholz
Farbe_RGB          210  180  140

```

```

Dichte_kg/m3          500
SpezWKP_J/kgK        1600
WLF_W/mK             1      0.13
Permeabilitaet_m2    0
Feuchtespeicherfunktion
1      600.    3.0e5  0.4  15
DiffWid_dimlos___my25_my80_my100
1      180    25    10
Flleitzahl           1      0    600.    1.e-8  1.3    10

```

ENDE\_DER\_DATENBANK

Abb. 2: Auszug aus der Materialdatenbank

Die klimatischen Randbedingungen der Konstruktion – Innen- und Außenklima – sind, wie im folgenden Auszug der Text-Datei ersichtlich wird, durch Daten wie

- Zeit in Stunden
- Lufttemperatur in °C
- Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/m<sup>2</sup>K
- Strahlungstemperatur in °C
- Effektiver Emissionsgrad
- Solare Einstrahlung in W/m<sup>2</sup>
- Absorptionsgrad
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Feuchteübergangskoeffizient in kg/m<sup>2</sup> s Pa
- Saugspannung in Pa
- Druckdifferenz in Pa

definiert.

```

zeit(PeriodenEnde)_temp_alphaC_tempS_eps_rad_absG_phi_betaV_suc_qL_druck
1      22.07  3      22.07  0.9  0    0    0.502  2.50E-08  0    0
4.744
2      22.07  3      22.07  0.9  0    0    0.502  2.50E-08  0    0
4.606
3      22.07  3      22.07  0.9  0    0    0.502  2.50E-08  0    0
4.591
4      22.07  3      22.07  0.9  0    0    0.502  2.50E-08  0    0
4.637
5      22.07  3      22.07  0.9  0    0    0.502  2.50E-08  0    0
4.729

```

Abb. 3: Klimadatenauszug

Nachdem alle Randbedingungen definiert wurden, werden in der Input Text-Datei die numerisch zu lösenden Gleichungen wie Wärme-, Feuchte- und Lufttransport fixiert sowie die Laufzeit und dessen Ausgabeschritte und die hinterlegte Materialdatenbank

zugeordnet. Des Weiteren werden die Geometrie des Modells und die Gitterstruktur festgelegt und den Blöcken die jeweiligen Materialeigenschaften zugewiesen und deren Startbedingungen sowie die klimatischen Randbedingungen der Konstruktion festgesetzt. Abbildung 4 zeigt die zu Grunde gelegte Gitterstruktur schematisch für die untersuchten Konstruktionsvarianten.

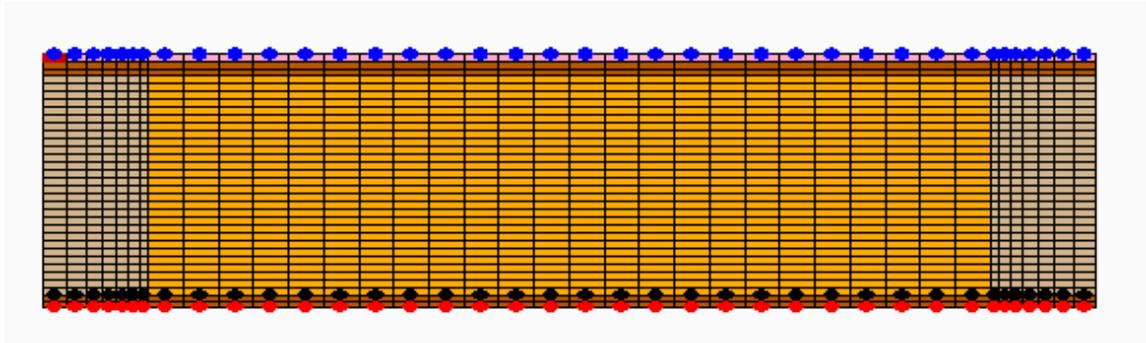


Abb. 4: schematische Modellstruktur der untersuchten Holzleichtbaukonstruktionen

Wie aus der Abbildung 4 ersichtlich wird, sind die klimatischen Randbedingungen sowie die Dampfbremse farblich in Form von Punkten markiert. Die blauen Punkte zeigen das anliegende Außenklima, die roten Punkte das anliegende Innenklima und die schwarzen Punkte die Markierung der Dampfbremse als Fläche ohne Höhe. Die Gittergröße wurde dahingehend optimiert, die Diskretisierung so fein wie notwendig und so grob als möglich zu gestalten, um die Simulationsdauer in Grenzen zu halten.

Weist die Konstruktion Leckagen auf, führt dies zu Luftströmungen in der Konstruktion. Diese werden in der vorliegenden Arbeit in unterschiedlichen Dimensionen, wie in Kapitel 4.2.3 erläutert, unterstellt, wobei eine Variante ohne Leckage und somit ohne Einbezug einer möglichen Konvektion als Vergleichsbasis herangezogen wird. Der Luftmassenstrom wird anhand einer Einlassöffnung sowie einer Auslassöffnung durch die bestimmten Zellen definiert. Für die Auswertung einzelner Zellen einer Konstruktion können eine Vielzahl von Recorderpositionen festgelegt werden, welche eine detailliertere Aussage für spezielle Details zulassen können.

Die Simulationsergebnisse werden wie die Eingabeparameter in Text-Dateien ausgegeben und beinhalten folgende Daten nach Zeitintervall:

- Wassermasse in kg je Block
- Gesamtwassermasse in kg für das definierte Bauteil

Für die Recorderpositionen werden

- Temperatur in °C
- Partialdruck in Pa
- Relative Luftfeuchtigkeit in %
- Wassergehalt der Zelle in kg/m<sup>3</sup>
- Kondensat in kg/m<sup>3</sup>

ausgegeben.

### **3.2 Ermittlung der Gebrauchsdauer**

Die Ermittlung der Gebrauchsdauer erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen einerseits nach dem Gesamtwassergehalt der Konstruktion und andererseits nach dem Wassergehalt einzelner Baustoffschichten. Bei der Betrachtung des Gesamtwassergehaltes wird bei den Konstruktionen mit Kiesschüttung der Wassergehalt der Schüttung nicht mit einbezogen, um eine bessere Vergleichsbasis zu schaffen. Des Weiteren werden einzelne Zellen des Modells betrachtet und deren hygrothermisches Verhalten im Jahresverlauf analysiert, um mögliche Schwachstellen der Konstruktion aufzuzeigen. Für kritische Stellen der Holzkonstruktion kann im Zuge dessen auch das Potential für Schimmelpilzwachstum aufgezeigt werden.

Da die Planung, jedoch auch die Ausführungsqualität einen erheblichen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion besitzen, wird bei der Ermittlung der Gebrauchsdauer der Konstruktionen nach drei Luftdichtheitsklassen kategorisiert.

Zur Quantifizierung der Gebrauchsdauer nach Jahren wird der zulässige Wassergehalt der Konstruktion jenem der hygrothermischen Simulation gegenübergestellt.

#### **3.2.1 Ermittlung der Gebrauchsdauer nach dem zulässigen Feuchtegehalt**

Mögliche Schwachstellen der betrachteten Flachdachkonstruktionen liegen aufgrund der Verwendung eines natürlichen Rohstoffes beim Baustoff Holz und den daraus hergestellten Holzwerkstoffen. Jener Rohstoff kann bei speziellen Bedingungen von Organismen abgebaut oder verändert und folglich in dessen Qualität beeinträchtigt werden. Gemäß ÖNORM EN 350-2 [EN94] Dauerhaftigkeit von Holz und

Holzprodukten wird Holz der Art *Picea abies* (Fichte) als wenig dauerhaft gegenüber Pilzen eingestuft.

Gemäß der Definitionen in der DIN 68800-1 [DIN11] beschreibt die Gebrauchsdauer jene Zeitspanne, während der die Leistungsmerkmale eines Produktes so beibehalten werden, dass für alle wesentlichen Eigenschaften eines Produktes die einzuhaltenden Mindestwerte erfüllt oder übererfüllt werden ohne dass höhere Kosten für Reparatur oder Auswechslung entstehen.

Aufgrund der unterschiedlichen Einbausituationen erfolgt eine Klassifikation von Holz in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen in Gebrauchsklassen GK. [DIN11]

GK 0 beschreibt die Gebrauchsklasse, in der das Befalls- und Schadensrisiko vermieden oder vernachlässigbar wird bzw. in der durch Maßnahmen nach DIN 68800-2 keine Notwendigkeit für Maßnahmen nach DIN 68800-3 zum Holzschutz zu Grunde gelegt sind. In der GK 0 darf die Einbaufeuchte der Hölzer nicht über 20 % liegen. In diesem Zusammenhang ist auch das zu erwartende Umgebungsklima der beabsichtigten Nutzung zu berücksichtigen, um unzuträgliches Quellen und Schwinden von Holz aber auch von Holzwerkstoffen zu vermeiden. [DIN12]

Im Gebrauchszustand ist auf die Vermeidung einer unzuträglichen Zunahme des Feuchtegehalts durch Kondensat aus Wasserdampfdiffusion oder Wasserdampfkonvektion zu achten. In dieser Hinsicht muss ein besonderes Augenmerk auf eine luftdichte Ausführung der Gebäudehülle gelegt werden, um Wasserdampfkonvektion zu unterbinden. Bei Anwendung des Glaser-Verfahrens ist zur Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags durch mögliche Leckagen und von Einbaufeuchtebedingungen eine zusätzliche rechnerische Trocknungsreserve  $\geq 250 \text{ g/m}^2\text{a}$  bei Dächern nachzuweisen oder anhand von numerischen Simulationsverfahren zu berücksichtigen. [DIN12]

Niemz [NIE93] beschreibt die höhere Anfälligkeit gegenüber Pilzen mit zunehmender Holzfeuchte, vor allem bei einer Holzfeuchte  $\geq 20\%$ . Carll und Wiedenhoeff [CAR09] sehen die maximal zulässige Holzfeuchte bei 20 Massenprozent M%. Jener Feuchtegehalt sollte im Sinne der Gebrauchstauglichkeit nicht überschritten werden.

Für die Beurteilung der Lebensdauer bzw. der Gebrauchsdauer wird folglich die zulässige Holzfeuchte der Konstruktionshölzer mit 20 M% festgelegt.

Die Verwendung von Holzwerkstoffen in Gebrauchsklasse GK 0 setzt voraus, dass diese nicht direkt bewittert und Feuchtegehalte wie in nachführender Abbildung aus

DIN 68800-2 nicht überschritten werden. Jene Feuchtegehalte stellen die Grundlage für die Ermittlung der Gebrauchsdauer dar.

Feuchtebeständigkeitsbereich nach DIN EN 13986	Zulässige Feuchte $u_{zul}$ der Holzwerkstoffe in der GK 0 %	Nutzungsstufe nach DIN EN 1995-1-1
Trockenbereich	15	1
Feuchtbereich	18 <sup>a</sup>	2
Außenbereich	21	3

<sup>a</sup> Eine vorübergehende Aufwechtlung auf bis zu 20 % beim rechnerischen Nachweis nach DIN EN 15026 kann toleriert werden, sofern diese innerhalb von 3 Monaten rücktroeknen kann.

Abb. 5: zulässige Materialfeuchten von Holzwerkstoffen [DIN12]

Der Feuchtebeständigkeitsbereich wurde aus der gleichnamigen Norm DIN 68800-2 nach dem untersuchten Anwendungsbereich als Feuchtbereich deklariert, wobei die obere Beplankung der betrachteten Konstruktionen einer zulässigen Holzwerkstofffeuchte von 18 % unterliegt. Im Feuchtbereich kann eine vorübergehende Aufwechtlung auf bis zu 20 % toleriert werden, sofern ein rechnerischer Nachweis der Rücktroeknung innerhalb von drei Monaten geführt wird. [DIN12]

Die mineralische Vollsparrendämmung wird für den zulässigen Grenzwert des Gesamtwassergehalts aufgrund der marginalen Sorptivität außer Acht gelassen.

### 3.2.2 Abschätzung des Schimmelpilzrisikos unter den sich einstellenden Bedingungen

Um die Möglichkeit eines Schimmelpilzbefalls in Bauteilen abschätzen zu können, müssen deren Wachstumsvoraussetzungen gegeben sein. Zu den Einflussfaktoren der Lebensbedingungen zählen unter anderem die Temperatur kombiniert mit der Feuchtigkeit, das Substrat und die Zeit. [SED01]

Für den Wachstums- und Entwicklungsprozess von Mikroorganismen ist infolge der Beteiligung einer Vielzahl biochemischer Reaktionen die Temperatur ein wichtiger Indikator. Pilzwachstum ist ab einer Temperatur von 0 °C bis zu einem Optimum von meist über 30 °C bekannt. Somit kann festgehalten werden, dass sich im Bauteilinneren sowie auf Innenoberflächen von Baukonstruktionen keine letalen Bedingungen hinsichtlich der Temperatur einstellen. In Abhängigkeit der Pilzart zeigt sich jeweils ein unterschiedliches Temperaturoptimum, wonach die Biomasseproduktion infolge des davon abhängigen Metabolismus gesteuert wird. Schimmelpilze reagieren toleranter auf Kältestress als auf Hitzestress. Hitze schränkt die Biosynthese stark ein, wobei diese bei der Denaturierung von Enzymproteinen

vollständig erliegt. Eine weitere essentielle Umgebungsbedingung ist die verfügbare Feuchte, wobei festgehalten werden muss, dass der Pilz sowohl Feuchtigkeit aus der Luft als auch aus dem Substrat aufnehmen kann. Wie bei allen Indikatoren für Pilzwachstum sind die optimalen Bereiche von der Pilzspezies abhängig. Nach dem Parameter Feuchte erfolgt eine Grobklassifikation in xerophile, mesophile und hydrophile Pilze. Die Wachstumsgrenze von Pilzspezies, welche in Gebäuden vorkommen, liegt bei ca. 70 % relativer Luftfeuchtigkeit. Bei 80 % relativer Luftfeuchte ist die Bedingung bereits für fast alle Pilzarten gegeben. Temperatur und Feuchte stehen in Wechselbeziehung. Das Minimum sowie das Optimum des Feuchtebereichs können sich infolge der vorherrschenden Temperaturen verschieben. Werden beide Wachstumsparameter zugleich betrachtet und in einem Diagramm dargestellt, zeigen sich Linien gleichen Wachstums (Isoplethen). [SED01]

Das zur Verfügung stehende Substrat ist neben der Temperatur und der Feuchte die wichtigste Einflussgröße für das Wachstum von Schimmelpilzen. Da die in der Literatur festgeschriebenen Temperatur- und Feuchtebereiche vorwiegend auf Laboruntersuchungen basieren, können diese in der Praxis abweichen. In Abhängigkeit vom Substrat, wie beispielsweise dem Baustoff oder Verschmutzungen, liegen dem Pilz im Vergleich zum Vollmedium geringere Mengen bzw. schwerer abbaubare Nährstoffe vor. Es können jedoch bereits geringe organische Zusätze in mineralischen Baustoffen mikrobielles Wachstum zulassen. Je nach Baustoff konnten unterschiedliche Expositionszeiten für das Erreichen eines bestimmten Mould Index, wie Abbildung 6 zeigt, beobachtet werden. [SED01]

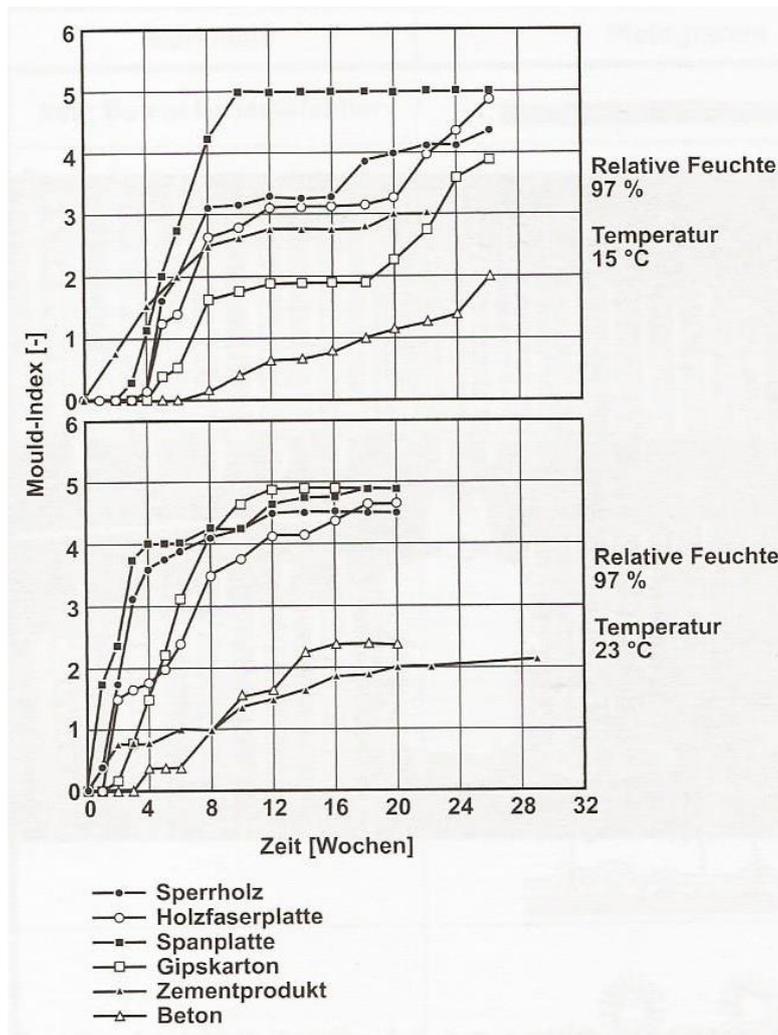


Abb. 6: Zeitverlauf des gemessenen Mould-Index in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Baumaterialien bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 97 % [SED01 nach RIT00]

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor für das Pilzwachstum ist die Zeit. Im Bauwesen ist es maßgeblich zu quantifizieren, wie lange und häufig Temperatur- und Feuchtezustände auf ein Bauteil wirken, bevor Schimmelpilzwachstum einsetzt. Es wurde festgestellt, dass in Abhängigkeit der hygrothermischen Randbedingungen und den materialspezifischen Parametern unterschiedliche Zeitspannen für die Entwicklung von Schimmelpilzen vorliegen. [SED01]

Für die Vorhersage von Schimmelpilzbildung existiert eine Vielzahl von Modellen. In der vorliegenden Arbeit wird das Potential für Pilzwachstum in Baukonstruktionen mit Hilfe des Modells von Viitanen et al. [VII11] abgeschätzt und quantifiziert. Grundsätzlich basiert deren Beschreibung von Schimmelpilzwachstum auf Laboruntersuchungen. Das ursprüngliche Modell basierte auf einer großen Laborstudie mit Kiefersplintholz durch VIITANEN und RITSCHKOFF 1989. Im Laufe der Zeit

wurden anstelle von stationären Bedingungen variierende und fluktuierende Feuchtebedingungen durch HUKKA und VIITANEN 1999 mit einbezogen. [VII11]

Das VTT (Technical Research Centre of Finland, Forest Products Laboratory) Modell ist ein empirisches Vorhersagemodell für Schimmelwachstum und beruht auf einer Regressionsanalyse von Datensätzen aus Messserien. Die Schimmelentwicklung im Zeitverlauf wird mit Hilfe des Mould Index, welcher von null bis sechs reichen kann, beschrieben. [VER11] [VII11] Tabelle 1 zeigt die verbale Charakterisierung des Mould Index.

Tab. 1: Mould Index in Abhängigkeit der prozentuellen Flächenbedeckung und verbale Beschreibung [VII11]

<b>Mould Index</b>	<b>Verbale Charakterisierung</b>
0	kein Wachstum
1	geringes Wachstum an der Oberfläche (mikroskopisch), beginnendes lokales Wachstum
2	einige lokale Schimmelpilzansiedelungen an der Oberfläche (mikroskopisch)
3	visuell sichtbarer Schimmel an der Holzoberfläche, Bedeckungsgrad <10% oder <50% Schimmel-Bedeckungsgrad (mikroskopisch)
4	visuell sichtbarer Schimmel an der Oberfläche, Bedeckungsgrad 10-50% oder >50% Schimmel-Bedeckungsgrad (mikroskopisch)
5	reichlicher Schimmelbewuchs an der Oberfläche, >50% visuell sichtbarer Bewuchs
6	dichter Bewuchs von Schimmelpilzen, Bedeckungsgrad bis zu 100%

Gleichung (1) beschreibt das Pilzwachstum gemäß HUKKA und VIITANEN 1999. [VII11]

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)} k_1 k_2 \quad (1)$$

T Temperatur in °C

RH relative Luftfeuchtigkeit in %

W Holzart (0=Kiefer; 1=Fichte)

SQ Oberflächenqualität (0=sägerauh; 1=darrtrocken)

$k_1$  beschreibt die Wachstumsintensität und  $k_2$  das Nachlassen der Intensität nach Erreichen des Peaks im Bereich von Mould Index 4-6.

Für die Beschreibung der Sensitivität von Materialien auf Schimmelpilzwachstum wurde eine Klassifizierung in vier Stufen, wie Abbildung 7 zeigt, vorgenommen. Für die untersuchten Konstruktionen wurde für das Konstruktionsholz die Sensitivitätsklasse sehr sensibel und für die Holzwerkstoffbeplankung sensibel unterstellt.

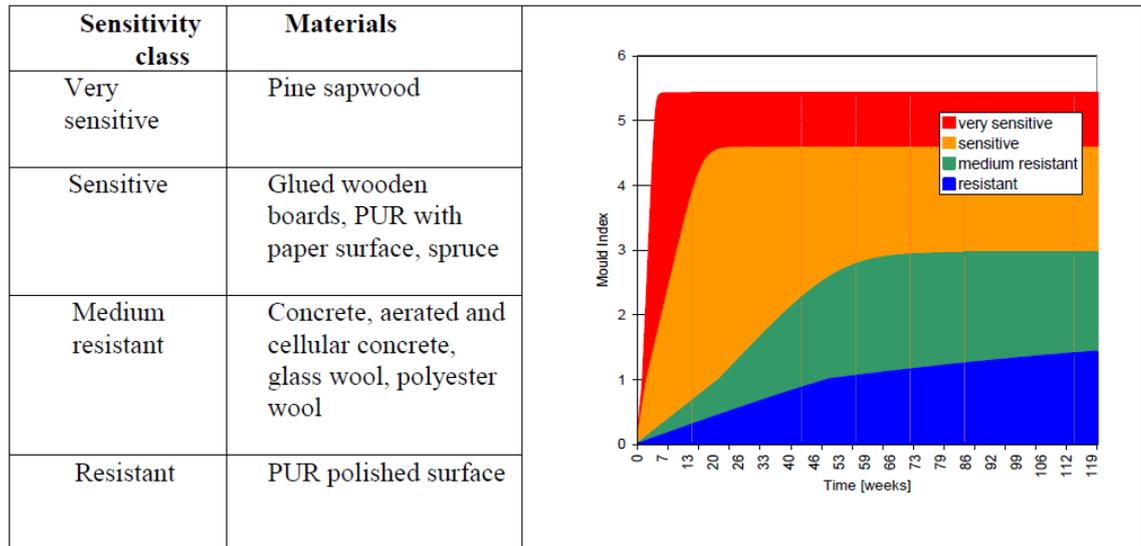


Abb. 7: Sensitivität auf Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit des Materials. Illustration der Vorhersage von Schimmelpilzwachstum nach Sensitivitätsklasse in Abhängigkeit der Zeit unter konstanten Bedingungen von 97 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 22 °C. [VII11]

Die Restriktion auf ein Maximum bzw. die Limitierung des Schimmelpilzwachstums auf ein realistisches Maß erfolgt in Abhängigkeit der Sensitivitätsstufe in Form der Gleichung (2). [VII11]

$$M_{\max} = A + B \cdot \frac{RH_{\text{crit}} - RH}{RH_{\text{crit}} - 100} - C \cdot \left( \frac{RH_{\text{crit}} - RH}{RH_{\text{crit}} - 100} \right)^2 \quad (2)$$

Jenes Maximum beeinflusst den Faktor  $k_2$ , welcher das Schimmelpilzwachstumsverhalten ab einem Mould Index von 4-6 beschreibt. Die Koeffizienten A, B und C sind vom verwendeten Material abhängig.

Tab. 2: Parameter nach Sensitivitätsklasse [VII11]

Sensitivitätsklasse	M<1	M≥1	k <sub>2</sub> (M <sub>max</sub> )			RH <sub>min</sub> %
			A	B	C	
sehr sensibel	1	2	1	7	2	80
sensibel	0.578	0.386	0.3	6	1	80
mittelmäßig resistent	0.072	0.097	0	5	1.5	85
resistent	0.033	0.014	0	3	1	85

In der Tabelle 2 sind die Werte für die Wachstumsintensität zur Ermittlung des Faktors  $k_1$ , die Koeffizienten für das Wachstumsmaximum und folglich der Ermittlung des Faktors  $k_2$  sowie das notwendige Minimum an relativer Luftfeuchtigkeit für die Wachstumsbedingungen abhängig von der Baustoffart angeführt.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels beschrieben, sind für das Wachstum spezielle Lebensbedingungen vorausgesetzt. Sind jene Bedingungen nicht vorhanden, wird die Wachstumsaktivität eingestellt. Abbildung 8 zeigt die Bedingungen für Pilzwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit und grenzt anhand der kritischen relativen Luftfeuchtekurve jene Umgebungsbedingungen für das Fernbleiben von Schimmelpilzen bzw. das Einstellen von Schimmelpilzaktivität ab.

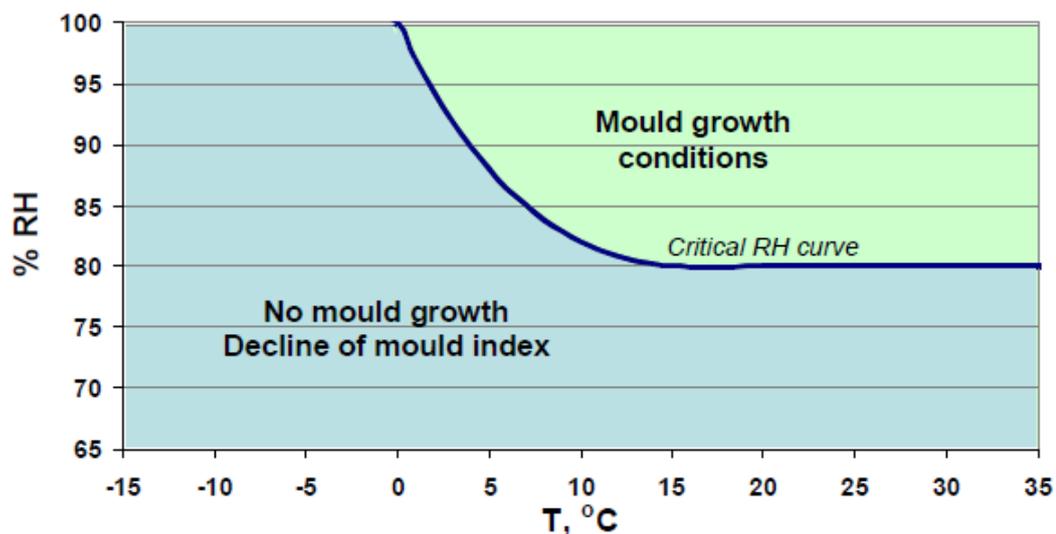


Abb. 8: Darstellung der Wachstumsbedingungen anhand der Parameter relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur [VII11]

Die Verringerung der Schimmelpilzaktivität an der Holzoberfläche wurde anhand von zyklischen Wechselbedingungen der Feuchtezustände modelliert und wie folgt definiert:

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.00133, & \text{wenn } t - t_1 \leq 6h \\ 0, & \text{wenn } 6h \leq t - t_1 \leq 24h \\ -0.000667, & \text{wenn } t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (3)$$

Jene Gleichung (3) beschreibt die Abnahme des Mould Index in Abhängigkeit der Zeit, wobei  $t - t_1$  (in Stunden) die Zeitspanne ungünstiger Lebensbedingungen kennzeichnet. [VII11] Dieses Modell wurde jedoch ausschließlich anhand einer kleinen Stichprobe modelliert und beinhaltet keine Vorhersagemöglichkeit bei Einwirkung von Temperaturen unter 0 °C und deren längerfristige Umstände über einen Zeitraum von 14 Tagen. [VER11] Unter langfristigen saisonalen Feuchteschwankungen kann der

Mould Index in anderem Ausmaß, verglichen mit oben angeführter Gleichung (3), beeinflusst werden. [VII11]

Das Wachstum von Schimmelpilzen kennzeichnet die ersten Schritte einer möglichen biologischen Zersetzung infolge zu hoher Feuchte. Schimmelpilze an sich schädigen den Baustoff nicht primär, weisen jedoch als Indikator für das hygrothermische Verhalten von Bauteilen auf Feuchteprobleme und das Risiko folgenschwerer Schäden wie dem Abbau des Holzes als Tragstruktur hin. [VII11]

Um den Einfluss auf die Gebrauchsdauer der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten abzuschätzen, werden die aus den hygrothermischen Simulationen gewonnenen Stundenwerte zu Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an differenten Recorderpositionen für die Berechnung des Mould Index herangezogen.

### **3.3 Ermittlung der gegenwärtigen Kosten auf Grundlage der Gebrauchsdauer mittels Barwertmethode**

Die Kosten zur Errichtung der Dachfläche werden gemäß ÖNORM B 8101-1 [ONO09] als Bauwerkskosten definiert. Diese beinhalten nach Baugliederung Kosten zu Bauwerk-Rohbau, Bauwerk-Technik und Bauwerk-Ausbau. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Errichtungskosten nicht gemäß [ONO09] definiert, die Errichtungskosten gelten für diesen Fall als Synonym für die Bauwerkskosten.

Zur Ermittlung der Errichtungskosten wurde eine Ausschreibung, welche im Anhang angeführt wird, zu den untersuchten hölzernen Flachdachkonstruktionen erstellt. Diese beinhaltet eine Projektvisualisierung und –beschreibung sowie die detaillierten Aufbauvarianten. Neben der Kostenschätzung der Errichtung wurden eine Schätzung der Wartungskosten und der Instandhaltungskosten angeführt. Die Ausschreibungsunterlagen wurden an eine Vielzahl von Holzbauunternehmen versendet, wobei sieben Exemplare für die Auswertung eingeholt werden konnten. Die Quantifizierung der Errichtungskosten basiert auf dem Aufbautenkatalog gemäß Kapitel 4.1. Die Errichtungskosten werden jeweils in Form des Mittelwertes mit Standardabweichung aus den sieben zur Verfügung gestellten Ausschreibungen errechnet.

Da nicht ausschließlich die Errichtungskosten bei Betrachtung der Lebensdauer der Dachkonstruktion von Belangen sind, wurden bei der Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen die zur Verfügung gestellten Errichtungskosten der betreffenden Konstruktion bzw. jener einzelnen Baustoffe für die gegenwärtige finanzielle Bewertung herangezogen.

Der Einbezug der monetären Auswirkungen einer Sanierung der gesamten Konstruktion bzw. der betroffenen Bauteile erfolgt nach dem Einbüßen der Gebrauchstauglichkeit der jeweiligen Dachkonstruktion bzw. der Bauteilschichten vor dem Erreichen der Lebensdauer von 50 Jahren.

Für die ökonomische Gesamtbewertung der Kosten aus Sicht des Kunden wurde die Barwertmethode gewählt. Der Barwert stellt den gegenwärtigen Wert einer Zahlung, welche erst zukünftig getätigt wird, dar. Die Formel für die Barwertberechnung zeigt Gleichung (4). [GEY06]

$$K_0 = \frac{K_N}{(1+i)^N} \quad (4)$$

$K_0$  Barwert in €/m<sup>2</sup>

$K_N$  Zeitwert in €/m<sup>2</sup>

$(1+i)^{-N}$  Abzinsungsfaktor

$i$  Zinssatz

$N$  in Jahren

Muss ein Bauteil bzw. die Konstruktion innerhalb der definierten Lebensdauer von 50 Jahren mehr als einmal saniert werden, so sind die zum Zeitpunkt der Gebrauchsuntauglichkeit anfallenden Kosten aufzusummieren, wie Gleichung (5) darstellt.

$$K_{Ges} = K_{BWK} + \sum \frac{K_N}{(1+i)^N} \quad (5)$$

$K_{Ges}$  Summe aller anfallenden Kosten mit Einbezug eventuell notwendiger Sanierungsmaßnahmen innerhalb der definierten Lebensdauer von 50 Jahren

$K_{BWK}$  Errichtungskosten/ Bauwerkskosten

Um eine Vergleichbarkeit aller Konstruktionsvarianten zu ermöglichen, werden zu den getätigten Errichtungskosten (Bauwerkskosten) die zusätzlich anfallenden Sanierungskosten auf den Zeitpunkt Null abgezinst. Somit werden Gesamtkosten gleicher Basis geschaffen. Mit Hilfe der Barwertmethode soll aufgezeigt werden, welche Konstruktionsvariante im Hinblick auf dessen Gebrauchsdauer als Kostengünstigste gefiltert werden kann. Da die Annahmen der Randbedingungen der durchgeführten hygrothermischen Simulationen nicht alle möglichen unterschiedlichen

Situationen abdecken können, soll durch diese Arbeit lediglich eine Entscheidungshilfe für den Konsumenten entstehen.



## KONSTRUKTIVARIANTE 1: FLACHDACH – HOLZRAHMENBAU, NICHT HINTERLÜFTET

Variationen dieser Variante in puncto:

- innenliegender Dampfbremse (feuchteadaptive Dampfbremse/ konventionelle Dampfbremse  $s_d=100m$ )
- Dachabschluss nach oben hin (EPDM-Folie/ Kiesschüttung)

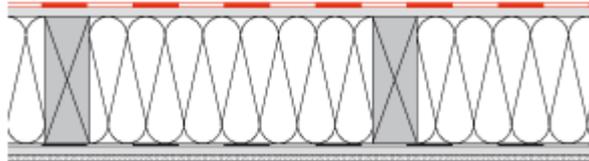


Abb. 9: nicht durchlüftetes Flachdach mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion [DAT15]

Tab. 4: Aufbau FD01 und FD05 – Foliendach ohne Auflast

Schicht Nr.	FD01		FD05	
	Bezeichnung	d in mm	Bezeichnung	d in mm
6	EPDM schwarz	1,5	EPDM schwarz	1,5
5	OSB/3	18	OSB/3	18
4	Mineralwolle	2x140	Mineralwolle	2x140
3	KVH-Fichte	100x280	KVH-Fichte	100x280
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4m$ ]	0,23	PE100	0,2
1	MDF	15	MDF	15

Tab. 5: Aufbau FD02 und FD06 – Flachdach mit Auflast

Schicht Nr.	FD02		FD06	
	Bezeichnung	d in mm	Bezeichnung	d in mm
7	Schüttung Kies	50	Schüttung Kies	50
6	EPDM schwarz	1,5	EPDM schwarz	1,5
5	OSB/3	18	OSB/3	18
4	Mineralwolle	2x140	Mineralwolle	2x140
3	KVH-Fichte	100x280	KVH-Fichte	100x280
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4m$ ]	0,23	PE100	0,2
1	MDF	15	MDF	15



KONSTRUKTIONSVARIANTE 3: FLACHDACH – HOLZRAHMENBAU, HINTERLÜFTETE KONSTRUKTION

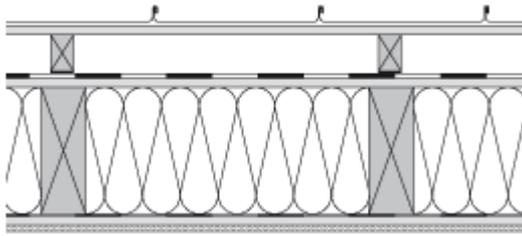


Abb. 11: durchlüftetes Flachdach mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion [DAT15]

Tab. 8: Aufbau FD10 – Kaltdach

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm
9	Blecheindeckung	
8	Dachschalung	
7	Hinterlüftung mit Nageldichtband	
6	diffusionsoffene Unterspannbahn (erhöht regensicher)	0,72
5	(OSB/3) DHF	15
4	Mineralwolle	2x140
3	KVH-Fichte	100x280
2	PE100	0,2
1	OSB/3 verklebt	15

#### 4.1.2 Holzmassivbau

Im Rahmen der Holzmassivaufbauten wurde eine durchlüftete Konstruktion sowie nicht durchlüftete Konstruktionen mit und ohne Auflast betrachtet.

KONSTRUKTIONSVARIANTE 4: FLACHDACH – HOLZMASSIVBAU, HINTERLÜFTET

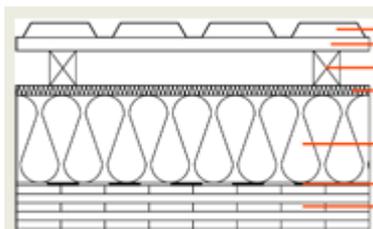


Abb. 12: durchlüftetes Flachdach – Massivholzbau [DAT15]

Tab. 9: Aufbau FD11 – Kaltdach Holzmassiv

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm
7	Blecheindeckung	
6	Holz Fi Lattung	(30)50
5	Holz Fi Konterlattung	80
4	diffusionsoffene Unterspannbahn [ $s_d=0,02m$ ]	0,72
3	Aufsparren-Dämmplatte	200
2	Abdichtungsbahn $s_d \geq 500m$	
1	Brettsperrholz NSI	100

## KONSTRUKTIONSVARIANTE 5: FLACHDACH – HOLZMASSIVBAU, NICHT HINTERLÜFTET

Variation dieser Variante in puncto:

- Dachabschluss nach oben hin (Kiesschüttung/ EPDM-Folie)

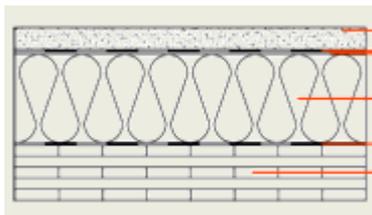


Abb. 13: nicht durchlüftetes Flachdach – Massivholzbau [DAT15]

Tab. 10: Aufbau FD12 und FD13 – Holzmassivbau, nicht durchlüftet

Schicht Nr.	FD12		FD13	
	Bezeichnung	d in mm	Bezeichnung	d in mm
6	Schüttung Kies	50		
5	Trennvlies			
4	EPDM schwarz	1,5	EPDM schwarz	1,5
3	Steinwolle MW-PT (2*100)	200	Steinwolle MW-PT (2*100)	200
2	Abdichtungsbahn $s_d \geq 500m$ (z.B.Bitumen)		Abdichtungsbahn $s_d \geq 500m$ (z.B.Bitumen)	
1	Brettsperrholz	125	Brettsperrholz	125

## 4.2 Grundlagen zu den hygrothermischen Simulationen - Einflussfaktoren

### 4.2.1 Materialparameter

#### 4.2.1.1 Holz

Holz ist ein natürlicher Stoff, welcher kein homogenes Gefüge aufweist. Es ist ein kapillarporöser Stoff, der durch den hohen Porenanteil eine sehr große innere Oberfläche besitzt. Holz kann aufgrund der Porosität Wasser aus der Luft und flüssiges Wasser durch kapillare Transportprozesse aufnehmen. Je nach Wasseranteil wird in folgende drei Grenzzustände eingeteilt:

- Darrtrockener Zustand (Holzfeuchte 0 %)
- Fasersättigungsbereich (Mikrosystem mit Wasser gesättigt)
- Wassersättigung (Mikro- und Makrosystem mit Wasser gesättigt)

Der Fasersättigungsbereich beschreibt den durch Sorption maximal möglichen gebundenen Wasseranteil, der bei wasserdampfgesättigter Umgebungsluft erreicht wird. Dieser ist abhängig von der Holzart und liegt im Durchschnitt bei 28 %. Unterhalb des Fasersättigungsbereiches sind großteils Diffusionsprozesse für den Feuchtetransport verantwortlich. Die Grundlage für die molekularen Bewegungsvorgänge ist ein Teildruck- bzw. ein Konzentrationsgefälle, wobei diese infolge von Feuchte-, Feuchtekonzentrations- oder Dampfdruckunterschieden initiiert werden. Eine Kenngröße für die Diffusion stellt die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  dar, welche durch die Holzfeuchte und die Dichte des Holzes bedingt ist. Der Diffusionswiderstand steigt mit abnehmender Feuchte und zunehmender Dichte. Für die als Baustoff in Hochbaukonstruktionen betrachteten Bedingungen sind das Mikrosystem des Holzes und dessen hygroskopische Eigenschaften von Bedeutung. [NIE93] [WAG08]

Das hygroskopische Verhalten infolge von Sorption wird durch die Wasseraufnahme aus der Luft, der Adsorption und der Desorption an die Luft gekennzeichnet, wobei sich zwischen Adsorption und Desorption ein Hysterese-Effekt einstellt. [NIE93] Abbildung 14 zeigt die Sorptionsisothermen von Holz.

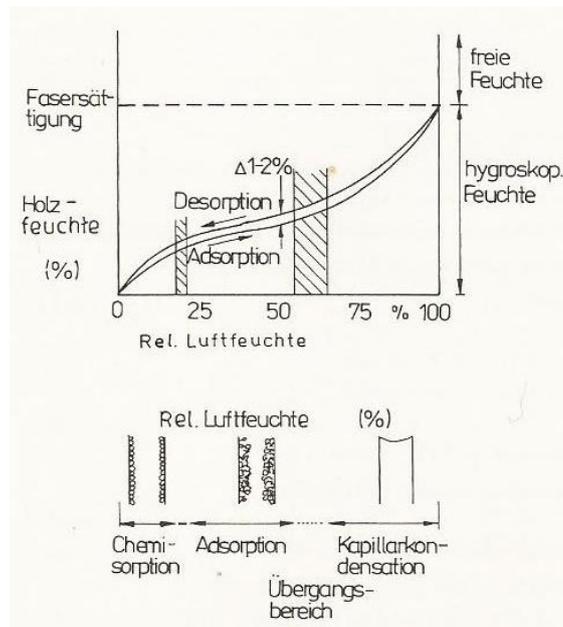


Abb. 14: Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers [NIE93]

Die Sorptionsisothermen zeigen einen typischen S-förmigen Verlauf und spiegeln die Abhängigkeit der Holzfeuchte von der relativen Luftfeuchtigkeit. Aufgrund der Umgebungsbedingungen, wie relativer Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck stellt sich ein Ausgleichsfeuchtegehalt ein. [NIE93]

Das Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen unterscheidet sich im Vergleich zu Vollholz durch die thermische Behandlung des Holzes bei der Weiterverarbeitung sowie der Zugabe von Kleb- und Zusatzstoffen, welche die Feuchteaufnahme beeinflussen. Bei Betrachtung des Bereiches der Kapillarkondensation bei einer relativen Luftfeuchtigkeit ab ca. 65 % zeigt sich ein unterschiedliches Sorptionsverhalten verschiedener Holzwerkstoffe, wie Abbildung 15 veranschaulicht. [WAG08]

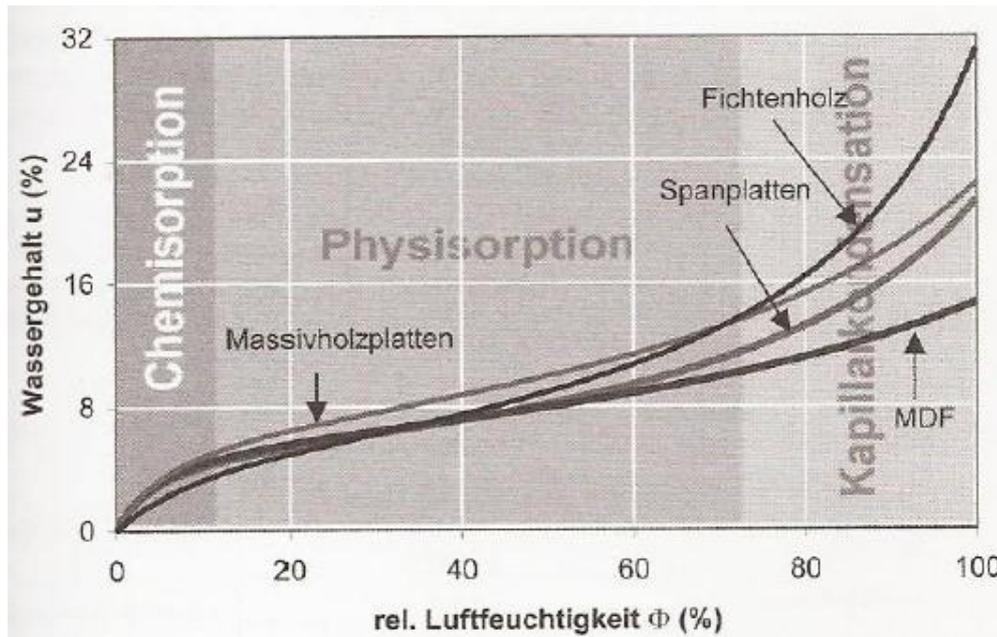


Abb. 15: Sorptionsverhalten von HF-gebundenen Spanplatten, MDF, Massivholzplatten aus Fichte und Fichten-Vollholz bei 20 °C [WAG08]

Der Feuchtebereich bis zur Fasersättigung ist aufgrund des hygroskopischen Verhaltens von Dimensionsänderungen geprägt und charakterisiert sich durch das Quellen infolge der Ausdehnung der Zellwand bei Feuchtaufnahme und das Schwinden aufgrund der Volumenkontraktion bei Feuchteabgabe. [NIE93] [WAG08] Aufgrund des Quell- und Schwindverhaltens bei Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit muss der Feuchtegehalt des eingebauten Holzes auf den zu erwartenden Gleichgewichtsfeuchtegehalt abgestimmt und bei großflächigen Holzkonstruktionen Dehnungsfugen einkalkuliert werden. [NIE93] Abbildung 16 zeigt die erforderliche Holzfeuchte von Holz und Holzwerkstoffen für Bauzwecke.

Material	Holzfeuchte in %
Sperrholz	5 ... 15
Flachpressspanplatten	9 ± 4
Strangpressplatten	9 ± 4
Hartfaserplatten	5 ± 3
MDF	9 ± 4
Fichte (bei 20 °C/65 % rel. L.)	12
Brettschichtholz (Feuchte ab Werk)	10 ± 2

Abb. 16: Holzfeuchte von Holzwerkstoffen und Holz für Bauzwecke [WAG08]

Bei Holzwerkstoffen kann es bei Feuchteeinwirkung zu einer erheblichen Dickenquellung kommen. Abwechselndes Quellen und Schwinden kann besonders bei

harnstoffharzverleimten Spanplatten eine Zerstörung der relativ spröden Klebfugen verursachen. Wie bei der Verwendung von Vollholz muss auch bei großflächigen Plattenelementen die Flächenquellung beachtet und Dehnfugen eingeplant werden. [NIE93]

Die sich nach den Umgebungsbedingungen einstellende Holzfeuchte hat einen maßgeblichen Einfluss auf alle Eigenschaften des Holzes. Mit Zunahme der Holzfeuchte folgen unter anderem eine Minderung der Festigkeit, die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und die Anfälligkeit gegenüber holzerstörenden Organismen insbesondere bei Feuchtegehalten  $u \geq 20\%$ . [NIE93] [WAG08]

#### 4.2.1.2 Dampfbremsen und Dachabdichtung

Hinsichtlich der innenliegenden Dampfbremse wurden einerseits Varianten mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse und andererseits mit einer konventionellen Dampfbremse aus Polyethylen mit einem konstanten  $s_d$ -Wert von 100 m untersucht. Der feuchteadaptive Dampfdiffusionswiderstand ist von der umgebenden relativen Luftfeuchtigkeit abhängig und ermöglicht eine bremsende Wirkung im Winter bei geringen relativen Luftfeuchten im Innenraum und eine diffusionsoffene Wirkweise im Sommer. Die Diffusionsoffenheit in den Sommermonaten schafft Bedingungen für eine Umkehrdiffusion, wodurch eine Rücktrocknung nach innen ermöglicht wird.

Abbildung 17 zeigt den von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängigen Wasserdampfdiffusionswiderstand der feuchteadaptiven Dampfbremse.

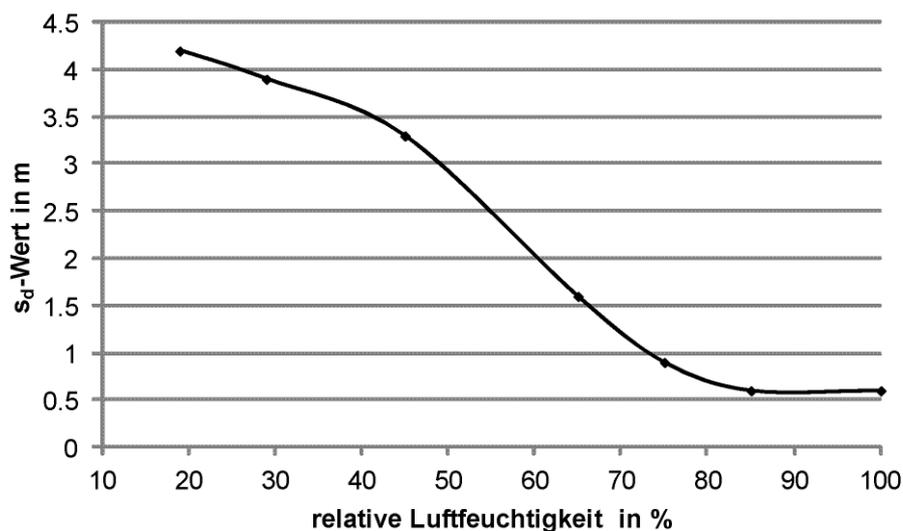


Abb. 17: Wasserdampfdiffusionswiderstand der feuchtevariablen Dampfbremse pro clima DB+

Für die Dachabdichtung wurde eine EPDM-Folie gewählt. EPDM steht für Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer und ist ein synthetischer Kautschuk. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand  $s_d$  liegt bei  $\sim 90 \text{ m}$ .

#### 4.2.2 Klimatische Randbedingungen

##### 4.2.2.1 **Innenklima**

In Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 13788 [ISO02] wurde das Innenklima bzw. die Feuchtebelastung im Innenraum definiert. Die raumseitigen Randbedingungen werden im informativen Anhang der Norm in fünf Luftfeuchteklassen eingeteilt. In der Normenausgabe von 2002 liegen in der Luftfeuchteklasse 3 Wohnhäuser mit geringer Belegung und in Klasse 4 unter anderem Wohnhäuser mit hoher Belegung. Aus den Untersuchungen von Zingerle [ZIN13] geht hervor, dass bei Wohnbauten mit geringem Innenvolumen messtechnisch sehr hohe Feuchtebelastungen erfasst wurden. Infolge der Anforderungen an die Luftdichtheit von Neubauten nimmt das Nutzerverhalten der Bewohner bzw. deren Lüftungsverhalten einen deutlichen Einfluss auf die Feuchtelasten im Innenraum. Da das Nutzerverhalten nicht durch Regeln definiert werden kann, wurde für die hygrothermischen Simulationen ein konservativer Ansatz gewählt und das Innenraumklima als Sinusfunktion zwischen den Grenzwerten von 22 °C und 26 °C Innenraumtemperatur und zwischen 50 % und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit herangezogen. Jenes Innenraumklima ergibt, in Verbindung mit dem in Kapitel 4.2.2.2 definierten Außenklima, Bedingungen für die Luftfeuchteklasse 4 gemäß [ISO02]. Im Vergleich dazu sind die Luftfeuchteklassen in der Neuauflage der ÖNORM EN ISO 13788 [ISO13] in Bezug auf die Gebäudezuordnung geändert worden. Für Wohngebäude wird ausschließlich die Luftfeuchteklasse 3 (Wohnhäuser mit unbekannter Belegung) als Anhaltswert vorgegeben.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Klassifizierung in Anlehnung an die [ISO02] als Ansatz mit Sicherheit herangezogen und das Innenraumklima mit hoher Belegung nach den aus den Untersuchungen gewonnenen Messergebnissen aus [ZIN13] für die hygrothermischen Simulationen eingesetzt.

In Abbildung 18 wird das Innenraumklima mit dessen Temperaturverlauf sowie der relativen Luftfeuchtigkeit im Jahreszyklus aufgezeigt.

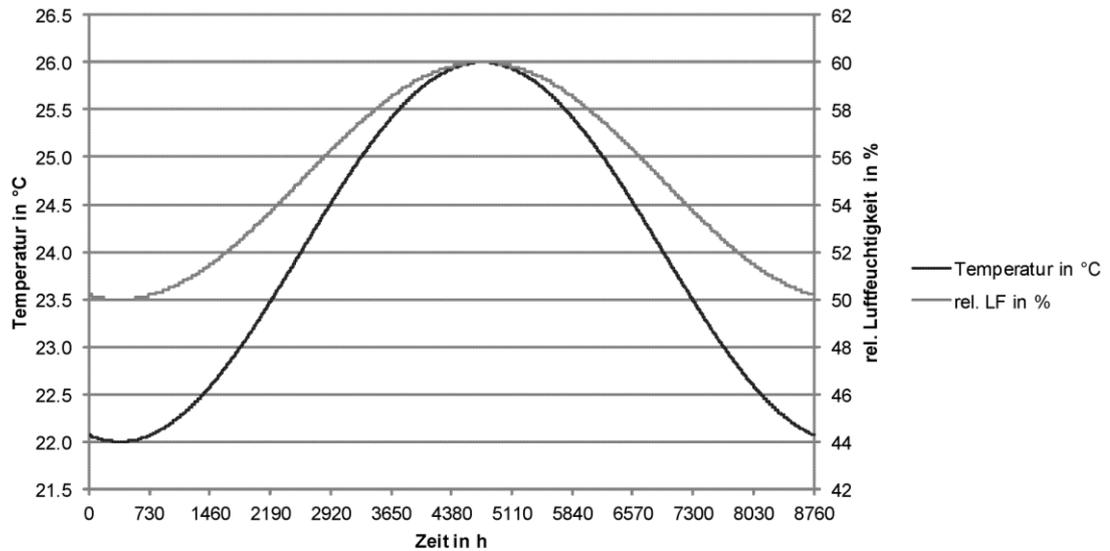


Abb. 18: Innenraumklima im Jahreszyklus

#### 4.2.2.2 Außenklima

Da die Untersuchungen an keinen bestimmten Standort gebunden sind und die Ergebnisse allgemein für Österreich gültig sein sollen, wurde gemäß ÖNORM B8110-2 [ONO03] das Klagenfurter Klima herangezogen.

Zur Veranschaulichung der Klimadaten zeigen die folgenden Abbildungen den Temperaturverlauf und die relative Luftfeuchtigkeit im Jahresverlauf.

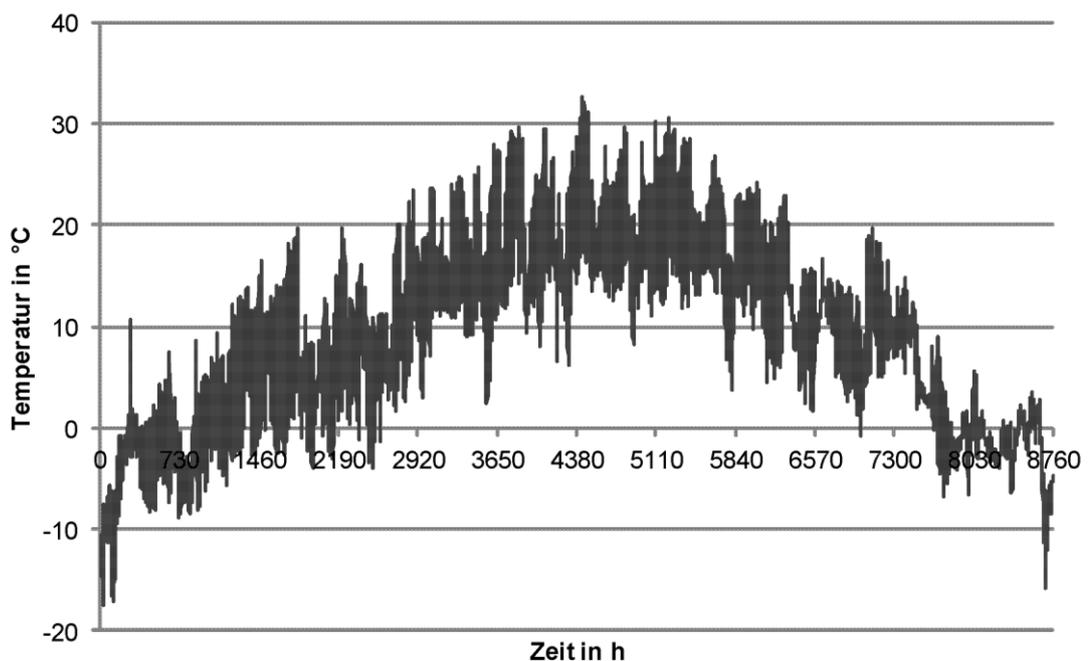


Abb. 19: Außentemperatur im Jahresverlauf

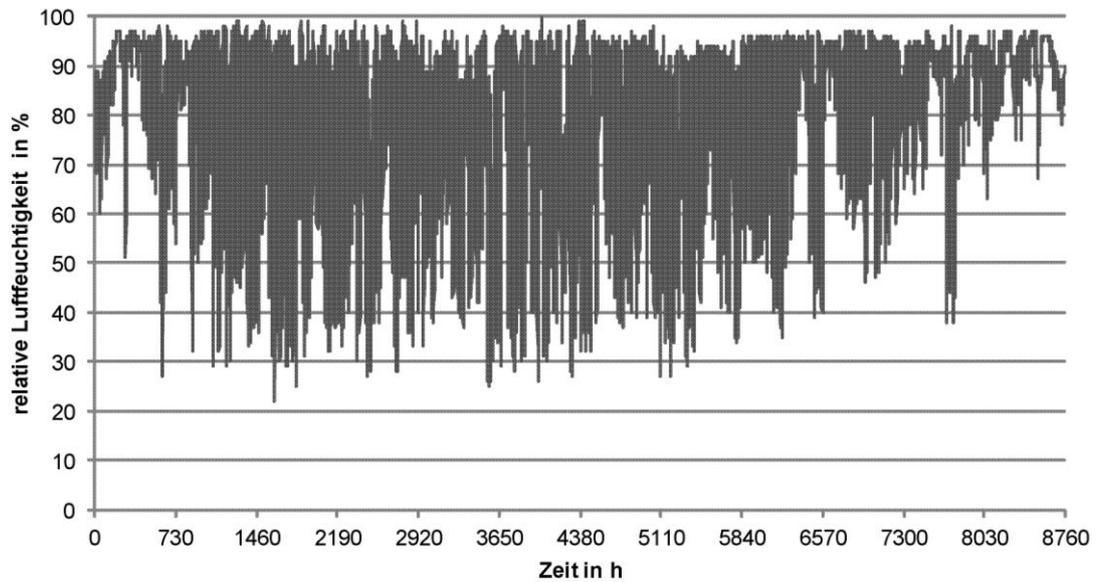


Abb. 20: Relative Luftfeuchtigkeit des Außenklimas im Jahresverlauf

#### 4.2.2.3 Feuchteklassen nach [ISO02]

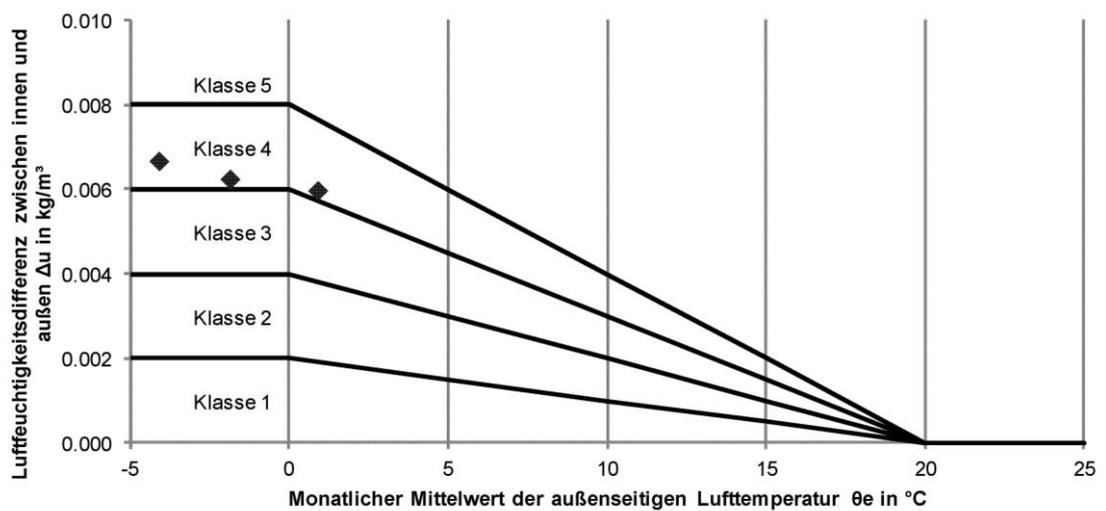


Abb. 21: Absolute Luftfeuchtigkeit im Innenraum im Dezember, Januar und Februar bei Anwendung des in Abbildung 18 dargestellten Innenklimas und des Außenklimas nach Kapitel 4.2.2.2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788 [ISO02]

Wie bereits in Kapitel 4.2.2.1 beschrieben, wurden die Parameter für die Feuchtklasse 4 nach ÖNORM EN ISO 13788 [ISO02] für die Feuchtelast im Innenraum gewählt.

#### 4.2.2.4 Strahlung und Absorption

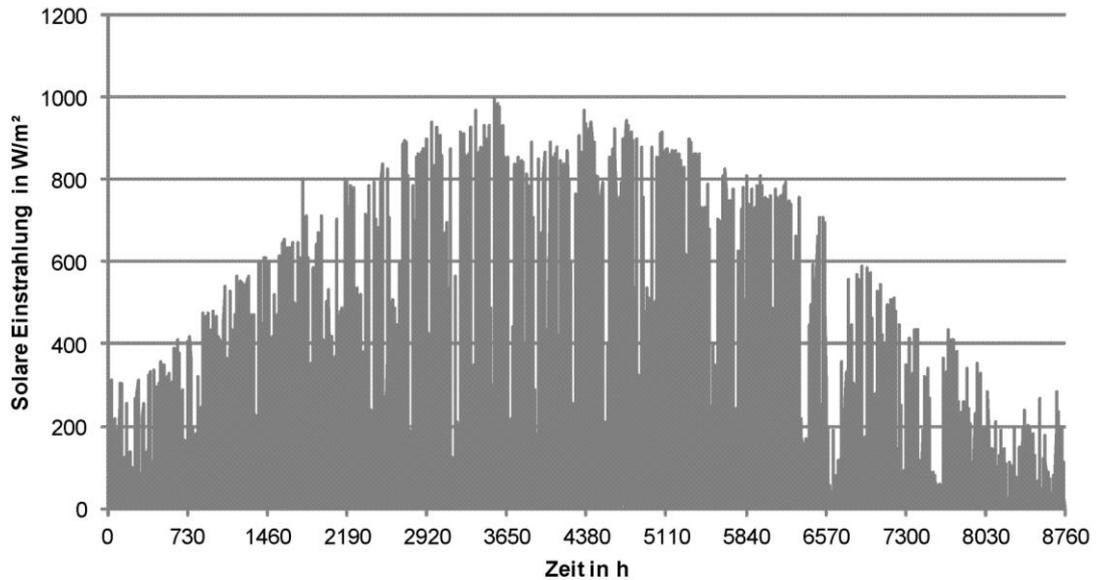


Abb. 22: Solare Einstrahlung im Jahresverlauf

Abbildung 22 zeigt die solare Einstrahlung im Jahresverlauf für den Standort Klagenfurt.

In [NUS10d] ist der Einfluss der solaren Strahlungs- und Absorptionsbedingungen auf den Gesamtwassergehalt von Flachdachkonstruktionen ersichtlich. Der solare Absorptionsgrad und folglich der radiative Wärmeaustausch werden durch die Wahl der außenliegenden Dachhaut beeinflusst. Jene Bedingungen können in Anbetracht einer nicht beschatteten Dachfläche eine maßgebliche Einflussnahme auf den Verlauf des Gesamtwassergehalts erwirken.

Das solare Absorptionsverhalten der außenliegenden Dachhaut wurde, je nach Konstruktionsvariante – Foliendach ohne bzw. mit Kiesschüttung, aus Tabelle 11 entnommen und in das Außenklima impliziert. Für die hygrothermischen Simulationen wurde eine nicht beschattete Dachfläche unterstellt.

Tab. 11: Effektiver Emissionsgrad und Absorptionsgrad der Dachhaut [HOH04]

	Effektiver Emissionsgrad $\varepsilon$	Absorptionsgrad $\alpha$
EPDM (vgl. Dachpappe)	0.9	0.9
Kies (vgl. Putz grau)	0.97	0.65

### 4.2.3 Luftdichtheit der Konstruktion - Konvektive Feuchteinträge aufgrund von Leckagen

Infolge des Anspruches an die Luftdichtheit von Gebäuden zur Verminderung der Wärmeverluste stellen potentielle konvektive Feuchteinträge in die Konstruktion ein wesentliches Risikopotential dar. Konvektionsbedingte Feuchteschäden können aufgrund von unzureichend abgedichteten Bauteilanschlüssen sowie von Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht auftreten. [NUS10d]

Bei Unterstellung von Leckagen dringt feuchte Innenluft infolge der sich einstellenden natürlichen Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenklima in die Konstruktion ein und kann unter ungünstigen Bedingungen zu Feuchteschäden führen. Die thermisch induzierte Druckdifferenz ist höhenabhängig und anhand folgender Formel (6) definiert. [FIS08]

$$\Delta p = p_i - p_a = (\rho_a - \rho_i) g \cdot y \quad (6)$$

$\Delta p$  Druckdifferenz zwischen innen und außen in Pa

$p_i$  Luftdruck innen in Pa

$p_a$  Luftdruck außen in Pa

$\rho$  Dichte der Luft in kg/m<sup>3</sup>

$g$  Erdbeschleunigung in m/s<sup>2</sup>

$y$  Höhen-Koordinate in m

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (7)$$

$p$  1,01325 bar Normdruck gemäß [DIN90]

$R$  287 J/(kg K) spezielle Gaskonstante Luft

$T$  Temperatur in K

In unseren Breiten ist während der Heizperiode in den Wintermonaten die Innentemperatur höher als die Außentemperatur und somit die Dichte der Luft im Innenraum kleiner als die Dichte der Außenluft. [FIS08]

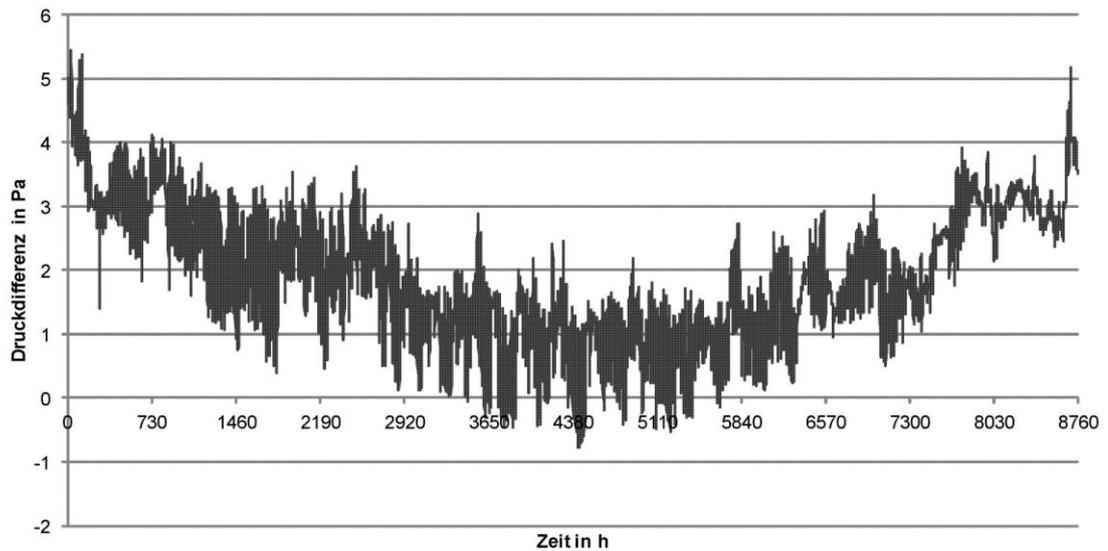


Abb. 23: Druckdifferenz zwischen innen und außen bei einem Höhenunterschied von 6m

Abbildung 23 zeigt die sich einstellende Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenklima aufgrund des thermischen Auftriebs im Jahresverlauf.

Für die hygrothermischen Simulationen wurde die Leckagenposition gemäß Abbildung 24 definiert.

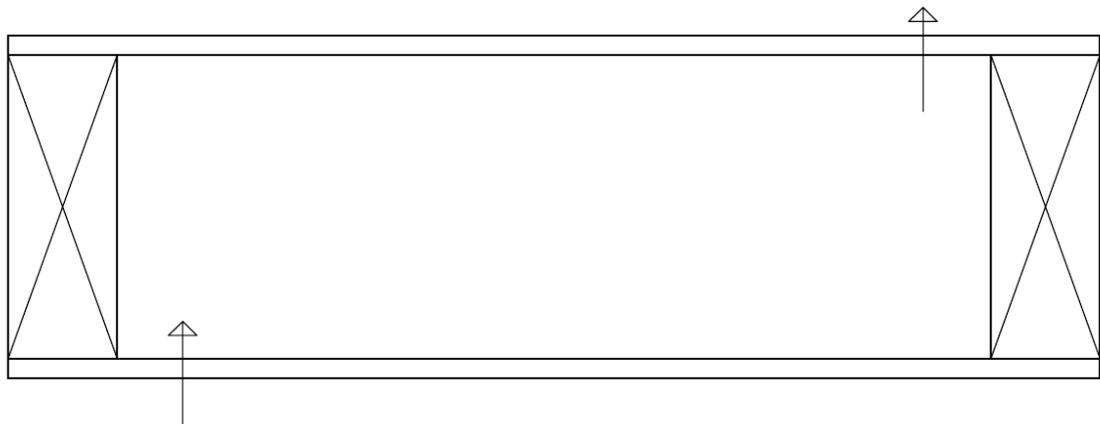


Abb. 24: Position der Leckagen. Einström- und Ausströmlokalisation

Um den Einfluss der Luftdichtheit auf das hygrothermische Verhalten abbilden zu können, wurden in dieser Arbeit unterschiedliche Luftdichtheitsklassen definiert.

Der Leckagevolumenstrom wird bei einer Kabelauslassdichte von  $0,48 \text{ 1/m}^2$  und einem für Spalt- und Rissleckagen typischen Strömungsexponent von  $2/3$  in Gleichung (8) quantifiziert. [FIS08]

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (8)$$

$Q$  Luftleckagevolumenstrom in  $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$

Jener definierte Luftvolumenstrom wird als Referenzvolumenstrom F100 (Flow 100%) benannt. Die Klassifizierung der untersuchten Bauteildichtheiten wurde in drei Luftdichtheitsklassen vorgenommen. [NUS10d]

F100 Gebäudedichtheit nicht nachgewiesen, Luftdichtheit gemäß Stand der Technik (F=1)

**F50** Blower-Door Nachweis  $n_{50} \leq 3,0$  [1/h] (F=0,5)

**F25** Blower-Door Nachweis  $n_{50} \leq 1,5$  [1/h] (F=0,25)

**F0** kein Leckagevolumenstrom (theoretischer Ansatz)

Gleichung (9) definiert den Massenstrom gemäß [NUS10d].

$$\dot{m} = \rho_{\text{Luft}} \cdot F \cdot Q \quad (9)$$

$\dot{m}$  Luftmassenstrom

$\rho_{\text{Luft}}$  Dichte der Luft - 1,2  $\text{kg}/\text{m}^3$

F Luftdichtheitsfaktor

## 5 Ergebnisse - Auswertung

### 5.1 Simulationsergebnisse im Hinblick auf den Feuchtegehalt der Konstruktion und die daraus resultierende Gebrauchsdauer

#### 5.1.1 Feuchtegehalt der Gesamtkonstruktion

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse wurden vorerst die stündlichen Ausgabedaten auf Monatsmittelwerte zusammengefasst um das Datenvolumen in handhabbarem Maße zu halten.

Die Tendenz des hygrothermischen Verhaltens wurde zuerst an der Gesamtkonstruktion mittels dessen Gesamtwassermasse (die Kiesschüttung ausgeschlossen) betrachtet. Die Holzrahmenkonstruktionen wurden schematisch anhand der zu Grunde gelegten Luftdichtheitsklassen untersucht.

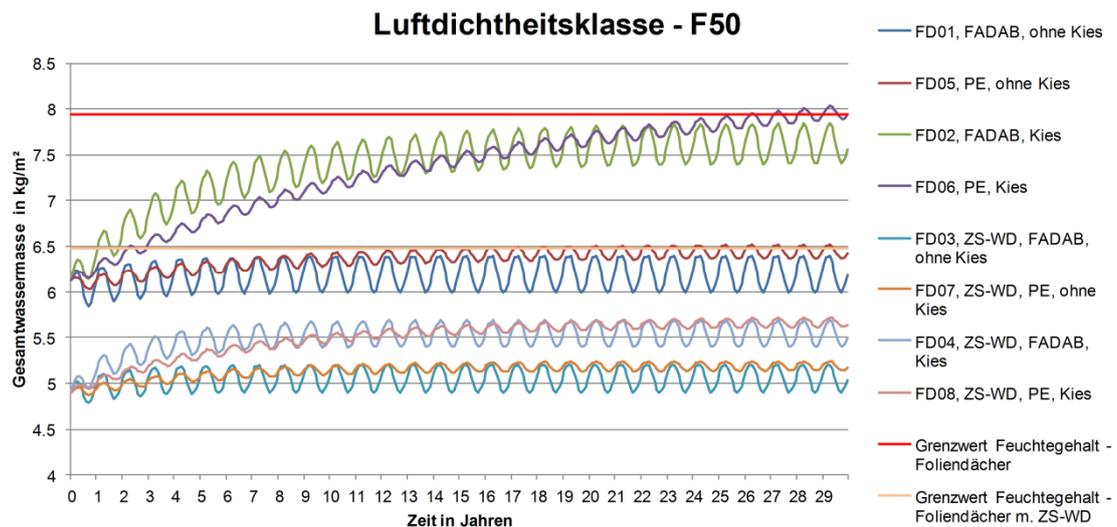


Abb. 25: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 aller nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen

Aus Abbildung 25 wird deutlich, dass jene Konstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesschüttung (FD02 und FD06) einen kontinuierlichen Anstieg der Gesamtwassermasse bei einer Luftdichtheit von F50 aufweisen und sich im Zeitverlauf an den zulässigen Grenzwert – kumulativer Anteil aus 20 M% beim Konstruktionsholz und 18 M% beim Holzwerkstoff – bei Betrachtung der Gesamtwassermasse annähern. Bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FD02) zeigt sich vorerst ein rasanterer Anstieg im Vergleich zum Einsatz einer PE-Folie (FD06). Jedoch wird nach ca. zehn Jahren die Steigung flacher und die Gesamtwassermasse pendelt sich auf einem relativ konstanten Niveau knapp

unter dem zulässigen Grenzwert für die Gebrauchstauglichkeit ein. Dieses Verhalten zeigt sich, wie Abbildung 26 aufzeigt, über alle Luftdichtheitsklassen.

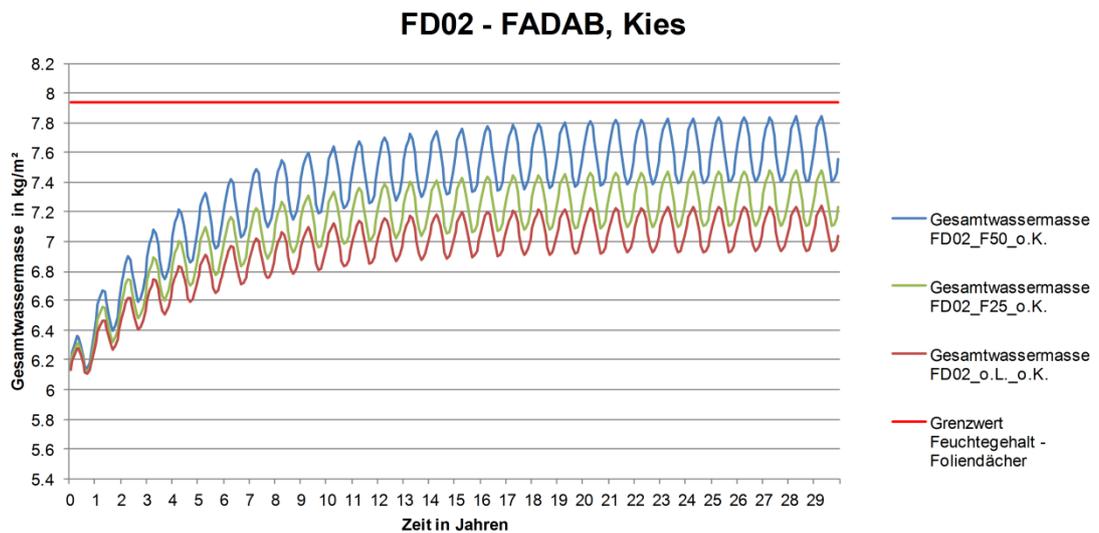


Abb. 26: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD02 – Vollsparrengedämmte Konstruktion mit Kiesauflast und feuchteadaptiver Dampfbremse; die Gesamtwassermasse wird ohne der Wassermasse der Kiesschüttung aufgezeigt

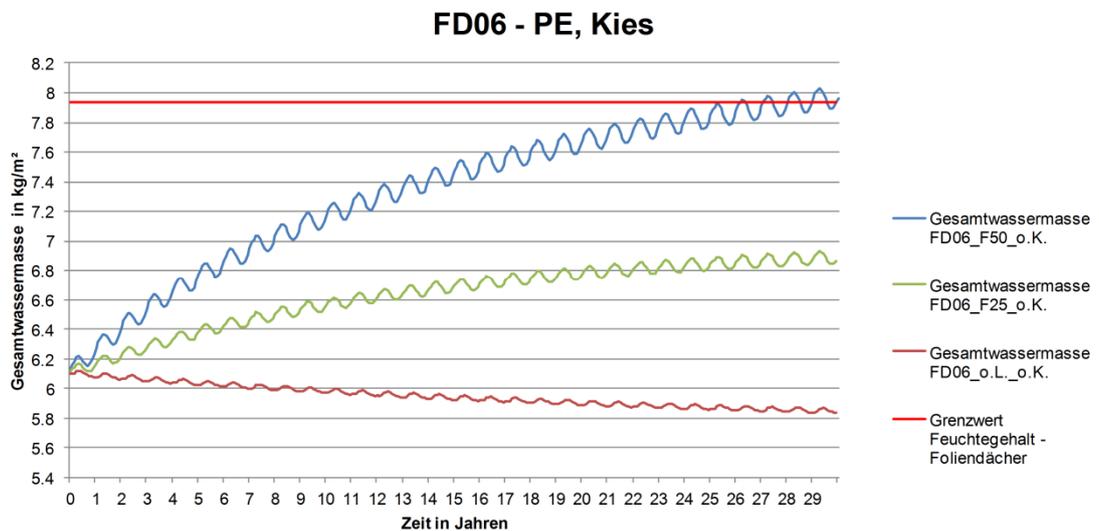


Abb. 27: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD06 – Vollsparrengedämmte Konstruktion mit Kiesauflast und PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ ); die Gesamtwassermasse wird ohne der Wassermasse der Kiesschüttung aufgezeigt

Die Variante bei Verwendung einer PE-Folie (FD06) wird sehr stark durch die Luftdichtheit beeinflusst, wie in Abbildung 27 verdeutlicht wird. Während bei Unterstellung der Luftdichtheitsklasse F50 die Konstruktion nach 26 Jahren die Gebrauchstauglichkeit verübt hat, resultieren die Ergebnisse bei einer verbesserten

Luftdichtheit in einem deutlich geringeren Anstieg der Wassermasse. Bei der Betrachtung ohne mögliche Leckagen kann eine Abnahme der Wassermasse verzeichnet werden.

Die Konstruktionsvariante Holzleichtbau in hinterlüfteter Form (FD10) kann hingegen als sehr risikotolerant betrachtet werden. Die für die Gebrauchstauglichkeit höchst zulässige Wassermasse von 7,94 kg/m<sup>2</sup> wird deutlich unterschritten und es stellt sich über alle Luftdichtheitsklassen eine Abnahme der Gesamtwassermasse, wie Abbildung 28 zeigt, ein.

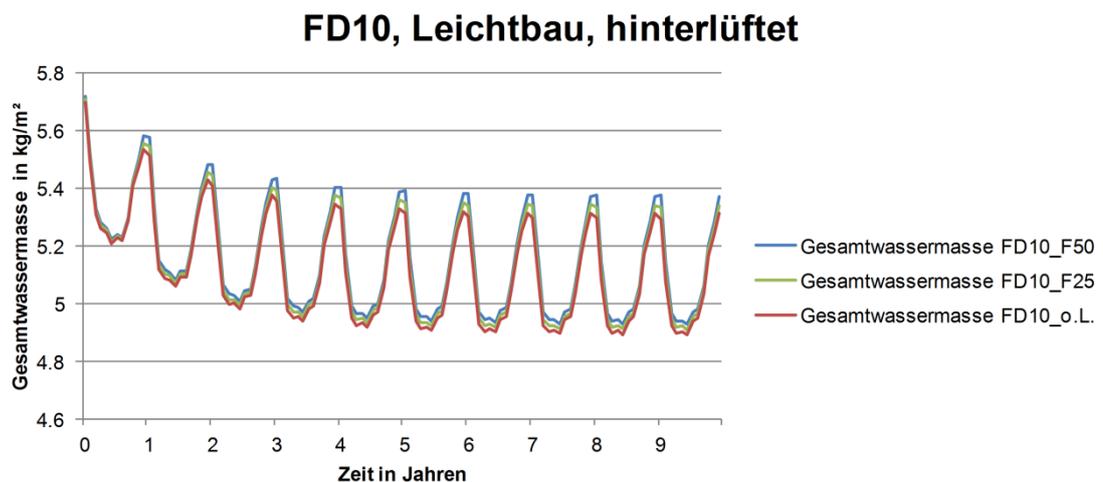


Abb. 28: Gesamtwassermassenverlauf über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD10 – Vollsparrengedämmte Konstruktion mit PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ )

Die Holzmassivbaukonstruktionen wurden ausschließlich dahingehend untersucht, wie sich deren Verhalten ohne Leckagen auf die Gebrauchstauglichkeit auswirkt. Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades der massiven Konstruktionen, welche im Normalfall bereits geplante Installationen beinhalten, werden vorwiegend Stöße und Bauteilanschlüsse für konvektive Feuchteströmungen schlagend. Somit ist das Risiko der Durchdringung der Luftdichtheitsebene infolge von beispielsweise Elektro-Installationen wesentlich geringer. In Abbildung 29 erkennt man, dass sich im Laufe der Jahre bei allen betrachteten Holzmassivbaukonstruktionen eine gewisse Ausgleichsfeuchtigkeit einstellt, wobei jene deutlich unter dem zulässigen Grenzwert von 20 M% (FD11 bei 9,1 kg/m<sup>2</sup> Gesamtwassermasse und FD12/FD13 bei 11,4 kg/m<sup>2</sup> Gesamtwassermasse) liegt.

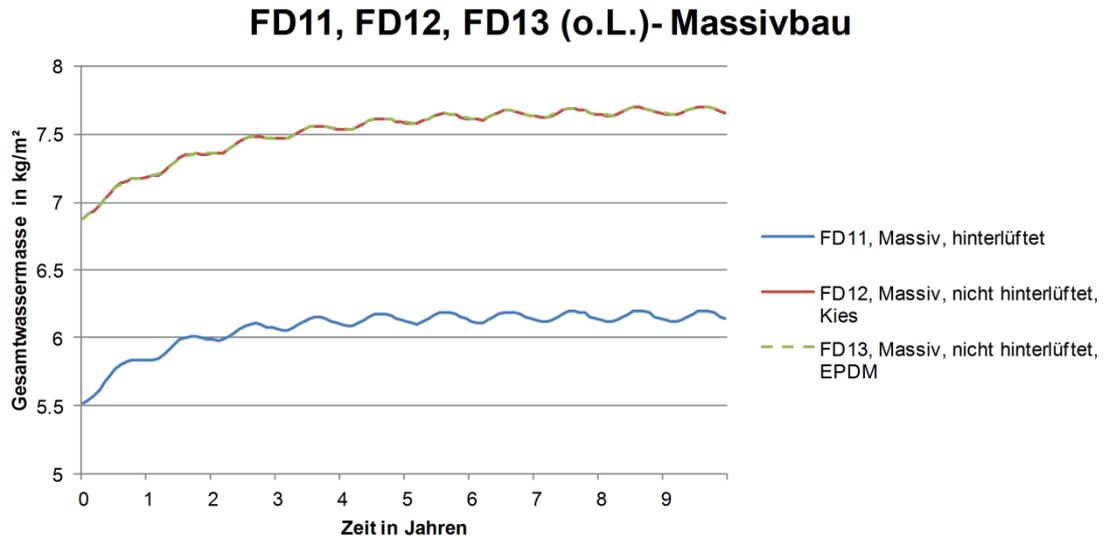


Abb. 29: Gesamtwassermassenverlauf über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der Massivbaukonstruktionen

Werden die einzelnen Konstruktionen nach deren Wassermasse der Gesamtkonstruktion betrachtet, kann festgehalten werden, dass nicht hinterlüftete Konstruktionen ein deutlich höheres Risikopotential in Bezug auf deren hydrothermisches Verhalten aufweisen. Es besteht eine wesentlich höhere Anforderung an die luftdichte Ausführung der Konstruktion im Vergleich zu hinterlüfteten Konstruktionen, welche aufgrund deren diffusionsoffener Ausführung einer ständigen Trocknungsmöglichkeit unterliegen und folglich bei einer ausreichenden Durchlüftung fehlertolerant sind. Im Hinblick auf die Dampfbremse, konnte festgestellt werden, dass bei Foliendächern mit Auflast bei einem geringeren Absorptionsgrad der außenliegenden Dachhaut oder einer möglichen Beschattung die Vorteilhaftigkeit einer feuchteadaptiven Dampfbremse in Frage gestellt werden kann, da der Gradient für eine Umkehrdiffusion für ein erwartetes Rücktrocknungspotential zu gering ausfällt.

### 5.1.2 Feuchtegehalt einzelner Bauteilschichten

Für eine genauere Betrachtung der Bauteilkomponenten bzw. zur möglichen Verifizierung kritischer Bauteilschichten werden die Konstruktionsholzbauteile sowie die Holzwerkstoffplatten näher analysiert. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, werden der zulässige Feuchtegehalt des Konstruktionsholzes bei 20 Massenprozent und jener der Holzwerkstoffe bei 18 Massenprozent angesetzt.

### 5.1.2.1 Äußere Beplankung – OSB-Platte

Betrachtet man den Feuchtegehalt der äußeren Beplankung mit OSB-Platten, erkennt man in Abbildung 30 und Abbildung 31 vorwiegend bei den Holzleichtbaukonstruktionen mit Kiesschüttung eine kontinuierliche Zunahme im Zeitverlauf. Die Foliendächer mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesschüttung (FD02 und FD06) weisen bei der Luftdichtheitsklasse F50 bereits zu Beginn bzw. nach einigen wenigen Jahren einen über die zulässige Holzwerkstofffeuchte von 18 M% hinaus gehenden Feuchtegehalt auf. Die Holzwerkstofffeuchte übersteigt ebenso die Toleranzfeuchte von 20 M%, welche bei einer vorübergehenden Auffeuchtung mit einem rechnerischen Nachweis über die Rücktrocknung innerhalb von drei Monaten gemäß DIN 68800-2 [DIN12] herangezogen werden kann. Der Feuchtegehalt der vergleichbaren Foliendachkonstruktionen ohne Kiesschüttung (FD01 und FD05) stellt sich bei einem Maximum zwischen 15 M% und 16 M% ein und überschreitet somit den kritischen Grenzwert von 18 M% nicht, wobei der Feuchteverlauf näherungsweise unverändert in den jahreszeitlichen Schwankungen ist.

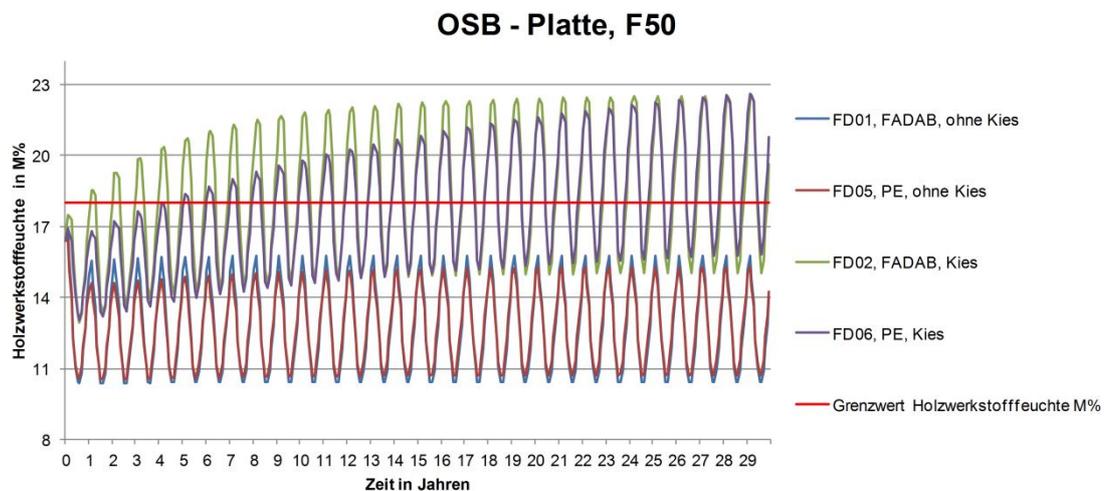


Abb. 30: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung

Die Konstruktionsvarianten mit Zusatzwärmedämmung weisen ähnliche Tendenzen zu jenen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung auf. Abbildung 31 zeigt für die Varianten ohne Kiesauflast (FD03 und FD07) jedoch eine geringere jährliche Schwankungsbreite im Feuchteverlauf, wobei die Maximalwerte ebenso im Bereich von 15 M% und 16 M% liegen. Die Ausführungen mit Kiesauflast (FD04 und FD08) zeigen deutlich reduzierte Maxima im Vergleich zu den Varianten FD02 und FD06, nähern

sich jedoch dem zulässigen Grenzwert von 18 M% an. Für diese Varianten kann jedoch nach DIN 68800-2 [DIN12] bei dem rechnerischen Nachweis über die Rücktrocknung innerhalb von drei Monaten ein Feuchtegehalt von bis zu 20 M% toleriert werden.

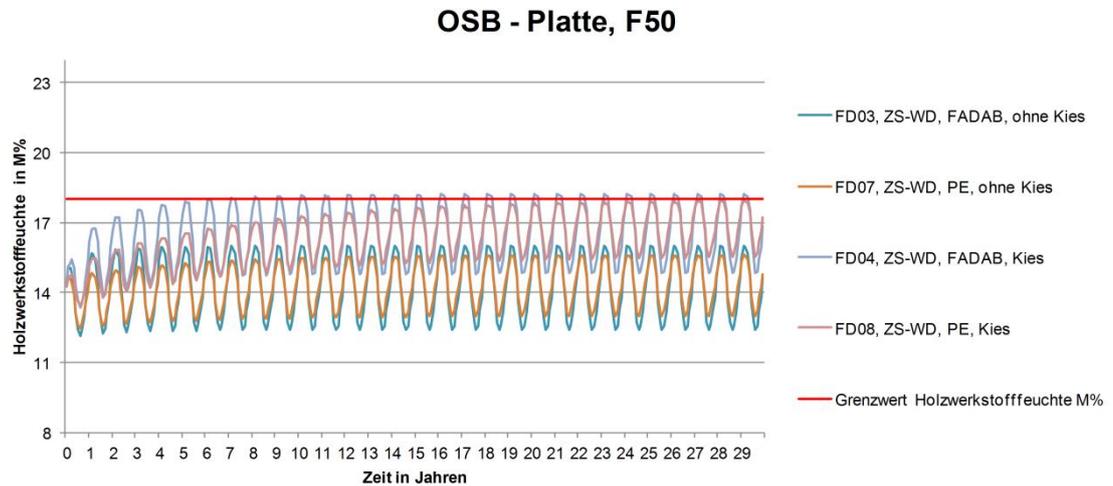


Abb. 31: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung

Verbessert sich die Luftdichtheit der nicht hinterlüfteten Konstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung auf F25, so erkennt man in Abbildung 32 den deutlich verringerten Feuchtegehalt der äußeren Beplankung bei der Konstruktionsvariante FD06 mit Kiesschüttung und einem konstanten innenliegenden Diffusionswiderstand.

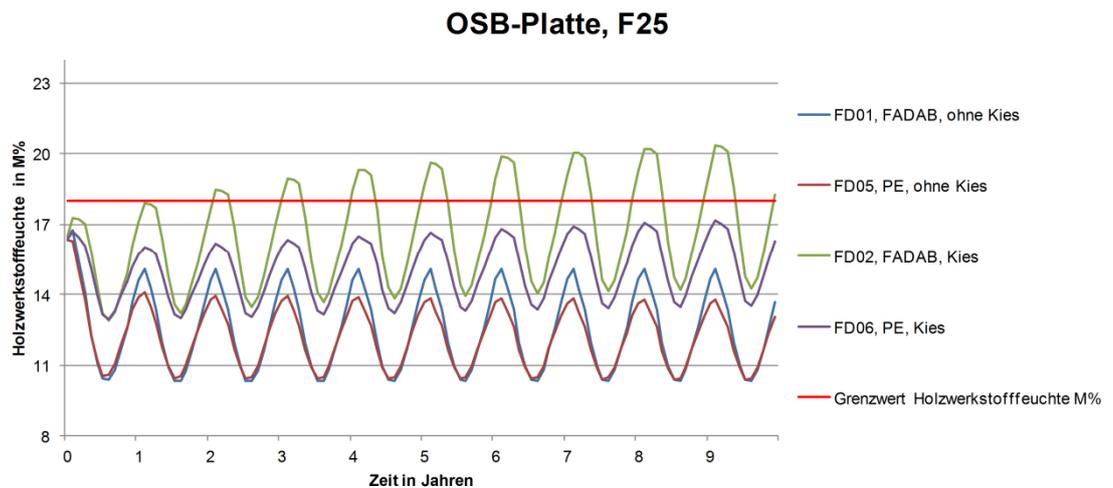


Abb. 32: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung

Für die Beurteilung einer längerfristigen Zeitspanne wurden die kritischen Konstruktionen FD02 und FD06 bei Betrachtung der Luftdichtheitsklasse F25 anhand eines dreißigjährigen Simulationszyklus, in Abbildung 33 ersichtlich, untersucht. Während die Variante FD02 mit der feuchteadaptiven Dampfbremse bereits nach acht Jahren einen Feuchtegehalt der OSB-Platte von 20 M% erreicht, wodurch auch die kurzfristige Toleranz bis 20 M% gemäß DIN 68800-2 [DIN12] überschritten wird, stellt sich bei der Konstruktionsvariante FD06 mit einem konstanten  $s_d$ -Wert der Dampfbremse die zulässige Grenzfeuchte von 18 M% erst nach einer Dauer von zirka 25 Jahren ein.

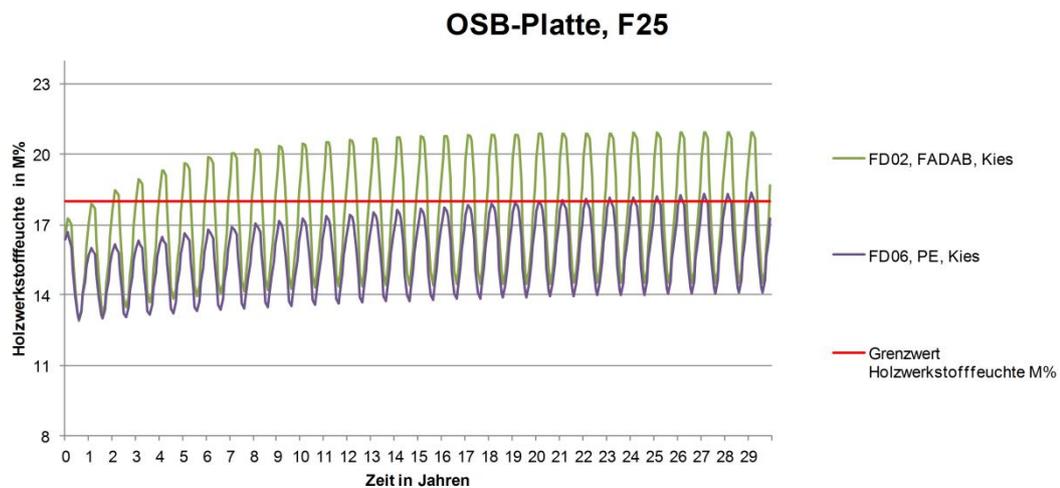


Abb. 33: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast

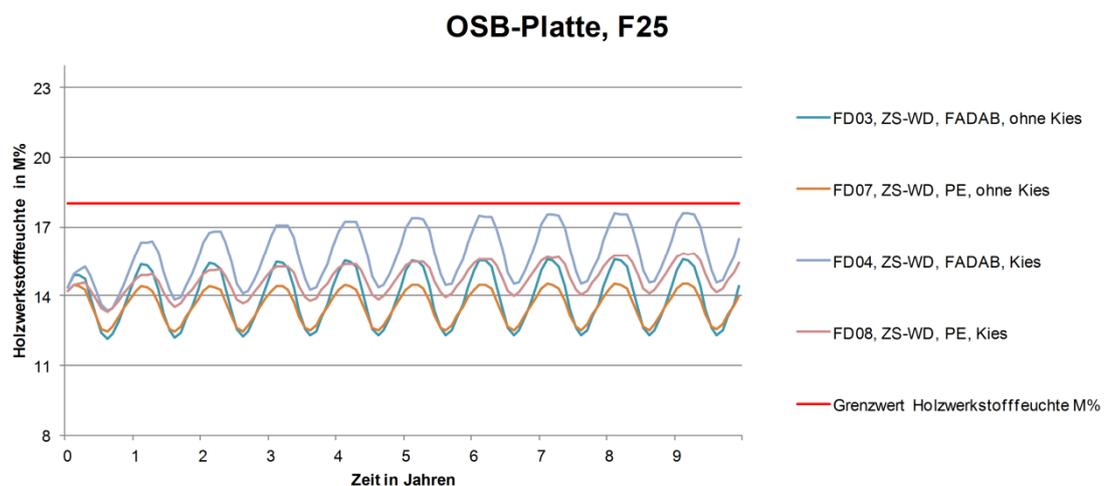


Abb. 34: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung

Bei einer besseren Luftdichtheit von F25 der Foliendachkonstruktionen mit Zusatzwärmedämmung zeigt Abbildung 34 die Minderung der Feuchtemaxima vor allem bei jenen mit Kiesauflast. Dies ist besonders für die Ausführung mit der PE-Folie als dampfbremsende Schicht (FD08) zu erkennen. Die Ausführungsvariante mit der feuchteadaptiven Dampfbremse (FD04) zeigt im zehnjährigen Verlauf keine Überschreitung des zulässigen Grenzwertes für den Feuchtegehalt von 18 M%, es liegt jedoch bereits eine Annäherung an den Grenzwert vor. Beide Varianten ohne Kiesauflast zeigen keine kritischen Feuchtegehalte der OSB-Beplankung auf.

### OSB-Platte, ohne Leckage

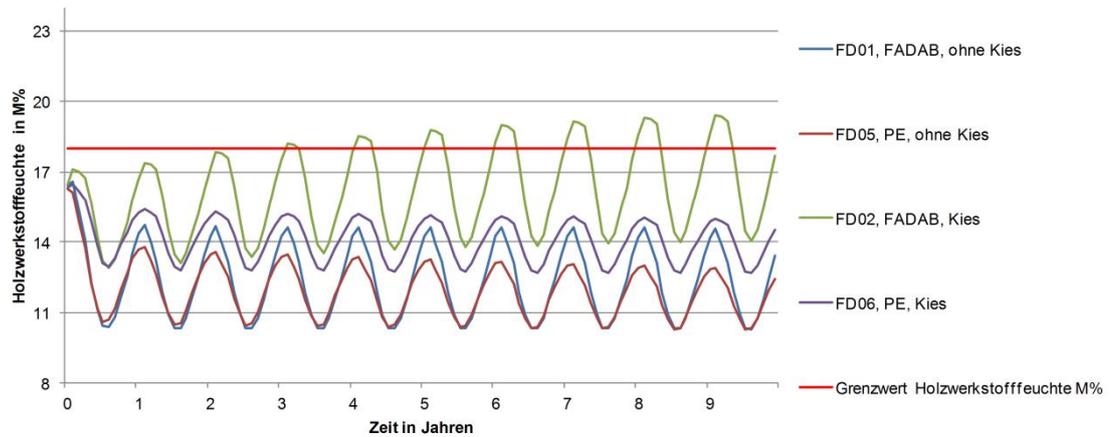


Abb. 35: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung

### OSB-Platte, ohne Leckage

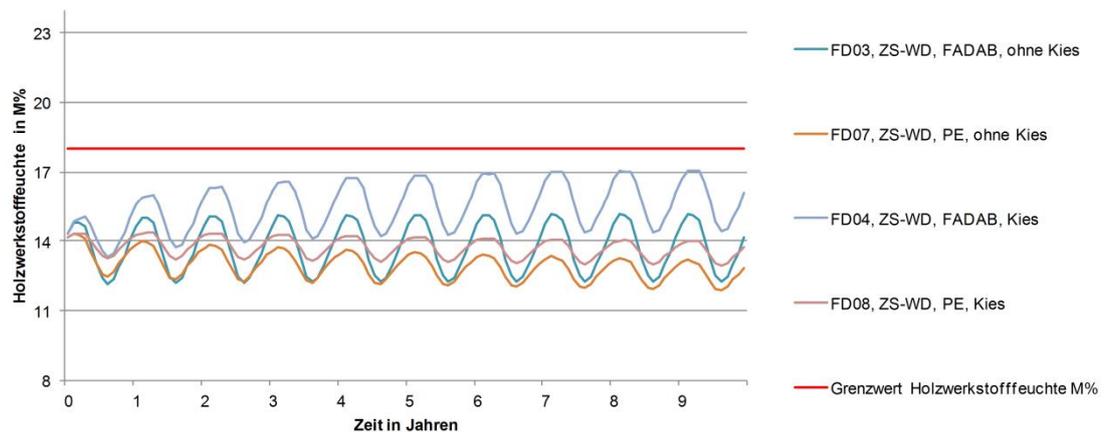


Abb. 36: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung

Unterstellt man keine Leckagen in den Konstruktionsebenen, können anhand der zehnjährigen Laufzeit der Simulationen, wie Abbildung 35 und Abbildung 36 veranschaulichen, alle Foliendachkonstruktionsvarianten mit Ausnahme jener mit ausschließlicher Vollsparrendämmung, feuchteadaptiver Dampfbremse und Kiesauflast (FD02) als gebrauchstauglich eingestuft werden. Es zeigen sich zum Teil auch Tendenzen der Trocknung im Laufe der Jahre. Der weiterhin kritisch zu beurteilende Aufbau (FD02) zeigt trotz Leckagenfreiheit eine Feuchteakkumulation im Zeitverlauf. Dies kann durch eine unwirksame Umkehrdiffusion infolge der geringeren Oberflächentemperatur der Dachhaut und auf die nicht vorhandene Überdämmung zurückzuführen sein.

Anhand dieser Ergebnisse kann der Schluss gezogen werden, dass eine feuchteadaptive Dampfbremse im Hinblick auf die äußere Bepflanzung lediglich bei den Varianten mit dunkler Dachhaut ohne Kiesschüttung sinnvoll erscheint. Werden die nicht hinterlüfteten Foliendächer mit einer PE-Folie ausgeführt, können die Materialfeuchten bei steigender Luftdichtheit deutlich geringer ausfallen bzw. im Laufe der Jahre reduziert werden und gegenüber dem Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse überlegen sein.

### 5.1.2.2 Konstruktionsholz

Um die Gebrauchstauglichkeit der Tragkonstruktion festzustellen, wird vorerst die Holzfeuchte der Sparren quantifiziert. Da der Sparren an der Auslassöffnung der Leckage in der Gesamtbetrachtung einen marginal höheren Feuchtegehalt aufweist, wird in diesem Unterkapitel ausschließlich dieser Sparrenquerschnitt reflektiert. Aus den Ergebnissen der zehnjährigen Untersuchung geht, wie in Abbildung 37 ersichtlich, hervor, dass die Konstruktionen mit Zusatzwärmedämmung einen vergleichsweise marginalen Anstieg der Holzfeuchte bei einem geringen Feuchteniveau im Konstruktionsholz aufzeigen.

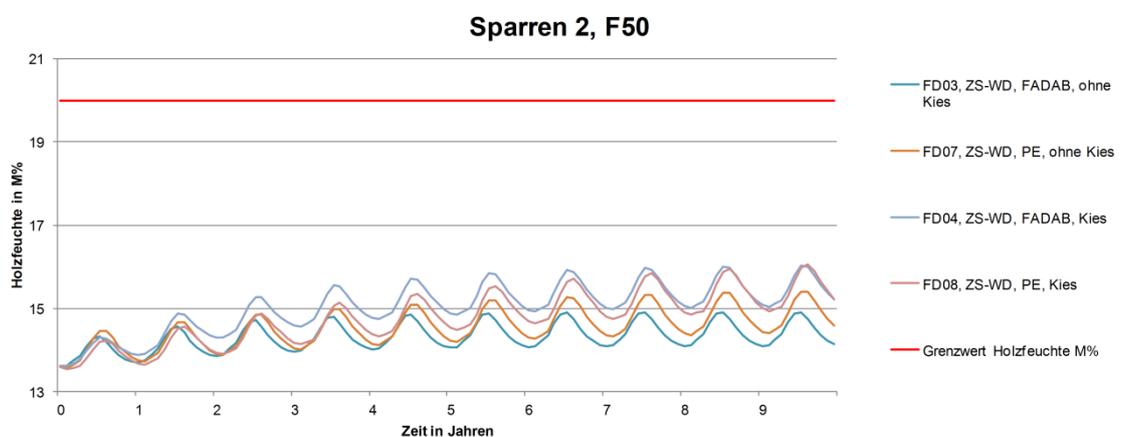


Abb. 37: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung

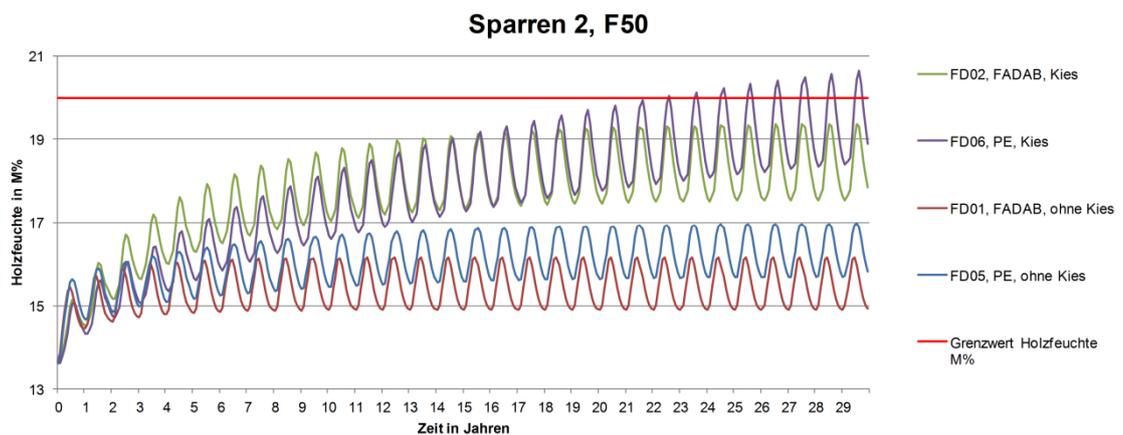


Abb. 38: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung

Der Anstieg des Feuchtegehaltes bei ausschließlich zwischensparrendämmten Konstruktionen mit Kiesschüttung (FD02 und FD06) ist im Zeitverlauf hingegen deutlich

steiler. Bei einer dreißigjährigen Laufzeit erhält man für kritische Konstruktionen einen besseren Aufschluss über die Entwicklung des Feuchteverlaufs über Jahrzehnte. In Abbildung 38 wird ersichtlich, dass bei Betrachtung des Konstruktionsholzes im Vergleich zur äußeren Beplankung der Aufbau mit der PE-Folie als kritischer zu bewerten ist. In diesem Fall wird die zulässige Holzfeuchte von 20 M% bei einer Lebensdauer von 24 Jahren überschritten. Diese Tatsache kann bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse durch eine Umkehrdiffusion im Sommer infolge eines lokalen hygrothermischen Gradienten durch das Innenklima begründet werden. Bei Verwendung einer PE-Folie hat das durch die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes gebundene Wasser aufgrund der fehlenden Diffusionsumkehr keine Möglichkeit der Rücktrocknung. Im Zuge einer Analyse der festgelegten Recorderpositionen wird in Kapitel 5.1.3 die Feuchteverteilung im Sparrenquerschnitt aufgezeigt.

Wird die Luftdichtheit auf F25 verbessert, sind über einen Zeitraum von 30 Jahren keine kritischen Verläufe des Feuchtegehaltes mehr zu verzeichnen. Der Feuchtegehalt pendelt sich auf eine Ausgleichsfeuchte im jahreszeitlichen Verlauf, gemäß Abbildung 39, ein.

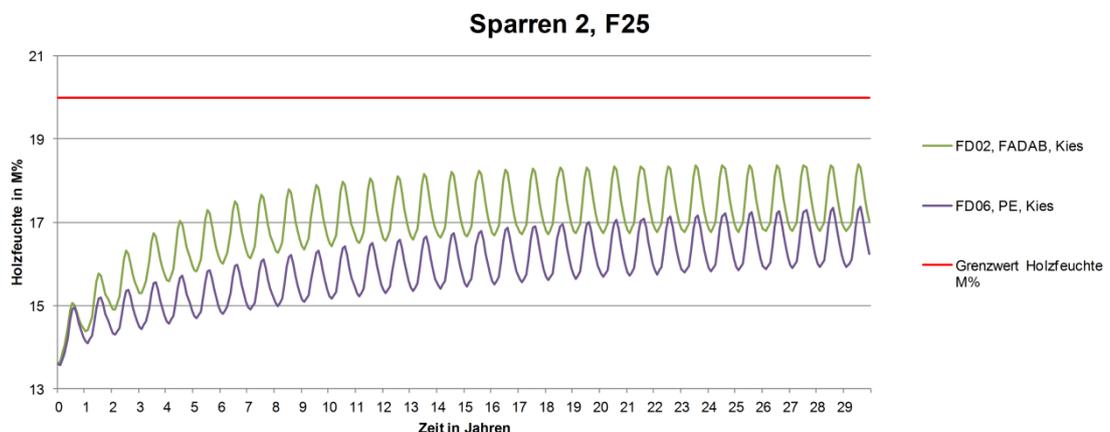


Abb. 39: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast

### 5.1.3 Feuchtegehalt einzelner Recorderpositionen

Analysiert man einzelne Positionen in den Holzbauteilen, erhält man einen Überblick über die Feuchteverteilung im Gefach. Da vergleichsweise jene Foliendachkonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung kritischer zu beurteilen sind, werden diese Konstruktionsvarianten genauer betrachtet.

Die Recorderpositionen sind an der Gefachinnenseite nahe der unteren sowie der oberen Beplankung und in Sparrenmitte lokalisiert, wie Abbildung 40 zeigt.



Abb. 40: schematische Skizze zu den aufgezeichneten Recorderpositionen

Um die Feuchteverteilung in den Holzsparren zu skizzieren, werden die Gegebenheiten bei der Luftdichtheitsklasse F50 näher betrachtet, da sich unter diesen Umständen die Auswirkungen der konvektiven Feuchteströmungen anschaulicher aufzeigen lassen. Die folgenden Abbildungen zeigen den zyklischen Feuchteverlauf im Zeitraum von zehn Jahren. Im oberen Bereich des Sparrens nahe der äußeren Beplankung zeigt sich in allen Diagrammen eine ausgeprägte Differenz zwischen dem linken und dem rechten Sparren. Der linke Sparren, welcher nahe der Leckageeinlassöffnung liegt, weist einen deutlich höheren Feuchtegehalt auf als jener Sparrenbereich nahe der Leckageauslassöffnung. Diese Tatsache lässt auf eine Konzentration der aufsteigenden Luftfeuchtigkeit in diesem Bereich schließen und zeigt die vermehrte Feuchtaufnahme durch Diffusion in jenem Bereich des Holzbalkens. Folglich kann auf eine konzentrierte aufwärts gerichtete Luftströmung geschlossen werden.

Um einen Eindruck zum Feuchteverlauf über den Sparrenquerschnitt zu erhalten, werden zunächst die Foliendächer ohne Auflast, welche nach Kapitel 5.1.2.2 als gebrauchstauglich eingestuft werden konnten, näher beleuchtet.

Das Foliendach ohne Auflast mit feuchteadaptiver Dampfbremse (FD01) weist im oberen Bereich des Sparrens im Vergleich zum restlichen Querschnitt eine deutlich erhöhte Feuchtekonzentration auf. Die erhöhte Materialfeuchte nahe der äußeren Beplankung lässt auf den konvektiven Eintrag durch die Leckage in den Wintermonaten schließen, wobei durch den Luftvolumenstrom infolge des thermischen Auftriebs in jenen Bereichen des Sparrens die feuchte Raumluft gebunden wird. Bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse lässt sich im Vergleich zur PE-Dampfbremse, wie in Abbildung 41 ersichtlich ist, eine deutlich geringere Anfeuchtung des Sparrens im Bereich der innenliegenden Beplankung feststellen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass infolge der Umkehrdiffusion in den Sommermonaten der

Feuchtegehalt in diesem Bereich maßgeblich reduziert wird. Für den oberen Bereich des Sparrens nahe der äußeren Beplankung kann aufgrund der Trägheit der Diffusion nicht derselbe Effekt im Vergleich zum nahe dem Innenklima exponierten Bereich erreicht werden.

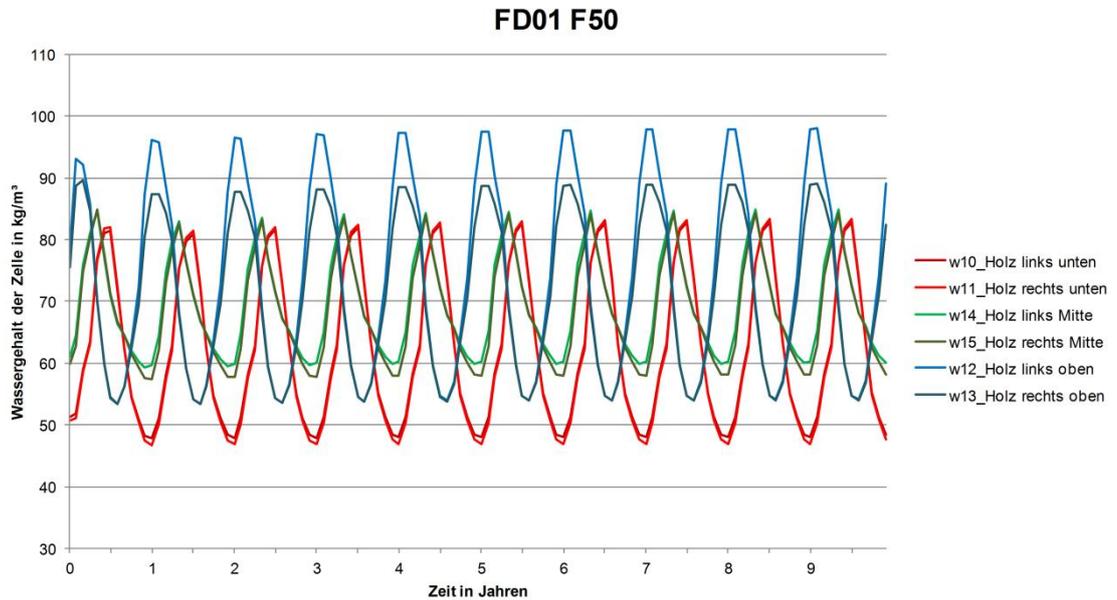


Abb. 41: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung ohne Kiesauflast mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse

Aufgrund der diffusionsbremsenden Wirkung der PE-Folie kann sowohl im Winter als auch im Sommer keine Umkehrdiffusion stattfinden. Somit wird auch die feuchte Luft der Sommermonate im Sparren nahe der innenliegenden Beplankung aufgenommen. Der Feuchtegehalt liegt hierbei um einiges höher als vergleichsweise bei der Konstruktion mit feuchteadaptiver Dampfbremse, wie Abbildung 42 zeigt.

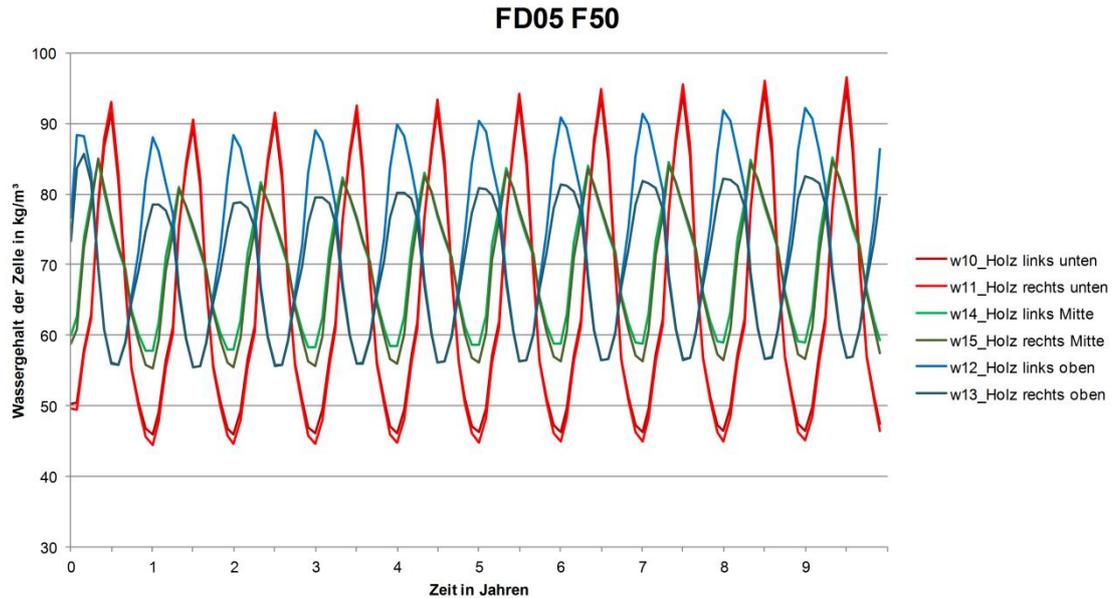


Abb. 42: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung ohne Kiesauflast mit einer PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ )

Betrachtet man die beiden Diagramme, Abbildung 43 und Abbildung 44, so sieht man tendenziell ähnliche Feuchteverläufe im Sparrenquerschnitt bei den Foliendächern mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast (FD02 und FD06). Grundsätzlich beeinflusst die Tatsache, ob eine feuchteadaptive oder eine konventionelle PE-Dampfbremse eingesetzt wird, nicht die Feuchteverlaufstendenzen. Der Unterschied besteht lediglich im Ausmaß des Feuchtegehaltes an den verschiedenen Stellen am Sparren. Durch die Kiesauflast wird der solare Absorptionsgrad im Vergleich zur schwarzen EPDM-Folie deutlich gemindert, wodurch die Umkehrdiffusion im Sommer trotz Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse nicht mehr schlagend wird. Somit ergibt sich für beide Varianten kein Rücktrocknungspotential. Die feuchteadaptive Dampfbremse, welche grundsätzlich den Vorteil für ein mögliches Rücktrocknen aufweist, lässt in den Sommermonaten feuchte Luft durch die Leckage und auch durch die Dampfbremse selbst in die Konstruktion, da der Diffusionswiderstand durch die Klimabedingungen im Sommer sehr gering wird.

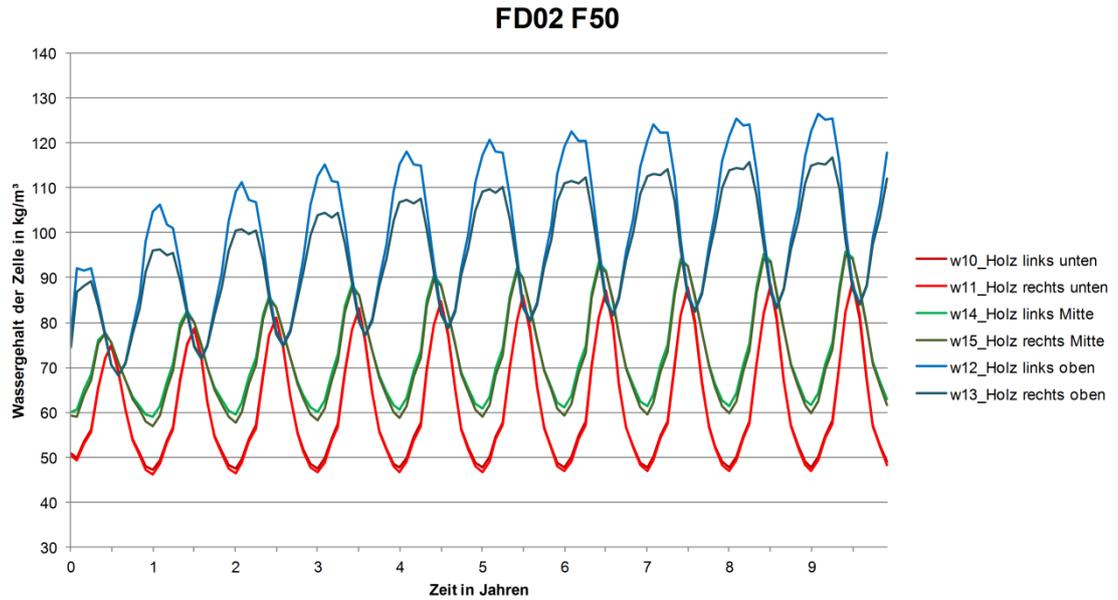


Abb. 43: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse

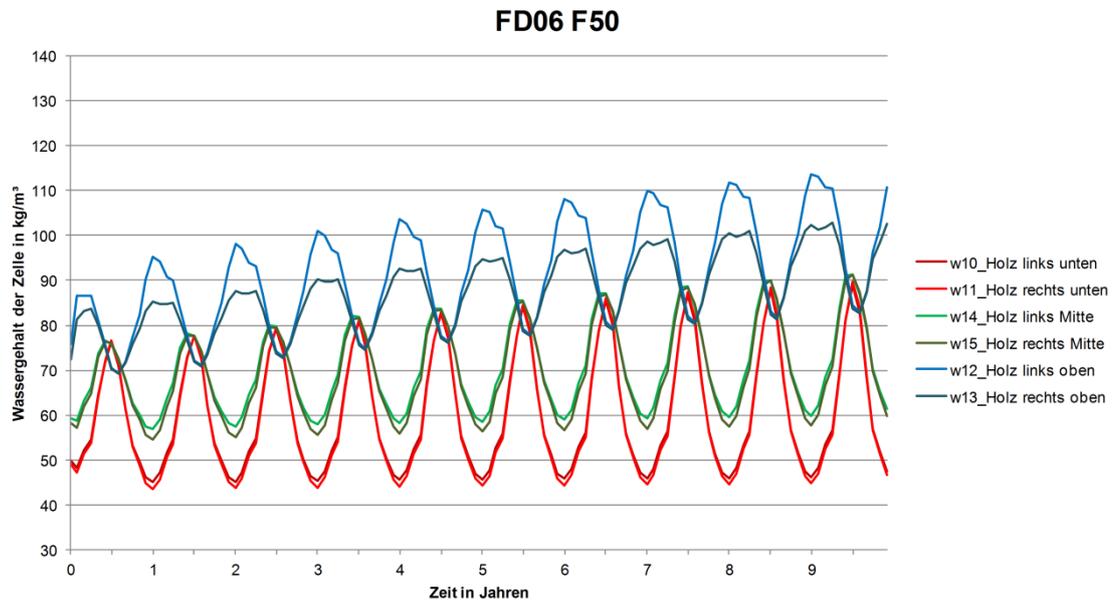


Abb. 44: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast mit einer PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ )

Bei Verwendung einer PE-Folie mit konstantem Dampfdiffusionswiderstand, wie aus Abbildung 44 ersichtlich wird, ist die Tendenz des zunehmenden Wassergehaltes der Recorderpositionen am Sparren ähnlich. Diese Konstruktion unterscheidet sich jedoch an den Absolutwerten der Feuchtegehalte, welche vergleichsweise in geringerem Maße steigend sind. Der Unterschied kann daran liegen, dass der

Feuchtetransport infolge von Diffusion durch die Dampfbremse behindert wird und im Vergleich zur Variante mit der feuchteadaptiven Dampfbremse ausschließlich der konvektive Feuchtetransport maßgeblich ist.

Generell kann man sagen, dass sehr starke Feuchteschwankungen im Holz zu wiederholtem Quellen und Schwinden führen und die dabei freiwerdenden Spannungen auf die Konstruktion wirken. Es können sich Risse im Konstruktionsholz bilden und folglich Schäden durch eindringende Feuchte und Schimmelpilze verursachen.

## 5.2 Bewertung der Gebrauchsdauer anhand des Modells von Viitanen et al.

In Kapitel 3.2.2 wurde bereits beschrieben unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen das Leben und Wachstum von Schimmelpilzen möglich bzw. einem Optimum entspricht. Auf Grundlage der aus den thermohygrischen Simulationen gewonnenen Outputs, wie der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit über die Zeit, werden die Risiken für Schimmelpilzbefall und –wachstum näher beleuchtet. Mit jenen Parametern wird mit Hilfe des Modells von Viitanen et al., welches infolge zahlreicher Untersuchungsreihen kontinuierlich weiterentwickelt wurde, das Risikopotential für Pilzbefall analysiert. Wie bereits aus aktuellen Freilandversuchen, welche in Kapitel 2 beschrieben wurden, hervorgeht, kann es trotz günstigen vorherrschenden Bedingungen zu keinem erkennbaren Pilzbefall kommen. Jene Analyse stellt ausschließlich eine Abschätzung des Risikopotentials dar.

Die untersuchten Holzleichtbaukonstruktionen werden zur Einschätzung der Gebrauchsdauer vorerst für die Luftdichtheitsklasse F50 dargestellt. Wird bei jenem Leckagevolumenstrom kein Risikopotential sichtbar, werden aufgrund der zunehmenden Luftdichtheit bei den weiteren Luftdichtheitsklassen die Konstruktionen als gebrauchstauglich eingestuft. Der Betrachtungszeitraum liegt grundsätzlich bei fünf Jahren, stellen sich kritische Bedingungen für Pilzwachstum dar, wird der Zeitraum auf zehn Jahre ausgedehnt, um eine Entwicklung über einen längeren Zeitraum veranschaulichen zu können.

Beim Foliendach ohne Auflast und ohne Zusatzwärmedämmung, wie in Abbildung 45 abgebildet, ist bei dem Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FD01) kein Risiko für Pilzwachstum bzw. ausschließlich Tendenzen zu einer möglichen beginnenden Phase eines Pilzbefalls ersichtlich. Vergleicht man dazu den grob gleichwertigen Aufbau mit einer innenliegenden PE-Dampfbremse (FD05), wie in Abbildung 46 dargestellt, so zeichnen sich Lebensbedingungen für Pilzwachstum ab. Im unteren Sparrenbereich nahe der innenseitigen Beplankung können anhand des Mould Index nach einem Zeitraum von zehn Jahren bereits einige lokale Pilzkolonien auf mikroskopischer Ebene sichtbar werden. Verringert man den Leckageluftvolumenstrom auf die Luftdichtheitsklasse F25, wie Abbildung 47 zeigt, so nehmen die Tendenzen für einen Schimmelpilzbefall bei einer Betrachtung von fünf Jahren im Laufe dieser Zeit ab.

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

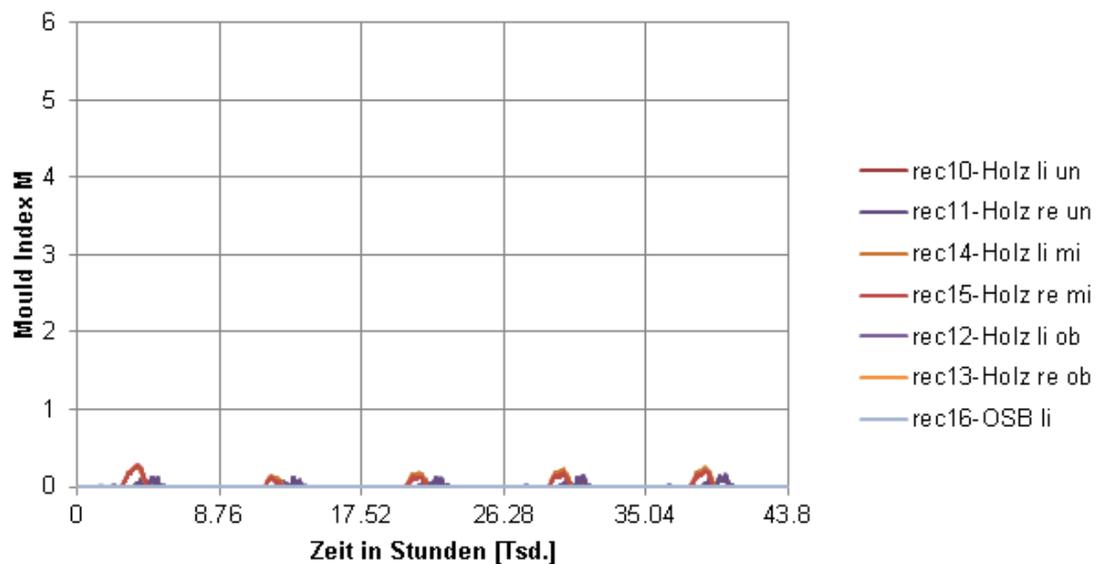


Abb. 45: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD01 bei der Luftdichtheitsklasse von F50

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

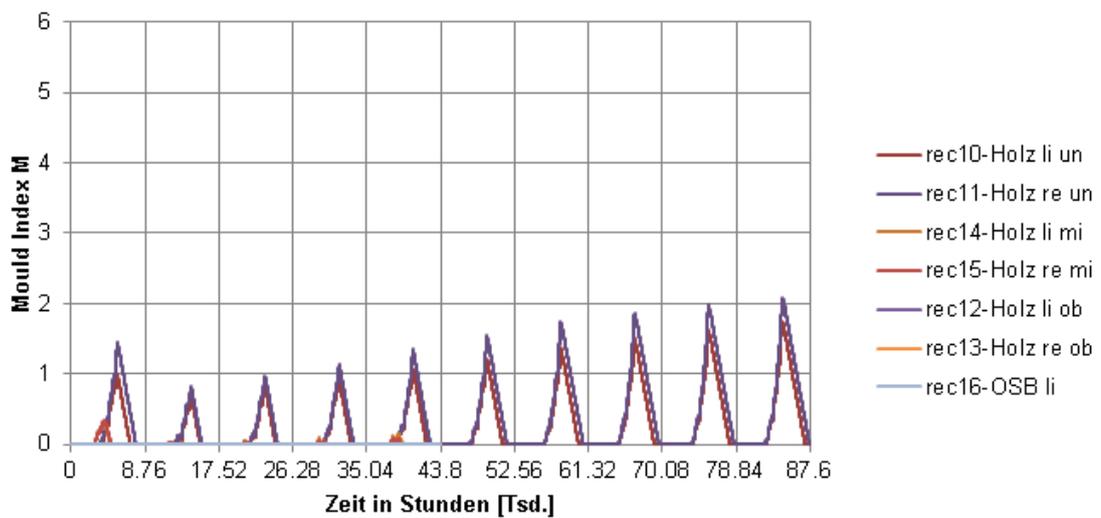


Abb. 46: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD05 bei der Luftdichtheitsklasse von F50

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

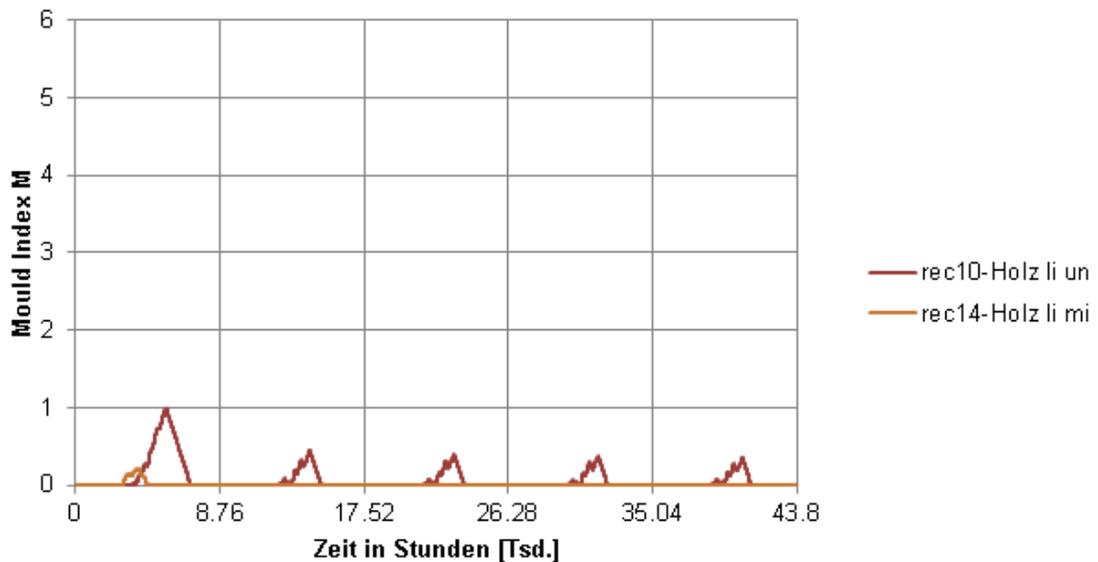


Abb. 47: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD05 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 5 Jahren

Bei der Betrachtung der Foliendächer ohne Zusatzwärmedämmung mit Kiesauflast (FD02 und FD06) zeigen sich ähnlich der Beurteilung des Wassergehaltes kritische vorherrschende Bedingungen. Aufgrund des geringen solaren Absorptionsverhaltens infolge der Kiesschüttung kann bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse im Vergleich zum Foliendach ohne Auflast keine Umkehrdiffusion im gewünschten Ausmaß erfolgen. Es stellen sich im Vergleich zu FD01 im oberen Bereich des Sparrens an der äußeren Beplankung günstige Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum ein. Dies geht soweit, dass für jenen Sparrenbereich bereits nach fünf Jahren ein Mould Index von über vier errechnet wird und sich jener im Laufe von zehn Jahren an den Wert fünf annähert, wie Abbildung 48 zeigt. Der unter den vorherrschenden Parametern berechnete Mould Index bedeutet beim Wert von fünf, dass bereits über 50 Prozent der Fläche mit visuell sichtbarem Schimmelbewuchs bedeckt ist. Abbildung 48 zeigt den Mould Index ausgewählter Recorderpositionen am Sparren sowie an der äußeren Beplankung. Die Recorderpositionen an der Sparrenmitte zeigen ebenso eine steigende Tendenz für Schimmelpilzwachstum, jedoch begrenzt sich der Mould Index nach einer Zeitdauer von zehn Jahren mit einem Wert über zwei. Die äußere Beplankung in Form der OSB-Platte, welche gemäß der Klassifizierung bezüglich der Sensibilität des Materials im Vergleich zum Konstruktionsholz weniger anfällig ist, weist nach zehn Jahren einen Mould Index von zwei im Bereich der Leckageneinlassöffnung bzw. im Bereich der Auslassöffnung

annähernd einen Wert von zwei auf. Der untere Bereich des Sparrens an der Dampfbremse weist weniger kritische Werte auf. Bei Unterstellung einer höheren Luftdichtheit von F25 verhalten sich die Bedingungen weit weniger kritisch, wie in Abbildung 49 ersichtlich wird. Wird der theoretische Ansatz ohne Leckagen betrachtet, nimmt der Mould Index weiterhin ab und erreicht ausschließlich im oberen Bereich des Sparrens nach zehn Jahren einen Wert von über zwei, wie Abbildung 50 veranschaulicht. Anhand der berechneten Mould Indizes kann festgehalten werden, dass bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse und einem geminderten solaren Absorptionskoeffizienten die erwartete Umkehrdiffusion aufgrund der geringeren Oberflächentemperaturen ausbleibt und es zu kritischen Bedingungen in Bezug auf das Risiko für Schimmelpilzbefall durch eine erhöhte Feuchtekonzentration in den Sommermonaten im oberen Bereich des Sparrens kommt. Das Risiko nimmt mit zunehmender Luftdichtheit der Konstruktion ab und kann bei Leakagefreiheit gering gehalten werden.

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

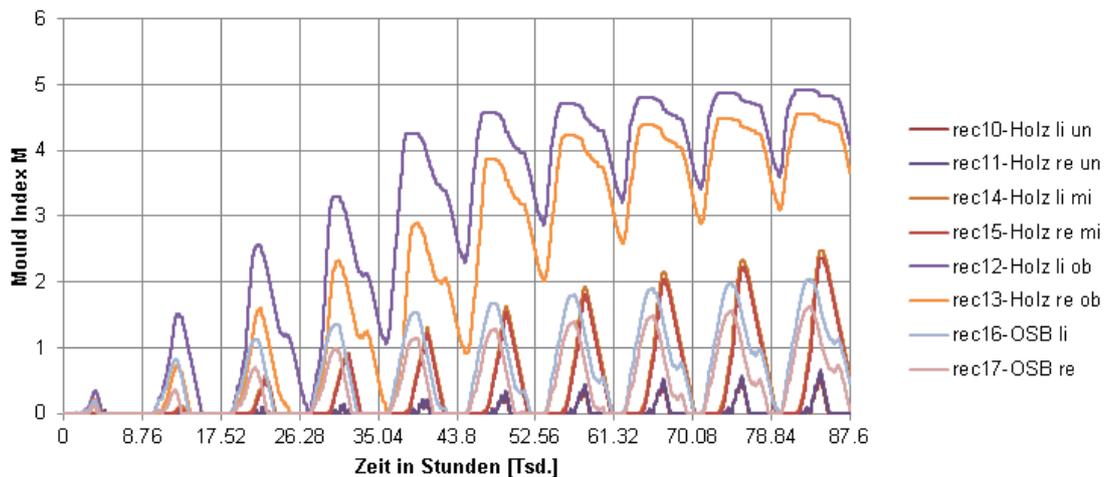


Abb. 48: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

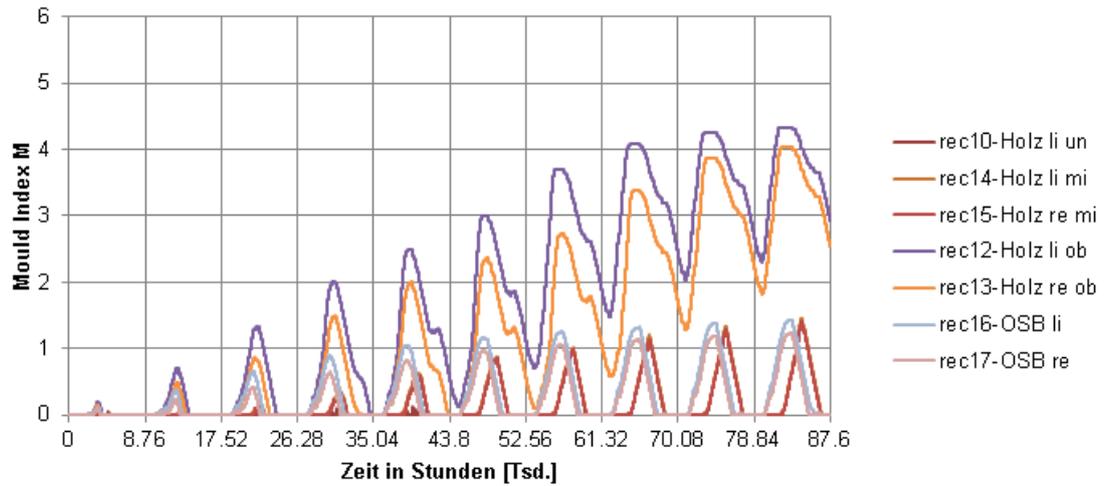


Abb. 49: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

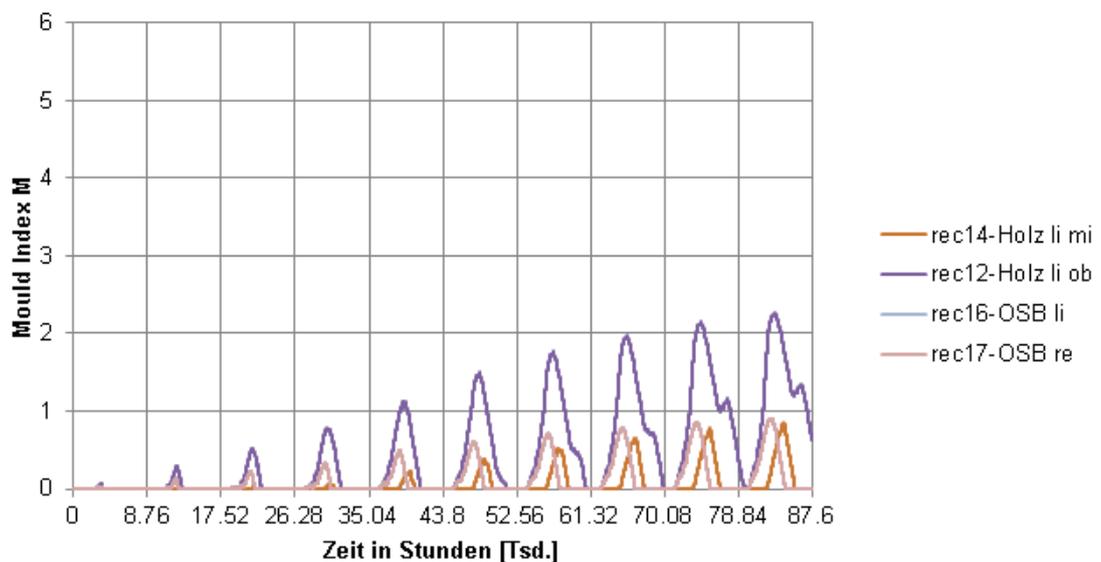


Abb. 50: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F0 für den Zeitraum von 10 Jahren

Betrachtet man im Gegenzug Foliendächer ohne Zusatzwärmedämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer PE-Dampfbremse (FD06), so ist das Risiko für Schimmelpilzbefall bei der Luftdichtheitsklasse F50 geringer. Es ergibt sich vor allem zwischen den Recorderpositionen im oberen Sparrenbereich über der Leckageeinlass- und der Leckageauslassöffnung eine wesentlich höhere Differenz des Mould Index, verglichen mit der Konstruktion FD02. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass

auch in den Sommermonaten der Dampfdiffusionswiderstand konstant hoch ist und sich somit die Feuchtigkeit lokal auf den nach außen gerichteten Bereich um die Leckageeinlassöffnung konzentriert. Tendenziell kann für jene Konstruktionsvariante die innenliegende PE-Dampfbremse als risikotoleranter bei Betrachtung des Risikopotentials anhand des Mould Index beurteilt werden. Dieser nimmt bei zunehmender Luftdichtheit drastisch ab bzw. ist bereits bei der Luftdichtheitsklasse F25 nahe null, wie Abbildung 52 zeigt. Durch eine verbesserte Luftdichtheit können bei einer innenliegenden PE-Dampfbremse im Vergleich zur feuchteadaptiven Dampfbremse Vorteile resultieren, da die Konvektion wesentlich verringert wird und man nicht auf einen hohen solaren Absorptionsgrad angewiesen ist, welcher bei Kiesauflast bzw. einem Terrassenbelag oder der Verschattung durch ein Nachbargebäude deutlich dezimiert und somit eine Umkehrdiffusion im Sommer nicht in gewünschtem Maße zulassen kann. Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen das Risikopotential für die Konstruktionsvariante FD06 für die Luftdichtheitsklasse F50 sowie F25.

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

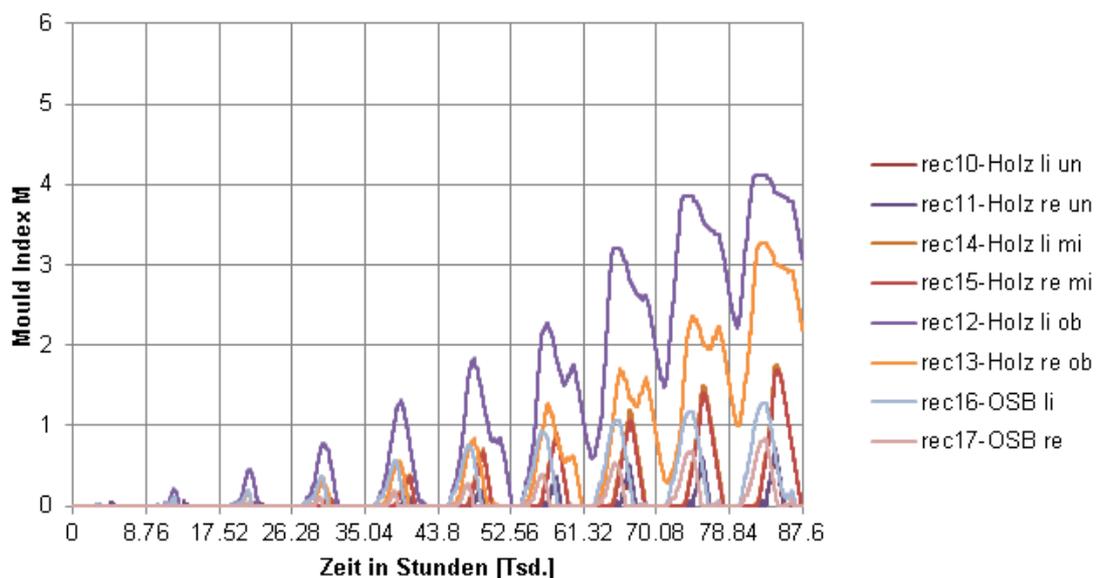


Abb. 51: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD06 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

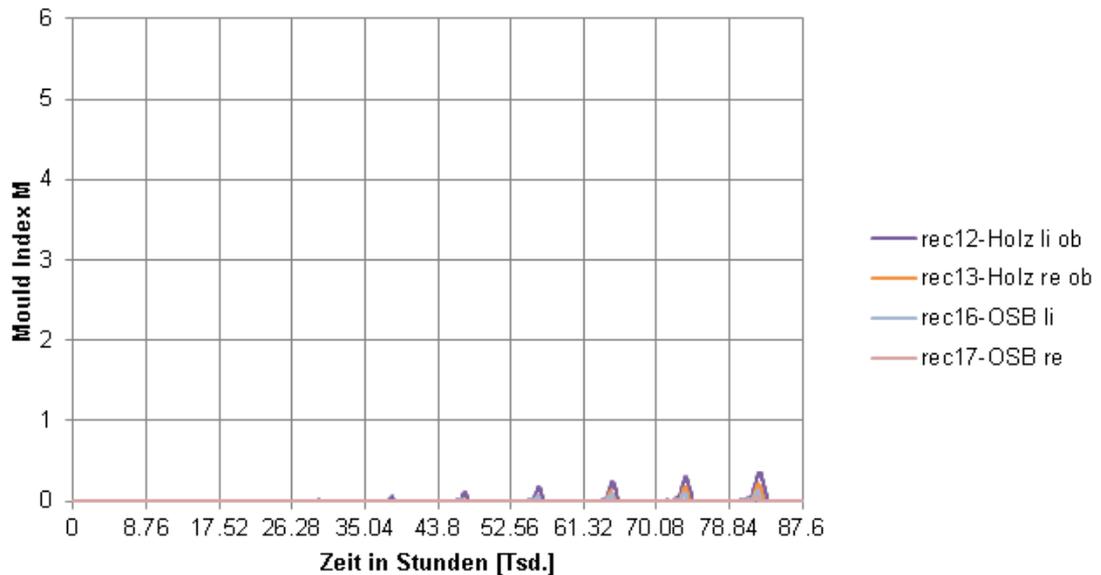


Abb. 52: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD06 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren

Für die Konstruktionsvarianten mit Zusatzwärmedämmung und Folienabdichtung ohne Kiesauflast (FD03 und FD07) konnte anhand des Modells von Viitanen et al. kein Risikopotential für Schimmelpilzbefall, weder bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse noch bei einer konventionellen PE-Dampfbremse, festgestellt werden.

Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen das Risikopotential für Schimmelpilzbefall der Konstruktionsvariante mit Zusatzdämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FD04) für die Luftdichtheitsklasse F50 und F25. Der Verlauf des Mould Index zeigt bei der Luftdichtheitsklasse F50 ausschließlich ein geringes Potential für mögliches lokales Schimmelpilzwachstum. Bei Verbesserung der Luftdichtheit auf F25 nimmt das Risiko weiterhin ab, zeigt aber im Vergleich zu jenen Konstruktionen ohne Zusatzwärmedämmung einen weniger maßgeblichen Effekt.

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

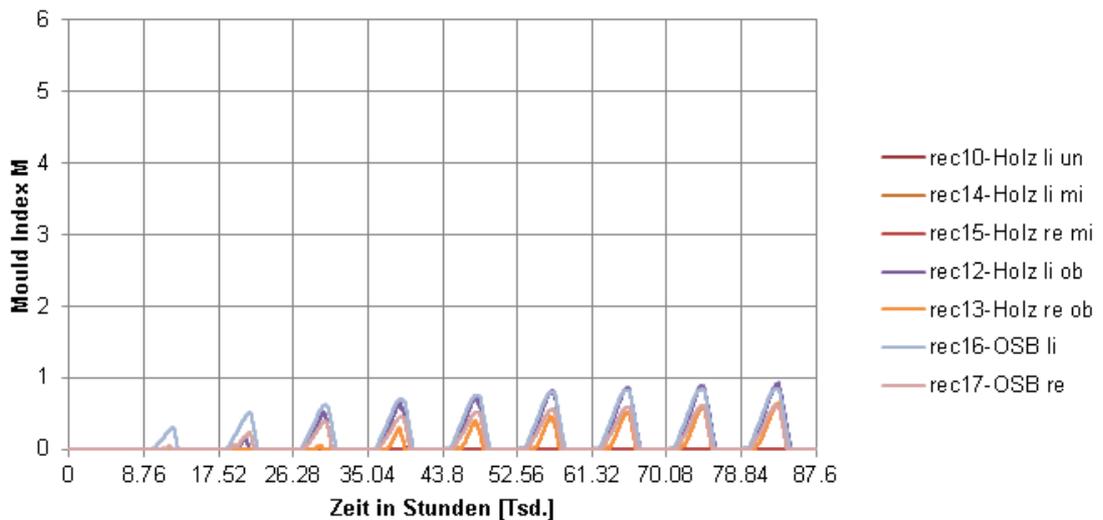


Abb. 53: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD04 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren

### Mould Index nach Ojanen, Peuhkuri, Viitanen et al. (2011)

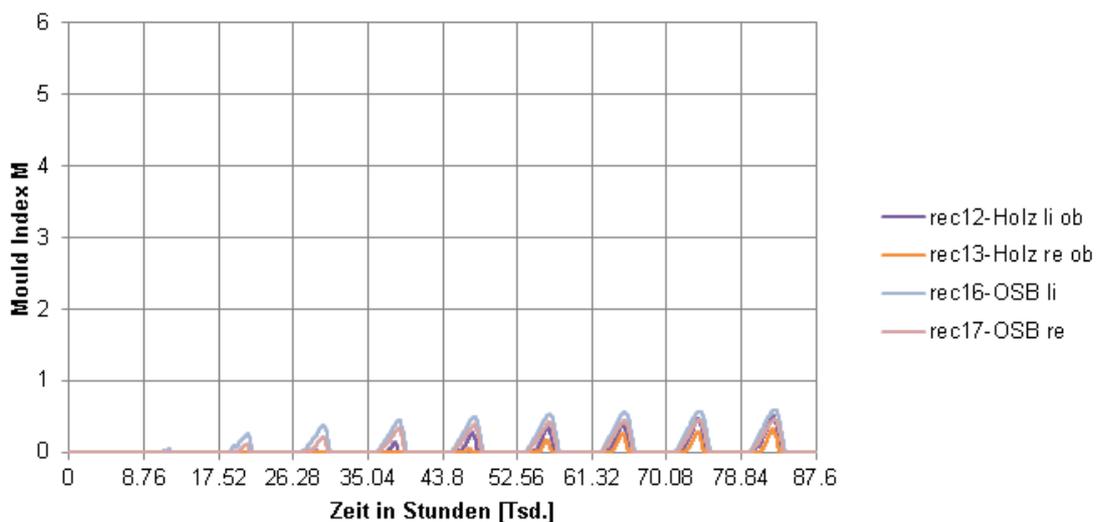


Abb. 54: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD04 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren

Abbildung 55 zeigt das marginale Risiko für Schimmelpilzbefall der Konstruktion mit Zusatzwärmedämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer PE-Dampfbremse (FD08) bei der Luftdichtheitsklasse F50. Dieses Risiko beschränkt sich nach der Berechnung von Viitanen et al. ausschließlich auf die äußere Bepankung und zeigt bei einer verbesserten Luftdichtheit von F25 keine Lebensbedingungen für Schimmelpilze mehr auf.

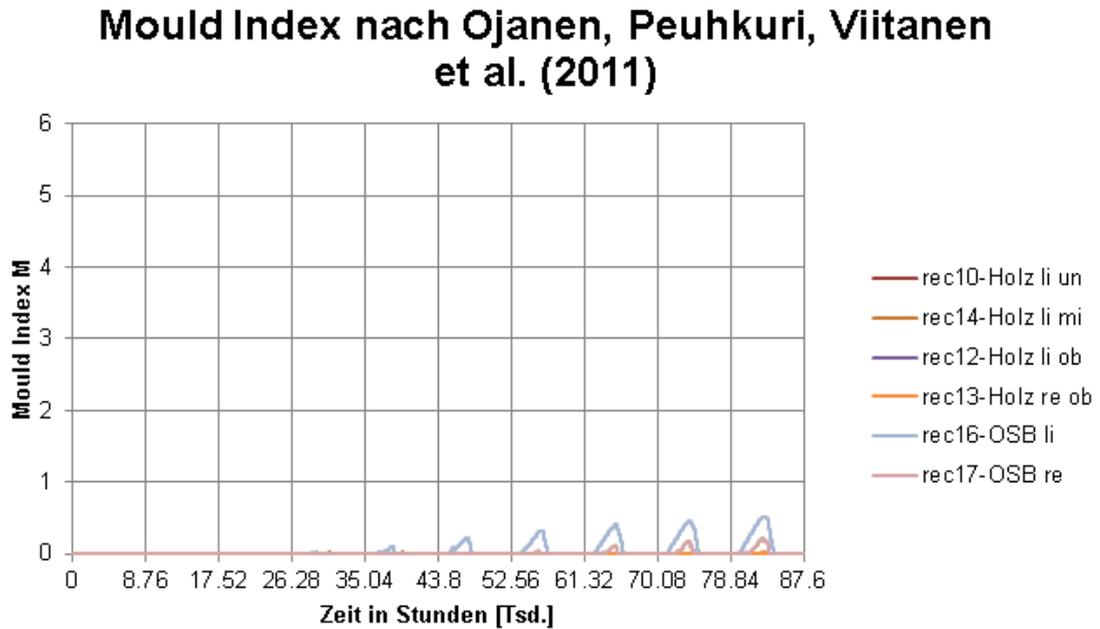


Abb. 55: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD08 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren

Die hinterlüftete Leichtbaukonstruktion in Form des Kaldaches FD10 stellt aufgrund der Diffusionsoffenheit nach außen und einer ausreichenden Belüftung durch die Außenluft kein Potential für Schimmelpilzbefall dar und gilt somit auch in dieser Hinsicht als sehr risikotolerant.

Die Massivkonstruktionen wurden in diesem Sinne nicht betrachtet, da aufgrund der produktionstechnischen Vorteile der Vorfertigung das Risiko von möglichen Leckagen in der Luftdichtheitsebene weitestgehend unterbunden wird.

### 5.3 Zusammenfassende Darstellung der Gebrauchsdauer anhand der ausgewählten Kriterien

Für die Quantifizierung der Gebrauchsdauer wurde das Kriterium des für die Gebrauchstauglichkeit zulässigen Feuchtegehalts herangezogen. Hierbei wird zwischen dem Feuchtegehalt der Konstruktion in Form der Gesamtwassermasse und den jeweiligen Feuchtegehalten der Baustoffschichten, speziell der feuchtesensiblen Baustoffe wie dem Konstruktionsholz und der Holzwerkstoffe, unterschieden. Das damit verbundene Risikopotential für Schimmelpilzwachstum soll als Indikator für einen etwaigen Befall dienen und das Bewusstsein für einen möglichen biologischen Abbauprozess schärfen. Jenes Risikopotential wird anhand des errechneten Mould Index bestimmt.

Als Referenzzeitraum für die Lebensdauer wurde der Zeitraum von 50 Jahren gewählt. Wird die Gebrauchsdauer infolge einer Überschreitung des zulässigen Feuchtegehalts bereits vor dem 50. Jahr erreicht, so müssen die Konstruktion bzw. betroffene Bauteile saniert werden.

Tab. 12: Gebrauchsdauer nach dem Kriterium der für die Gebrauchstauglichkeit zulässigen Holz- bzw. Holzwerkstofffeuchte von 20 M% (Toleranzwert)

FD	ZS-WD	FADAB	PE	Kies	Gesamtwassermasse			Feuchtegehalt äußere Beplankung			Feuchtegehalt Holzsparren		
					F50	F25	F0	F50	F25	F0	F50	F25	F0
01		x			50	50	50	50	50	50	50	50	50
02		x		x	50	50	50	4	7	50	50	50	50
03	x	x			50	50	50	50	50	50	50	50	50
04	x	x		x	50	50	50	50	50	50	50	50	50
05			x		50	50	50	50	50	50	50	50	50
06			x	x	26	50	50	12	50	50	24	50	50
07	x		x		50	50	50	50	50	50	50	50	50
08	x		x	x	50	50	50	50	50	50	50	50	50
10			x		50	50	50	50	50	50	50	50	50

Die Konstruktionen wurden je nach Bewertungskriterium für unterschiedliche Zeiträume untersucht. Bei kritischen Gegebenheiten der Konstruktion wurde der Betrachtungszeitraum für die Beurteilung ausgeweitet, um die Tendenzen für den Verlauf von 50 Jahren abschätzen zu können. Die Quantifizierung der Gebrauchsdauer nach dem sich einstellenden Feuchtegehalt wurde unter Betrachtung eines Zeitraums von zehn bzw. in den kritischen Fällen von 30 Jahren durchgeführt. Für die Abschätzung des Schimmelpilzrisikos wurden bei abnehmender Tendenz fünf Jahre und bei steigender Tendenz zehn Jahre berechnet. Da das Schimmelpilzrisikopotential keinen direkten Schluss auf die Gebrauchsdauer zulässt, wurde dieser Indikator lediglich als Hinweis für ein mögliches Versagen der Tragstruktur betrachtet und nicht in die ökonomische Bewertung mit einbezogen. Tabelle 12 zeigt die Gebrauchsdauer der untersuchten Leichtbaukonstruktionen anhand des Beurteilungskriteriums des zulässigen Feuchtegehaltes. Die grün hinterlegte Markierung weist auf eine Gleichsetzung der Gebrauchsdauer mit der Lebensdauer von 50 Jahren hin. Rot hinterlegte Markierungen weisen auf einen möglichen zu erwartenden Schadensfall und eine darauf folgende notwendige Sanierung hin. Es zeigen sich je nach betrachtetem Kriterium risikotolerante bzw. schadensrisikoreiche Konstruktionen. Die Konstruktionen FD02 und FD06 - Foliendächer mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FD02) und einer konventionellen PE-Dampfbremse (FD06) – können nach Betrachtung der ermittelten Gebrauchsdauer je Bewertungskriterium als risikoreich eingestuft werden. Für das Kriterium des zulässigen Feuchtegehaltes der äußeren Beplankung wurde der Toleranzgrenzwert von 20 M% herangezogen, da

anhand der hygrothermischen Simulationen eine Rücktrocknung festgestellt werden konnte. Für die Variante FD02 wurde bei Betrachtung der zulässigen Holzwerkstofffeuchte der äußeren Beplankung für die Luftdichtheitsklasse F0 – ohne Leckagen – die Gebrauchsdauer gleich der Lebensdauer gesetzt, da anhand der durchgeführten Simulation ausschließlich eine gewisse Annäherung an den Grenzwert verzeichnet werden konnte und aus den Ergebnissen der zehnjährigen Laufzeit keine definitive Aussage getroffen werden kann.

Mit Hilfe der quantifizierten zu erwartenden Gebrauchsdauer können im folgenden Kapitel die ökonomischen Konsequenzen für die Lebenszykluskosten dargestellt werden.

## 5.4 Ökonomische Betrachtung

### 5.4.1 Quantifizierung der Bauwerkskosten

Mit Hilfe der erstellten Ausschreibungsunterlage, welche im Anhang 8.3 hinterlegt ist und der Unterstützung durch die angefragten Holzbauunternehmen wurden die Preise bzw. Kosten für die Errichtung der betrachteten Holzbaukonstruktionen quantifiziert.

Tabelle 13 zeigt einen Überblick der untersuchten Holzrahmenkonstruktionen und Tabelle 14 jenen der betrachteten Holzmassivbaukonstruktionen.

Tab. 13: Überblick der untersuchten Holzrahmenkonstruktionen

FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD10
	5cm Kies		5cm Kies		5cm Kies		5cm Kies	Blechdeckung u. Schalung
EPDM	Hinterlüftung							
		8cm Zusatz- WD	8cm Zusatz- WD			8cm Zusatz- WD	8cm Zusatz- WD	diff.offene Unterspann- bahn
OSB	MDF/DHF							
28cm Sparren & WD	28cm Sparren & WD	20cm Sparren & WD	20cm Sparren & WD	28cm Sparren & WD	28cm Sparren & WD	20cm Sparren & WD	20cm Sparren & WD	28cm Sparren & WD
FADAB	FADAB	FADAB	FADAB	PE	PE	PE	PE	PE
MDF	OSB							

Tab. 14: Überblick der untersuchten Holzmassivkonstruktionen

FD11	FD12	FD13
Blechdeckung		
Hinterlüftung		5cm Kies
diff.offene Unterspann- bahn	EPDM	EPDM
WD	WD	WD
Abdichtung	Abdichtung	Abdichtung
Brettsper Holz NSI	Brettsper Holz NSI	Brettsper Holz NSI

Durch das Feedback der jeweiligen ausführenden Firmen wurde der Ausschreibungskatalog kontinuierlich angepasst bzw. verbessert. Grundsätzlich wurden neben den Bauwerkskosten pro m<sup>2</sup> Dachfläche für die Errichtung der Dachkonstruktion an sich ebenso die anfallenden Aufpreise für Hochzüge und

Attikaausbildung inklusive Wärmedämmung der Hochzüge, Aufpreise für Klemmprofile einschließlich Eckausbildung, Aufpreise für Gullys und sonstige dem Dachaufbau entsprechende Aufpreise abgefragt. Diese wurden je nach ausführender Firma unterschiedlich detailliert angeführt. Tabelle 15 sowie Tabelle 16 zeigen die Bauwerkskosten im Mittel über die Stichprobe von sieben retournierten Ausschreibungsunterlagen mit Standardabweichung sowie den Mittelwert der anfallenden, angeführten Aufpreise und deren Standardabweichung. Die Aufpreise wurden bei Laufmeterpreisen bei einer Dachfläche von 50 m<sup>2</sup> auf einen m<sup>2</sup> bezogen.

Tab. 15: Bauwerkskosten der jeweiligen Holzrahmenkonstruktionen und Aufpreise inklusive Standardabweichung

	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD10
Bauwerkskosten - Mittelwert	131.8 €/m <sup>2</sup>	141.6 €/m <sup>2</sup>	130.6 €/m <sup>2</sup>	139.3 €/m <sup>2</sup>	129.5 €/m <sup>2</sup>	139.3 €/m <sup>2</sup>	128.2 €/m <sup>2</sup>	136.7 €/m <sup>2</sup>	201.2 €/m <sup>2</sup>
Standardabweichung - Bauwerkskosten	9.4 €/m <sup>2</sup>	9.8 €/m <sup>2</sup>	6.1 €/m <sup>2</sup>	6.4 €/m <sup>2</sup>	9.8 €/m <sup>2</sup>	10.7 €/m <sup>2</sup>	6.1 €/m <sup>2</sup>	7.4 €/m <sup>2</sup>	14.3 €/m <sup>2</sup>
Aufpreise - Mittelwert	85.7 €/m <sup>2</sup>	85.7 €/m <sup>2</sup>	89.0 €/m <sup>2</sup>	89.0 €/m <sup>2</sup>	85.7 €/m <sup>2</sup>	85.7 €/m <sup>2</sup>	89.0 €/m <sup>2</sup>	89.0 €/m <sup>2</sup>	63.0 €/m <sup>2</sup>
Standardabweichung - Aufpreise	24.1 €/m <sup>2</sup>	24.1 €/m <sup>2</sup>	22.8 €/m <sup>2</sup>	22.8 €/m <sup>2</sup>	24.1 €/m <sup>2</sup>	24.1 €/m <sup>2</sup>	22.8 €/m <sup>2</sup>	22.8 €/m <sup>2</sup>	/

Tab. 16: Bauwerkskosten der jeweiligen Holzmassivkonstruktionen und Aufpreise inklusive Standardabweichung

	FD11	FD12	FD13
Bauwerkskosten - Mittelwert	227.2 €/m <sup>2</sup>	190.6 €/m <sup>2</sup>	179.3 €/m <sup>2</sup>
Standardabweichung - Bauwerkskosten	19.3 €/m <sup>2</sup>	16.3 €/m <sup>2</sup>	18.1 €/m <sup>2</sup>
Aufpreise - Mittelwert	63.0 €/m <sup>2</sup>	85.7 €/m <sup>2</sup>	85.7 €/m <sup>2</sup>
Standardabweichung - Aufpreise	/	24.1 €/m <sup>2</sup>	24.1 €/m <sup>2</sup>

### Bauwerkskosten - Holzrahmenbau mit Standardabweichung

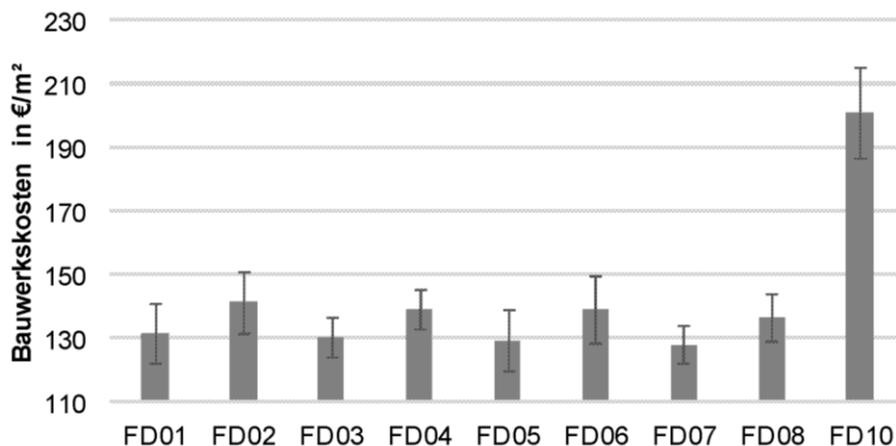


Abb. 56: Bauwerkskosten aller Holzrahmenkonstruktionen in €/m<sup>2</sup> mit Standardabweichung

## Bauwerkskosten - Holzmassivbau mit Standardabweichung

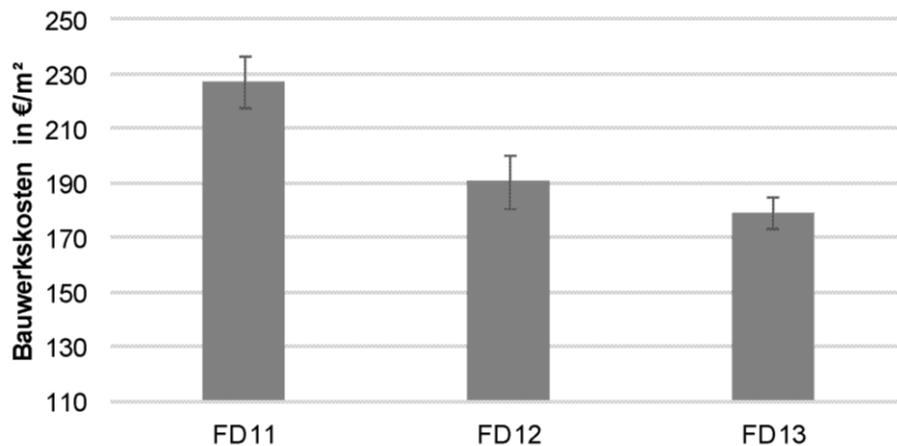


Abb. 57: Bauwerkskosten aller Holzmassivkonstruktionen in €/m<sup>2</sup> mit Standardabweichung

Abbildung 56 und Abbildung 57 stellen die Bauwerkskosten je m<sup>2</sup> Dachfläche mit Standardabweichung grafisch dar. Bezieht man die Aufpreise in die Bauwerkskosten für die Errichtung pro m<sup>2</sup> Dachfläche mit ein, so ergibt sich ein aussagekräftigeres Kostenbild, welches in Abbildung 58 veranschaulicht wird. Die Aufpreise der ergänzenden Leistungen stellen einen wesentlichen Bestandteil für die Funktionstüchtigkeit der Dachaufbauten dar und beeinflussen die Kosten pro m<sup>2</sup> erheblich.

## Bauwerkskosten inklusive Aufpreise

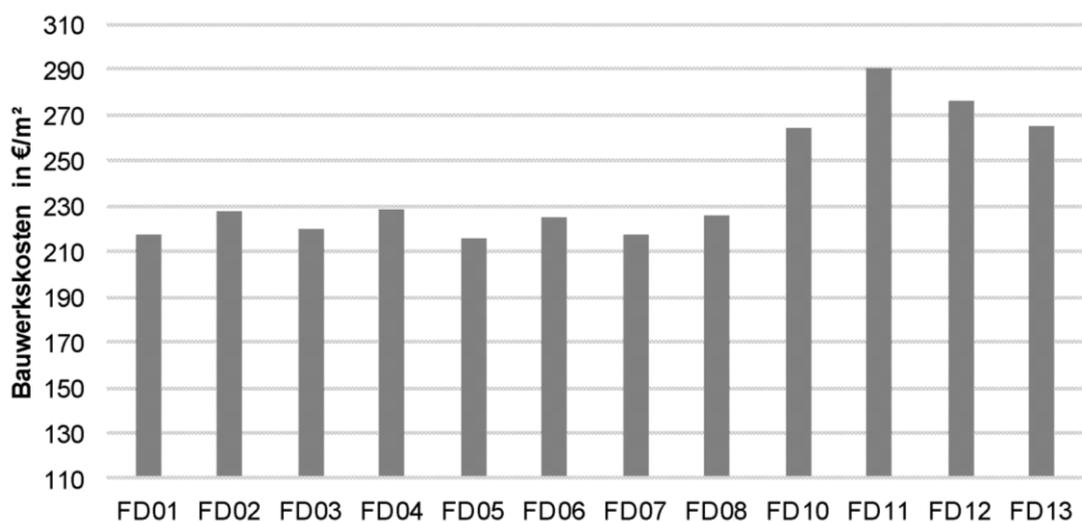


Abb. 58: Bauwerkskosten inklusive Aufpreise in €/m<sup>2</sup> Dachfläche

Die Kostenaufstellung zeigt grundsätzlich vergleichsweise höhere Errichtungspreise für Massivbaukonstruktionen sowie für hinterlüftete Aufbauten, wobei auch die Standardabweichung vergleichsweise höher ausfällt. Die Foliendachkonstruktionen in Holzrahmenbauweise weisen eine relativ homogene Kostenstruktur auf, wobei diese in einem kostengünstigeren Preissegment liegen.

#### 5.4.2 Quantifizierung der anfallenden Kosten auf die gesamte Lebensdauer

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben wurde, wird für die Ermittlung der gegenwärtigen Kosten in Bezug auf die gesamte Lebensdauer von 50 Jahren die Barwertmethode gewählt. Im vorangegangenen Kapitel 5.3 wurden die Ergebnisse der Gebrauchsdauer je Konstruktionsvariante und Beurteilungskriterium dargestellt. Entspricht die Gebrauchsdauer der Lebensdauer von 50 Jahren, ändert sich der Barwert der Bauwerkskosten nicht. Dies bedeutet eine schadensfreie Konstruktion nach dem gewählten Bewertungsparameter und stellt aufgrund des Ausbleibens zusätzlicher Sanierungskosten eine vorteilhafte Konstruktionsvariante dar.

Für die Barwertberechnung wurden die Bauwerkskosten ohne Aufpreise herangezogen, da bei einer Sanierung beispielsweise die Kosten für die Attika nicht mehr schlagend werden und es für die Veranschaulichung der gegenwärtigen Kosten bei Sanierungsfällen keine Bedeutung hat.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Gesamtwassermasse wurde der zulässige Feuchtegehalt je Baustoff anteilmäßig aufgerechnet und mit der aus den hygrothermischen Simulationen errechneten Wassermasse der Gesamtkonstruktion verglichen. Diese Aussage ist lediglich der tendenziellen Abschätzung dienlich und kann keine detaillierte Beurteilung ersetzen, da Feuchtegehaltsspitzen durch andere Baustoffe kompensiert werden können und der kritische Baustoff dadurch nicht ersichtlich wird.

Abbildung 59 zeigt, dass bei Überschreitung der zulässigen Gesamtwassermasse der Konstruktion FD06 – Foliendach mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer konventionellen PE-Dampfbremse – die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gewährt und eine Sanierung der Konstruktion notwendig wird. Infolge einer Sanierung werden erneut Kosten verursacht, welche bei dieser Bewertungsmethode bereits zum Zeitpunkt null mit einbezogen werden.

### Kosten nach Auswertung der Gesamtwassermasse der Konstruktion für F50

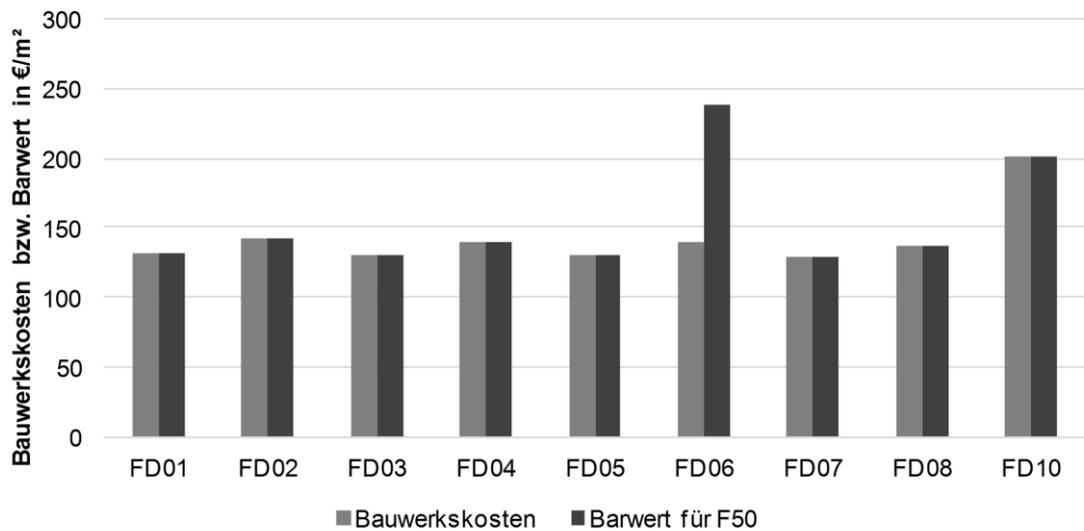


Abb. 59: Bauwerkskosten und Barwert in €/m² gemäß der Auswertung nach der Gesamtwassermasse für die Luftdichtheitsklasse F50 aller Holzrahmenkonstruktionen

Abbildung 60 veranschaulicht, dass bei der Bewertung nach der Gesamtwassermasse bei verbesserter Luftdichtheit die zulässigen Grenzwerte nicht mehr überschritten werden und keine zusätzlichen Kosten durch Sanierungsmaßnahmen anfallen.

### Kosten nach Auswertung der Gesamtwassermasse der Konstruktion

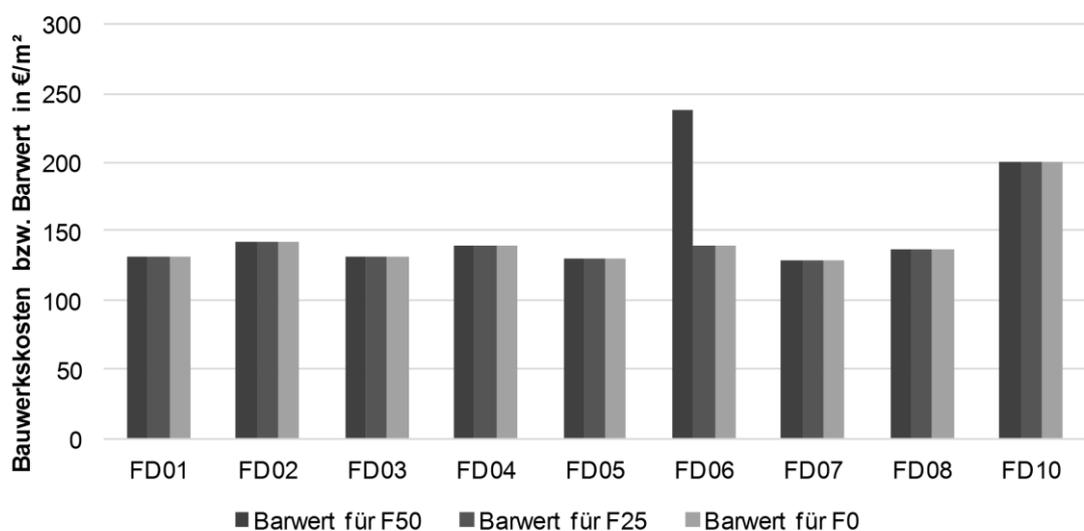


Abb. 60: Bauwerkskosten und Barwert in €/m² gemäß Auswertung nach der Gesamtwassermasse für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen

Um eine genauere Aussage über kritische Baustoffschichten tätigen zu können, wurden die einzelnen Bauteilschichten genauer analysiert. Hierbei wurden ausschließlich die Holzsparren sowie die Holzwerkstoffe an der äußeren Beplankung detaillierter betrachtet.

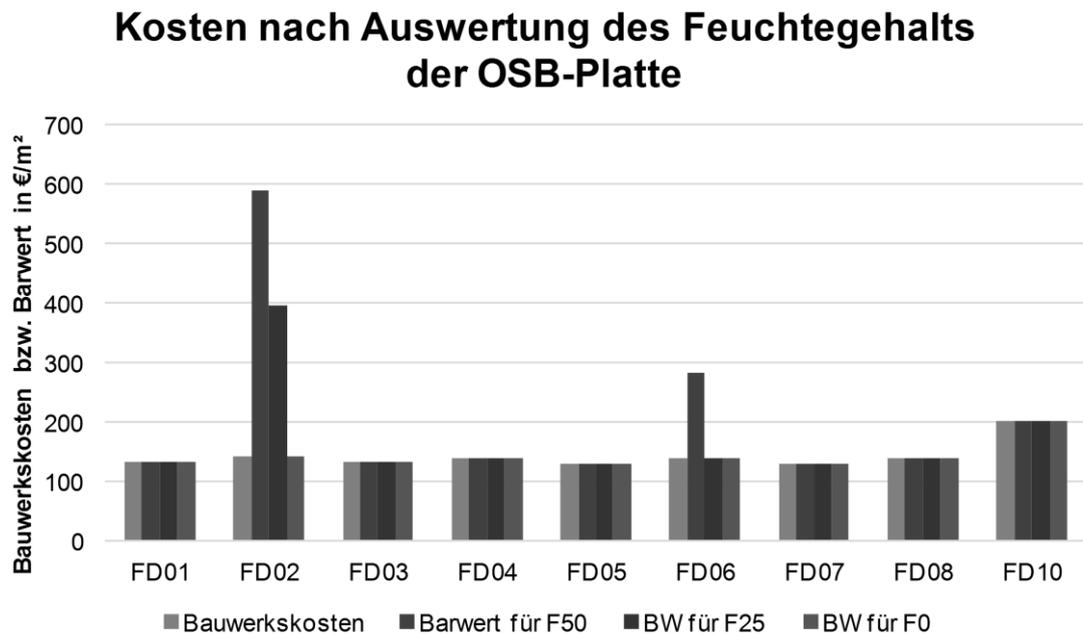


Abb. 61: Bauwerkskosten und Barwert in €/m<sup>2</sup> gemäß Auswertung nach dem Feuchtegehalt der OSB-Platte für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen

Wie in Tabelle 12 aus Kapitel 5.3 hervorgeht, wird der zulässige Feuchtegehalt der äußeren Beplankung mit der OSB-Platte unter Einbezug der Toleranz einer vorübergehenden Aufwechung bis 20 M% im Feuchtbereich unter der Voraussetzung einer Rücktrocknung innerhalb von drei Monaten gemäß DIN 68800-2 [DIN12] bei den Varianten mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast – FD02 mit feuchteadaptiver Dampfbremse und FD06 mit einer konventionellen PE-Dampfbremse – überschritten. Jene Variante mit der konventionellen Dampfbremse mit konstantem Diffusionswiderstand (FD06) zeigt bei Verbesserung der Luftdichtheit eine Verlängerung der Gebrauchsdauer, welche anhand der Ergebnisse mit der Nutzungsdauer gleichgesetzt werden kann und sich somit positiv auf den Barwert auswirkt, da keine Sanierungsmaßnahmen mehr getroffen werden müssen. Für die Konstruktionsvariante FD02 mit feuchteadaptiver Dampfbremse verlängert sich die Gebrauchstauglichkeit bei Verbesserung der Luftdichtheit stetig, wodurch die gegenwärtigen Kosten für die Errichtung und die zu tätigen Sanierungsmaßnahmen verringert werden können. Diese Tatsache stellt jedoch die Ausführungsvariante grundsätzlich in Frage, da anhand der im Vergleich nur kurzfristigen Gebrauchstauglichkeit immer wieder kehrender Sanierungsbedarf besteht und sich

dies maßgeblich auf die gegenwärtigen Kosten für diese Konstruktion auswirkt. Eine uneingeschränkte Wiederholung derselben Sanierungsmaßnahme erscheint folglich nicht sinnvoll.

Die Holztragkonstruktion erweist sich aufgrund derer Dimension und der Feuchteverteilung über den Querschnitt nach dem Beurteilungskriterium des zulässigen Feuchtegehalts für den gesamten Sparrenquerschnitt im Vergleich zur Holzwerkstoffplatte als weniger kritisch. Es treten jedoch teilweise hohe Feuchteschwankungen innerhalb des Sparrens auf, wodurch die Rissbildung durch das Quell- und Schwindverhalten begünstigt wird. Wie Abbildung 62 verdeutlicht, wird nach dem beschriebenen Bewertungskriterium ausschließlich die Konstruktion FD06 - Foliendach mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer konventionellen PE-Dampfbremse – sanierungsbedürftig. Dadurch entstehen zusätzliche Kosten zu jenen der Errichtung. Dieses Ergebnis deckt sich mit jenem nach der Auswertung der Gesamtwassermasse. Dies zeigt, dass je nach Dimension des Baustoffes auch die Gesamtwassermasse der Konstruktion aussagekräftig sein kann.

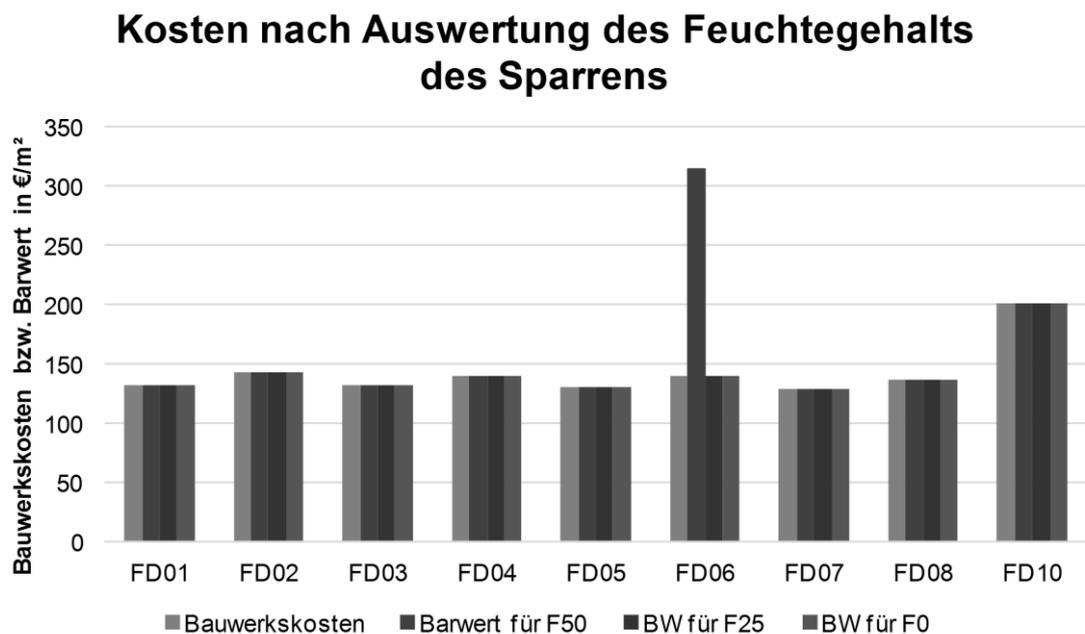


Abb. 62: Bauwerkskosten und Barwert in €/m² gemäß Auswertung nach dem Feuchtegehalt des Holzsparrens für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen

Nach der Auswertung des Risikopotentials für Schimmelpilzwachstum konnte für die äußere Beplankung in Form von Holzwerkstoffplatten kein erhebliches Risiko für den betrachteten Zeitraum von zehn Jahren errechnet werden. Trotz kritischer Bedingungen in jenem Bereich, wie bei der Betrachtung des oberen Sparrenbereichs nahe der äußeren Beplankung an manchen Konstruktionen ersichtlich wurde, ist das

Material einer Holzwerkstoffplatte weniger sensibel und somit weniger anfällig für Schimmelpilzbefall als das Konstruktionsholz. Kritische Umstände konnten für das Konstruktionsholz bei den Varianten FD02 und FD06 – Foliendach mit Kiesauflast, zum einen mit feuchteadaptiver Dampfbremse und zum anderen mit einer konventionellen PE-Dampfbremse mit Hilfe des Modells von Viitanen et al. errechnet werden. Da der Mould Index ausschließlich das Risikopotential widerspiegelt, wurde dieser alleinig zum Zwecke der Sensibilisierung für einen biologischen Befall aufgezeigt und nicht im Sinne der Gebrauchsdauer betrachtet.

Zusammenfassend können mit Hilfe der Barwertberechnung die Varianten FD02 und FD06, je nach Bewertungskriterium, nach Einbezug zu erwartender Sanierungsmaßnahmen als sehr kostenintensiv zum gegenwärtigen Zeitpunkt beurteilt werden.

#### **5.4.2.1 Quantifizierung der Wartungs- bzw. Instandhaltungskosten**

Es wurden lediglich von drei der sieben Unternehmen Angaben zu den Kosten für Wartung und Instandhaltung angeführt. Aufgrund der kleinen Stichprobe und der hohen Schwankungsbreite dieser Kosten, wurden diese in Tabelle 17 detailliert aufgezeichnet. Die Mittelwertbildung mit Standardabweichung erweist sich unter diesen Umständen nicht als sinnvoll. Firma A und Firma C wiesen die Wartungs- sowie Instandhaltungskosten in Pauschalpreisen aus. Firma B setzte die Kosten in Form einer Materialpauschale und einem Stundensatz für anberaumte Arbeitsstunden, je Konstruktionsvariante, zusammen. Die Wartungskosten pro Jahr und Dachfläche liegen im Bereich von 220 € bis zu 580 €. Die Instandhaltungskosten pro Jahr und Dachfläche reichen von einer Pauschale mit 100 € bis über 1600 € über alle Konstruktionsvarianten. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass hinterlüftete Konstruktionen mit einer Blecheindeckung vergleichsweise die geringsten Instandhaltungskosten aufweisen. Aufgrund der hohen Streuung der Werte wird ausschließlich ein Überblick über mögliche Kosten für Wartung und Instandhaltung geschaffen. Die Kosten sind stark vom Unternehmen und dessen Einschätzung abhängig.

Tab. 17: Überblick über die Kostenschätzung zu Wartung und Instandhaltung

Kostenschätzung		FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD10	FD11	FD12	FD13
Fa. A	Wartungsvertrag pro Jahr - PA	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €	220 €
	Instandhaltungskosten pro Jahr - PA	823 €	1459 €	1482 €	1624 €	813 €	1443 €	1048 €	1609 €	85 €	49 €	85 €	79 €
Fa. B	Wartungsvertrag pro Jahr	580 €	580 €	580 €	580 €	580 €	580 €	580 €	580 €	484 €	484 €	484 €	/
	Instandhaltungskosten pro Jahr	440 €	372 €	440 €	490 €	634 €	488 €	634 €	684 €	294 €	294 €	392 €	/
Fa. C	Wartungsvertrag pro Jahr - PA	300 €	300 €	300 €	300 €	300 €	300 €	300 €	300 €	150 €	150 €	300 €	300 €
	Instandhaltungskosten pro Jahr - PA	100 €	100 €	100 €	100 €	100 €	100 €	100 €	100 €	50 €	50 €	100 €	100 €

## **6 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse**

Um den Einfluss der Zuverlässigkeit der untersuchten hölzernen Flachdachkonstruktionen auf die Lebenszykluskosten zu eruieren, wurden in der vorliegenden Arbeit vor allem die Holzrahmenkonstruktionen genauer analysiert, da vorwiegend bei dieser Konstruktionsart erhebliche Feuchteschäden in der Vergangenheit beobachtet wurden. Diese Art der Bauweise wird aufgrund ihrer geringen Konstruktionshöhe und des geringen Eigengewichts oft als Lösung bei beispielsweise eingeschränkten statischen Gegebenheiten herangezogen. Die Zuverlässigkeit der Konstruktionsvariante resultiert in der Gebrauchsdauer, welche anhand von hygrothermischen Simulationen ermittelt wurde. Aufgrund der Verwendung des natürlichen Rohstoffes Holz und dessen Verhalten in Bezug auf Feuchteeinwirkung wurden die Beurteilungskriterien für die Gebrauchstauglichkeit auf den Feuchtegehalt bzw. den sich einstellenden hygrothermischen Umständen innerhalb der Konstruktion beschränkt.

Diffusionsprozesse sind beim Feuchtetransport im Vergleich zum konvektiven Transportmechanismus von untergeordneter Bedeutung, deshalb wurde die Luftdichtheit der Konstruktion innerhalb einer Bandbreite von  $n_{50} \leq 3$  [1/h] (F50) über  $n_{50} \leq 1,5$  [1/h] (F25) zu einem theoretischen Ansatz von  $n_{50} = 0$  [1/h] (F0) variiert, um den Einfluss von Leckagen im Sinne der Gebrauchsdauer deutlicher aufzeigen zu können. Ein Wert von  $n_{50} \leq 3$  [1/h] ist bei ausschließlicher Betrachtung der Dachkonstruktion sehr hoch gegriffen und sollte in der Praxis in der Regel nicht vorkommen.

Für die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit wurden die festgesetzten zulässigen Feuchtegehalte in Massenprozent herangezogen und die Gebrauchsdauer beim Erreichen des Grenzwertes festgelegt. Unter Einbezug der Toleranz für den Feuchtbereich von Holzwerkstoffen gemäß DIN 68800-2 [DIN12] kann die Gebrauchsdauer unter Berücksichtigung der Rücktrocknung innerhalb von drei Monaten auf 20 Massenprozent Holzwerkstofffeuchte erhöht werden. Nach diesem Gesichtspunkt ist bei der Beurteilung der äußeren Beplankung in Form der OSB-Platten bei der Luftdichtheitsklasse F50 jedoch auch die Konstruktionsvariante FD02 – Foliendach mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse – bereits nach vier Jahren über einem Feuchtegehalt von 20 M% und ist somit auch unter Einbezug der Zusatzklausel nicht mehr gebrauchstauglich. Dieses Verhalten setzt sich bei einer verbesserten Luftdichtheit von F25 fort und zeigt auch bei einer theoretisch vollkommenen

Luftdichtheit steigende Tendenzen in Richtung des Grenzwertes von 20 M% auf. Diese Tatsache kann auf die diffusionsoffene Wirkung der feuchteadaptiven Dampfbremse in den Sommermonaten zurückzuführen sein, da durch die Bekiesung der Dachfläche geringere Oberflächentemperaturen an der Dachhaut resultieren und somit die gewünschte Umkehrdiffusion nicht in erwartetem Maße wirkend werden kann. Bei der Variante FD06, jener mit FD02 vergleichbaren Konstruktionsvariante mit einer innenliegenden PE-Dampfbremse, erreicht das Feuchtemaximum bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nach zwölf Jahren den tolerablen Grenzwert von 20 M% und kann im Gegensatz zu FD02 ausschließlich durch die längere Gebrauchsdauer den Barwert positiv beeinflussen, jedoch nicht auf eine schadensfreie Konstruktion bei Betrachtung der Lebensdauer von 50 Jahren rückschließen lassen. In der ökonomischen Betrachtung wurde die Gebrauchsdauer nach Erreichen des Grenzwertes von 20 Massenprozent herangezogen, da jener Feuchtegehalt gemäß DIN 68800-2 [DIN12] bei einer kurzfristigen Erhöhung tolerabel ist. Unter Einbezug des Toleranzgrenzwertes wird die Sanierung der Beplankung bei der Variante FD02 und FD06 zu einem späteren Zeitpunkt notwendig und somit auch der Barwert bzw. die gegenwärtigen Kosten im Vergleich zur Gebrauchsdauer beim Grenzwert von 18 Massenprozent etwas geringer. Die Konstruktionsvarianten mit Zusatzwärmedämmung und Kiesauflast (FD04 und FD08) weisen eine Annäherung bzw. Überschreitung der zulässigen Holzwerkstofffeuchte von 18 M% bei dreißigjähriger Simulationslaufzeit der Luftdichtheitsklasse F50 auf, können aber unter Berücksichtigung der Toleranzfeuchte von 20 M% als gebrauchstauglich über den untersuchten Zeitraum betrachtet werden. Nach den gewonnenen Ergebnissen kann festgehalten werden, dass die Planung und Ausführung der luftdichten Ebene von maßgeblicher Bedeutung ist und Foliendachkonstruktionen ohne Kiesauflast bzw. ohne einer Beschattung der Dachfläche wesentlich weniger anfällig für hygrische Schäden in der Konstruktion sind.

Bei der ausschließlichen Betrachtung der Holztragkonstruktion zeigt sich das enorme Feuchtespeichervermögen von Holz und dessen Transportprozesse entlang des Gradienten. Trotz hoher Feuchtelasten vor allem bei einer Luftdichtheit von  $n_{50} \leq 3$  [1/h] wird eine Überschreitung des zulässigen Feuchtegehalts für den Sparrenquerschnitt ausschließlich bei der Variante FD06 – Foliendach mit Kiesauflast und konventioneller PE-Dampfbremse - nach mehr als zwei Jahrzehnten mit steigender Tendenz erreicht. Bei einer Verbesserung der Luftdichtheit und einer damit resultierenden geminderten Wasserdampfkonvektion wird auch der zulässige Grenzwert nicht mehr überschritten und die Konstruktionsvariante erweist sich auf Grundlage dieses Bewertungskriteriums als gebrauchstauglich. Aufgrund der erhöhten Anfälligkeit von Holz gegenüber holzerstörenden Organismen bei zunehmendem

Feuchtegehalt wurden Positionen am Sparrenrandbereich in Punkto Risikopotential für Schimmelpilzwachstum untersucht. Hierfür wurden deren Lebensbedingungen, wie die sich einstellende Temperatur und Feuchtigkeit über einen Zeitverlauf, in den unterschiedlichen Konstruktionsvarianten sowie der Ausführung der Luftdichtheitsebene betrachtet und mit Hilfe des Mould Index veranschaulicht. Als augenscheinlich kritisch stellen sich erneut die Varianten FD02 und FD06 – Foliendächer mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast, einerseits mit Ausführung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FD02) und andererseits mit einer konventionellen PE-Dampfbremse (FD06) – dar. Aufgrund einer unzureichend ausgeprägten Umkehrdiffusion durch die Reduktion des solaren Absorptionsverhaltens der Dachhaut über die feuchteadaptive Dampfbremse, stellt sich ein Feuchtestau im oberen Bereich des Sparrens nahe der äußeren Beplankung ein. Somit kann auch in den Sommermonaten neben den konvektiven Einträgen durch die diffusionsoffene Dampfbremse feuchte Luft in die Konstruktion diffundieren. Jener Anteil ist anhand der Ergebnisse des Risikopotentials für Schimmelpilzwachstum verhältnismäßig hoch, da auch bei einer verbesserten Luftdichtheit von  $n_{50} \leq 1,5$  [1/h] (F25) ein relativ hohes Risiko bestehen bleibt. Bei der Verwendung einer konventionellen PE-Dampfbremse (FD06) schwindet mit zunehmender Luftdichtheit auch das Risikopotential für Schimmelpilzwachstum, da sowohl konvektive Einträge gemindert als auch Einträge aus Diffusionsprozessen durch die Dampfbremse selbst weitestgehend unterbunden sind. Da als Wachstumsvoraussetzung für Schimmelpilze ebenso das Substrat von wesentlicher Bedeutung ist und jenes in Holzwerkstoffen weniger attraktiv bzw. verfügbar als bei Vollholz ist, konnte für die äußere Beplankung in Form der OSB-Platten kein bedeutendes Risiko ermittelt werden. Die Konstruktionsvarianten mit Zusatzwärmedämmung zeigten im Bereich der Holztragkonstruktion keine erhöhten Materialfeuchten auf und auch das Risiko für Schimmelpilzwachstum war kaum bis nicht vorhanden. In dieser Hinsicht sind jene Varianten mit Zusatzwärmedämmung positiv zu beurteilen.

Zusammenfassend können, nach dem mit einbeziehen der Toleranz für kurzfristige Auffeuchtung von Holzwerkstoffen auf 20 M%, jene Foliendächer mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast unter Betrachtung aller Beurteilungskriterien als äußerst kritisch und nicht für die gesamte Lebensdauer gebrauchstauglich eingestuft werden und mit einem hohen Sanierungsbedarf behaftet sein. Die Bauwerkskosten der Foliendachkonstruktionen in Holzrahmenbau liegen annähernd im gleichen Preissegment, folglich sollten die Kosten für die Errichtung der Dachfläche in Form einer Holzrahmenkonstruktion kein maßgebliches Auswahlkriterium für den Konsumenten darstellen. Daraus kann abgeleitet werden, dass beim Wunsch einer

Kiesschüttung bzw. der Nutzung als Terrasse die Konstruktion mit Zusatzwärmedämmung zu empfehlen ist. Holzmassivbaukonstruktionen liegen in einem deutlich höheren Preissegment, können jedoch bei Sichtoberfläche Einsparungen bei der Verkleidung mit sich bringen und als Feuchtepuffer fungieren. Im Vergleich zum Holzrahmenbau weisen Massivholzbauelemente klar getrennte Funktionsschichten auf. Die risikotoleranteste Variante stellt die Kaltdachvariante dar, wobei diese auch die kostenintensivste bei Berücksichtigung der Aufpreise ist. Es konnte jedoch auch eine Tendenz zu geringeren laufenden Kosten für Wartung und Instandhaltung beobachtet werden.

## 7 **Ausblick**

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass das Innenklima und die raumseitige Feuchtelast, welche stark nutzerabhängig sind, sowie das Außenklima für den Untersuchungsrahmen als Konstanten unterstellt wurden. Es wurde lediglich der Leckagenvolumenstrom variiert. Da die vorherrschenden Klimata sowie die standortabhängige solare Strahlung in Verbindung mit der Lufttemperatur das thermohygrische Verhalten maßgeblich beeinflussen, könnten vor allem jene Konstruktionsvarianten, welche den Grenzwert für die Gebrauchstauglichkeit überschreiten bzw. sich jenem annähern, einer probabilistischen Untersuchung unterzogen werden, um alle möglichen Variablen abzubilden.

## 8 Anhang

### 8.1 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Wassergehaltsbereiche in einem feinporigen, hygroskopischen Baustoff [FIS08].....	7
Abb. 2: Auszug aus der Materialdatenbank.....	9
Abb. 3: Klimadatenauszug.....	9
Abb. 4: schematische Modellstruktur der untersuchten Holzleichtbaukonstruktionen .....	10
Abb. 5: zulässige Materialfeuchten von Holzwerkstoffen [DIN12] .....	13
Abb. 6: Zeitverlauf des gemessenen Mould-Index in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Baumaterialien bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 97 % [SED01 nach RIT00] .....	15
Abb. 7: Sensitivität auf Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit des Materials. Illustration der Vorhersage von Schimmelpilzwachstum nach Sensitivitätsklasse in Abhängigkeit der Zeit unter konstanten Bedingungen von 97 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 22 °C. [VII11] .....	17
Abb. 8: Darstellung der Wachstumsbedingungen anhand der Parameter relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur [VII11].....	18
Abb. 9: nicht durchlüftetes Flachdach mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion [DAT15] .....	23
Abb. 10: nicht durchlüftetes Flachdach mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion und Zusatzdämmung [DAT15].....	24
Abb. 11: durchlüftetes Flachdach mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion [DAT15] .....	25
Abb. 12: durchlüftetes Flachdach – Massivholzbau [DAT15].....	25
Abb. 13: nicht durchlüftetes Flachdach – Massivholzbau [DAT15].....	26
Abb. 14: Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers [NIE93] .....	28
Abb. 15: Sorptionsverhalten von HF-gebundenen Spanplatten, MDF, Massivholzplatten aus Fichte und Fichten-Vollholz bei 20 °C [WAG08].....	29
Abb. 16: Holzfeuchte von Holzwerkstoffen und Holz für Bauzwecke [WAG08] .....	29
Abb. 17: Wasserdampfdiffusionswiderstand der feuchtevariablen Dampfbremse pro clima DB+ .....	30
Abb. 18: Innenraumklima im Jahreszyklus.....	32
Abb. 19: Außentemperatur im Jahresverlauf .....	32
Abb. 20: Relative Luftfeuchtigkeit des Außenklimas im Jahresverlauf .....	33
Abb. 21: Absolute Luftfeuchtigkeit im Innenraum im Dezember, Januar und Februar bei Anwendung des in Abbildung 18 dargestellten Innenklimas und des Außenklimas nach Kapitel 4.2.2.2 gemäß ÖNORM EN ISO 13788 [ISO02] .....	33
Abb. 22: Solare Einstrahlung im Jahresverlauf.....	34
Abb. 23: Druckdifferenz zwischen innen und außen bei einem Höhenunterschied von 6m .....	36
Abb. 24: Position der Leckagen. Einström- und Ausströmlokalisation.....	36

Abb. 25: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 aller nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen.....	38
Abb. 26: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD02 – Vollsparrendämmte Konstruktion mit Kiesauflast und feuchteadaptiver Dampfbremse; die Gesamtwassermasse wird ohne der Wassermasse der Kiesschüttung aufgezeigt.....	39
Abb. 27: Gesamtwassermassenverlauf über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD06 – Vollsparrendämmte Konstruktion mit Kiesauflast und PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ ); die Gesamtwassermasse wird ohne der Wassermasse der Kiesschüttung aufgezeigt.....	39
Abb. 28: Gesamtwassermassenverlauf über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50/ F25/ F0 (ohne Leckage) der hinterlüfteten Leichtbaukonstruktion FD10 – Vollsparrendämmte Konstruktion mit PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ ).....	40
Abb. 29: Gesamtwassermassenverlauf über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der Massivbaukonstruktionen.....	41
Abb. 30: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung .....	42
Abb. 31: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung .....	43
Abb. 32: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung .....	43
Abb. 33: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast.....	44
Abb. 34: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung .....	44
Abb. 35: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung .....	45
Abb. 36: Feuchtegehaltverlauf der oberen Beplankung über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F0 (ohne Leckage) der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung .....	45
Abb. 37: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 10 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit Vollsparrendämmung und Zusatzwärmedämmung .....	47
Abb. 38: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F50 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung .....	47
Abb. 39: Feuchtegehaltverlauf der Tragkonstruktion (nahe der Leckagen-Auslassöffnung) über 30 Jahre für die Luftdichtheitsklasse F25 der nicht hinterlüfteten Leichtbaukonstruktionen mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast.....	48
Abb. 40: schematische Skizze zu den aufgezeichneten Recorderpositionen .....	49
Abb. 41: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung ohne Kiesauflast mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse .....	50

Abb. 42: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung ohne Kiesauflast mit einer PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ ) .....	51
Abb. 43: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse .....	52
Abb. 44: jahreszeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der Zellen an den Recorderpositionen über ein Jahrzehnt für die Luftdichtheitsklasse F50 des nicht hinterlüfteten Leichtbaudaches mit ausschließlicher Vollsparrendämmung und Kiesauflast mit einer PE-Dampfbremse ( $s_d=100m$ )	52
Abb. 45: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD01 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 .....	55
Abb. 46: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD05 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 .....	55
Abb. 47: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD05 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 5 Jahren .....	56
Abb. 48: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	57
Abb. 49: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	58
Abb. 50: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD02 bei der Luftdichtheitsklasse von F0 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	58
Abb. 51: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD06 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	59
Abb. 52: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD06 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	60
Abb. 53: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD04 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	61
Abb. 54: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD04 bei der Luftdichtheitsklasse von F25 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	61
Abb. 55: Risikopotential von Schimmelpilzbefall anhand des Mould Index für die Konstruktion FD08 bei der Luftdichtheitsklasse von F50 für den Zeitraum von 10 Jahren .....	62
Abb. 56: Bauwerkskosten aller Holzrahmenkonstruktionen in €/m <sup>2</sup> mit Standardabweichung ...	66
Abb. 57: Bauwerkskosten aller Holzmassivkonstruktionen in €/m <sup>2</sup> mit Standardabweichung ...	67
Abb. 58: Bauwerkskosten inklusive Aufpreise in €/m <sup>2</sup> Dachfläche .....	67
Abb. 59: Bauwerkskosten und Barwert in €/m <sup>2</sup> gemäß der Auswertung nach der Gesamtwassermasse für die Luftdichtheitsklasse F50 aller Holzrahmenkonstruktionen .....	69
Abb. 60: Bauwerkskosten und Barwert in €/m <sup>2</sup> gemäß Auswertung nach der Gesamtwassermasse für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen .....	69
Abb. 61: Bauwerkskosten und Barwert in €/m <sup>2</sup> gemäß Auswertung nach dem Feuchtegehalt der OSB-Platte für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen .....	70
Abb. 62: Bauwerkskosten und Barwert in €/m <sup>2</sup> gemäß Auswertung nach dem Feuchtegehalt des Holzsparrens für die Luftdichtheitsklassen F50, F25 und F0 aller Holzrahmenkonstruktionen...	71

## 8.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mould Index in Abhängigkeit der prozentuellen Flächenbedeckung und verbale Beschreibung [VII11].....	16
Tab. 2: Parameter nach Sensitivitätsklasse [VII11] .....	17
Tab. 3: Überblick der untersuchten Holzrahmenkonstruktionen.....	22
Tab. 4: Aufbau FD01 und FD05 – Foliendach ohne Auflast.....	23
Tab. 5: Aufbau FD02 und FD06 – Flachdach mit Auflast.....	23
Tab. 6: Aufbau FD03 und FD07 – Flachdach mit Zusatzdämmung ohne Auflast .....	24
Tab. 7: Aufbau FD04 und FD08 – Flachdach mit Zusatzdämmung mit Auflast .....	24
Tab. 8: Aufbau FD10 – Kaltdach.....	25
Tab. 9: Aufbau FD11 – Kaltdach Holzmassiv .....	26
Tab. 10: Aufbau FD12 und FD13 – Holzmassivbau, nicht durchlüftet.....	26
Tab. 11: Effektiver Emissionsgrad und Absorptionsgrad der Dachhaut [HOH04] .....	34
Tab. 12: Gebrauchsdauer nach dem Kriterium der für die Gebrauchstauglichkeit zulässigen Holz- bzw. Holzwerkstofffeuchte von 20 M% (Toleranzwert) .....	63
Tab. 13: Überblick der untersuchten Holzrahmenkonstruktionen.....	65
Tab. 14: Überblick der untersuchten Holzmassivkonstruktionen.....	65
Tab. 15: Bauwerkskosten der jeweiligen Holzrahmenkonstruktionen und Aufpreise inklusive Standardabweichung.....	66
Tab. 16: Bauwerkskosten der jeweiligen Holzmassivkonstruktionen und Aufpreise inklusive Standardabweichung.....	66
Tab. 17: Überblick über die Kostenschätzung zu Wartung und Instandhaltung.....	73

### **8.3 Ausschreibungsunterlage**

**BVH – EINFAMILIENHAUS**  
*Kostenschätzung verschiedener  
hölzerner  
Flachdachkonstruktionsvarianten*

Inhalt:

- Projektbeschreibung
- Detailinformationen zu den untersuchten hölzernen Flachdachkonstruktionen
  - Kostenschätzung der Errichtung
  - Schätzung der Wartungskosten mit Wartungsvertrag
  - Schätzung der Instandhaltungskosten der Dachfläche

## Projektbeschreibung

Gegenstand des hier beschriebenen Projekts ist die Errichtung eines Einfamilienhauses bzw. eines Kleingartenhauses in Holzbauweise. Jenes Gebäude ist vollflächig unterkellert geplant und verfügt über zwei oberirdische Geschosse, welche durch eine hölzerne Flachdachkonstruktion horizontal hermetisch abgeschlossen sind.

Auszug aus der Baubeschreibung:

Holzbauweise in Niedrigenergiequalität

Zur Gänze unterkellert, 2 oberirdische Geschosse

Wohnfläche auf EG und OG ca. 100 m<sup>2</sup>

**Grundriss: 5 m\*10 m → 50 m<sup>2</sup> Dachfläche**

keine Wohnraumlüftung

**KALKULATIONSBASIS FÜR AUFPREISE:**

**50 M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE**

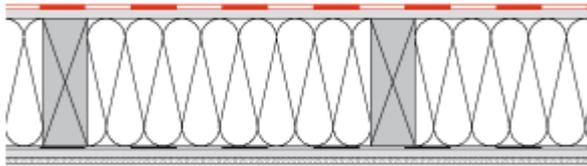
Detailinformationen zu den untersuchten hölzernen Flachdachkonstruktionen – Kostenschätzung der Errichtung/ Einschätzung der Wartungskosten mit Wartungsvertrag/ Einschätzung der Instandhaltungskosten

(Abbildungen der Konstruktionsvarianten, Quelle: www.proholz.at; www.dataholz.at)

Konstruktionsvariante 1: Flachdach – Holzrahmenbau, nicht hinterlüftet

Variationen in puncto:

- innenliegender Dampfbremse (feuchteadaptive Dampfbremse/ konventionelle Dampfbremse  $s_d = 100 \text{ m}$ )
- Dachabschluss nach oben hin (EPDM-Folie/ Kiesschüttung)



a) FD01

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP <sup>1</sup> )	Lohnanteil <sup>2</sup>	Anteil Sonstiges <sup>3</sup>
6	EPDM schwarz	1,5				
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x140	0,038			
3	KVH-Fichte	100x280	0,09			
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4\text{m}$ ]	0,23	0,13			
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>**

**EURO**

<sup>1</sup> EP...Einheitspreis

<sup>2</sup> Die Aufschlüsselung in Lohnanteil und

<sup>3</sup> Anteil Sonstiges (u.a. Materialanteil) ist nicht zwingend notwendig, die Kalkulationsbasis Positionspreis oder Trennung in Lohnanteil und Anteil Sonstiges ist frei (je nach Kalkulationstypus der Firma) zu wählen.

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE & ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M] EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE] EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDE AUFPREISE EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)** EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)** EURO

b) FD05

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
6	EPDM schwarz	1,5				
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x140	0,038			
3	KVH-Fichte	100x280	0,09			
2	PE Folie – Dampfbremse (s <sub>d</sub> =100m)	0,2				
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>** EURO

AUFPREISE W.O. SIEHE FD01

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)** EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)** EURO

c) FD02

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
7	Schüttung Kies 16/32	50	0,7			
6	EPDM schwarz	1,5				
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x140	0,038			
3	KVH-Fichte	100x280	0,09			
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4m$ ]	0,23	0,13			
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE &amp; ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M]

EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG

EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE]

EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDEN AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

d) FD06

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
7	Schüttung Kies 16/32	50	0,7			
6	EPDM schwarz	1,5				
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x140	0,038			
3	KVH-Fichte	100x280	0,09			
2	PE Folie – Dampfbremse (s <sub>d</sub> =100m)	0,2				
1	MDF	15	0,07			

---

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>**
**EURO**

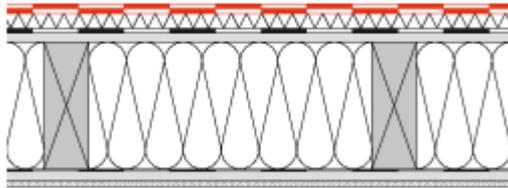
AUFPREISE W.O. SIEHE FD02

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)**
**EURO**
**KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)**
**EURO**

**Konstruktionsvariante 2: Flachdach – Holzrahmenbau mit Zusatzwärmedämmung, nicht hinterlüftet**

Variationen in puncto:

- innenliegender Dampfbremse (feuchteadaptive Dampfbremse/ konventionelle Dampfbremse  $s_d = 100 \text{ m}$ )
- Dachabschluss nach oben hin (EPDM-Folie/ Kiesschüttung)



a) FD03

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
8	EPDM schwarz	1,5				
7	EPS W20	80	0,038			
6	Vlies					
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x100	0,038			
3	KVH-Fichte	100x200	0,09			
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4\text{m}$ ]	0,23	0,13			
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>**

**EURO**

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE & ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M]

EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG

EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE]

EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDE AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)**

**EURO**

**KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

b) FD07

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
8	EPDM schwarz	1,5				
7	EPS W20	80	0,038			
6	Vlies					
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x100	0,038			
3	KVH-Fichte	100x200	0,09			
2	PE Folie – Dampfbremse (s <sub>d</sub> =100m)	0,2				
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

AUFPREISE W.O. SIEHE FD03

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

c) FD04

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
9	Schüttung Kies 16/32	50	0,7			
8	EPDM schwarz	1,5				
7	EPS W20	80	0,038			
6	Vlies					
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x100	0,038			
3	KVH-Fichte	100x200	0,09			
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+) [ $s_d=0,4-4m$ ]	0,23	0,13			
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE &amp; ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M]

EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG

EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE]

EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDE AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

d) FD08

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
9	Schüttung Kies 16/32	50	0,7			
8	EPDM schwarz	1,5				
7	EPS W20	80	0,038			
6	Vlies					
5	OSB/3	18	0,13			
4	Mineralwolle	2x100	0,038			
3	KVH-Fichte	100x200	0,09			
2	PE Folie – Dampfbremse (s <sub>d</sub> =100m)	0,2				
1	MDF	15	0,07			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>**

**EURO**

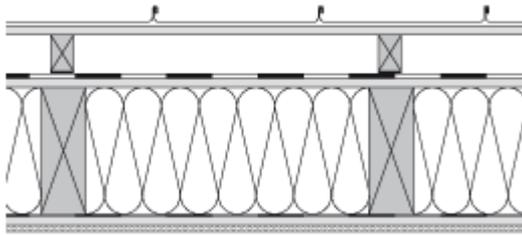
AUFPREISE W.O. SIEHE FD04

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)**

**EURO**

**KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)**

**EURO**

Konstruktionsvariante 3: Flachdach – Holzrahmenbau, hinterlüftet

a) FD10

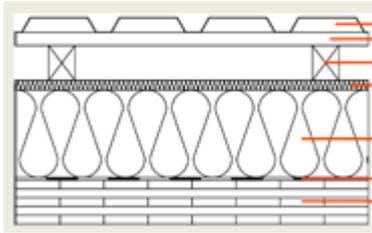
Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
9	Dacheindeckung – Blecheindeckung					
8	Dachschalung/ Lattung & Konterlattung					
7	Hinterlüftungsebene/ Nageldichtband					
6	diffusionsoffene Unterspannbahn mit erhöhter Regensicherheit	0,72				
5	OSB/3	15(18)	0,13			
4	Mineralwolle	2x140	0,038			
3	KVH-Fichte	100x280	0,09			
2	PE Folie – Dampfbremse (s <sub>d</sub> =100m)	0,2				
1	OSB/3	15(18)	0,13			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHENDE AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

Konstruktionsvariante 4: Flachdach – Holzmassivbau, hinterlüftet

a) FD11

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
7	Blecheindeckung					
6	Holz Fi Lattung	30	0,13			
5	Holz Fi Konterlattung	80	0,13			
4	diffusionsoffene Unterspannbahn [s <sub>d</sub> =0,02m] mit erhöhter Regensicherheit	0,72				
3	Aufsparren-Dämmplatte	200	0,035 <sup>4</sup>			
2	Abdichtungsbahn s <sub>d</sub> ≥500m					
1	Brettsperrholz	100	0,13			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHENDE AUFPREISE

EURO

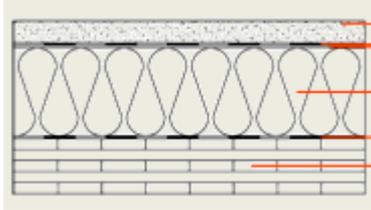
**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

<sup>4</sup> Vereinheitlichung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes auf  $\lambda=0,04$  W/mK (vgl. FD12/ FD13) in den hygrothermischen Simulationen; die Angabe der Kosten durch die ausführenden Unternehmen wurde jedoch durch die Verschiedenartigkeit des Dämmmaterials in der Ausschreibungsunterlage beeinflusst.

**Konstruktionsvariante 5: Flachdach – Holzmassivbau, nicht hinterlüftet**

Variation in puncto:

- Dachabschluss nach oben hin (Kiesschüttung/ EPDM-Folie)



a) FD12

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
6	Schüttung Kies 16/32	50	0,7			
5	Trennvlies					
4	EPDM schwarz	1,5				
3	Steinwolle MW-PT (2*100)	200	0,04			
2	Abdichtungsbahn $s_d \geq 500m$ (z.B.Bitumen)					
1	Brettsperrholz	125	0,13			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE &amp; ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M]

EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG

EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE]

EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDE AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

b) FD13

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\lambda$ in W/(mK)	Kosten gesamt pro m <sup>2</sup> (EP)	Lohnanteil	Anteil Sonstiges
4	EPDM schwarz	1,5				
3	Steinwolle MW-PT (2*100)	200	0,04			
2	Abdichtungsbahn $s_d \geq 500m$ (z.B.Bitumen)					
1	Brettsperrholz	125	0,13			

**KOSTENSCHÄTZUNG DER ERRICHTUNG PRO M<sup>2</sup>****EURO**

AUFPREIS FÜR HOCHZÜGE &amp; ATTIKAAUSBILDUNG (INKL. WD DER HOCHZÜGE)[5M\*10M]

EURO

AUFPREIS FÜR KLEMMPROFILE, EINSCHLIEßLICH ECKAUSBILDUNG

EURO

AUFPREIS FÜR GULLYS [50M<sup>2</sup> DACHFLÄCHE]

EURO

SONSTIGE DEM DACHAUFBAU ENTSPRECHEND ANFALLENDE AUFPREISE

EURO

**KOSTENSCHÄTZUNG DER WARTUNG M. WARTUNGSVERTRAG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO****KOSTENSCHÄTZUNG DER INSTANDHALTUNG PRO JAHR UND DACHFLÄCHE (50M<sup>2</sup>)****EURO**

## 9 Literatur

[CAR09] Carll, Charles; Wiedenhoeff, Alex: Moisture-related properties of wood and the effects of moisture on wood and wood products. In: Trechsel, Heinz R.; Bomberg, Mark T. (Hrsg): Moisture control in buildings: the key factor in mold preventions. 2. Auflage. West Conshohocken, PA: ASTM International, c2009. Kapitel 4, 54-79; 2009

[DAT15] dataholz.com, Service der Holzforschung Austria. <http://dataholz.com/>. Aktualisierungsdatum: 07.05.2014

[EN94] ÖNORM EN 350-2:1994-12: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Dezember 1994

[DIN11] DIN 68800-1:2011-10: Holzschutz – Teil 1: Allgemeines. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Oktober 2011

[DIN12] DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Februar 2012

[DIN90] DIN 1343:1990-01: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen. Begriffe und Werte. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Januar 1990

[FIS08] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann, Martin; Freymuth, Hanns; Richter, Ekkehard; Häupl, Peter: Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. GWV Fachverlage GmbH, 2008

[GEY06] Geyer, Alois; Hanke, Michael; Littich, Edith; Nettekoven, Michaela: Grundlagen der Finanzierung. verstehen – berechnen – entscheiden. 2. Auflage. Wien: Linde Verlag Wien GmbH, 2006

[HEN12] Hens, Hugo: Building Physics. Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. 2. Auflage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2012

[HOH04] Hohmann, Rainer; Setzer, Max J.; Wehling, Martin: Bauphysikalische Formeln und Tabellen. Wärmeschutz – Feuchteschutz – Schallschutz. 4., neu bearbeitete Auflage. München: Werner Verlag, 2004

[ISO02] ÖNORM EN ISO 13788:2002-01: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Januar 2002

[ISO13] ÖNORM EN ISO 13788:2013-04: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, April 2013

[EN07] ÖNORM EN 15026:2007-06: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Juni 2007

[KRU95] Krus, Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Stuttgart. Universität Stuttgart, 1995

[LUT02] Lutz, Peter; Jenisch, Richard; Klopfer, Heinz; Freymuth, Hanns; Krampf, L.; Petzold, Karl: Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 5. Auflage. Stuttgart/ Leipzig/ Wiesbaden: Teubner GmbH, 2002

[NIE93] Niemz, Peter: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., 1993

[NUS10a] Nusser, Bernd; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung. Bauphysik 32 (2010) Heft 3, 132-143

[NUS10b] Nusser, Bernd; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung. Bauphysik 32 (2010) Heft 4, 219-225

[NUS10c] Nusser, Bernd; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metaldächer. Bauphysik 32 (2010) Heft 5, 288-295

[NUS10d] Nusser, Bernd; Bednar, Thomas; Teibinger, Martin: Euro-Glaser unter Beachtung solarer Strahlungs-/Absorptionsbedingungen sowie druckinduzierter Feuchteinträge im Vergleich zu dynamischen Simulationen. Third German-Austrian IBPSA Conference BauSIM 2010. Technische Universität Wien, 2010. In: Mahdavi, Ardeshir; Martens, Bob (Hrsg): Building Performance Simulation in a Changing Environment. 535-541

[ONO03] ÖNORM B 8110-2:2003-07: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Juli 2003

[ONO09] ÖNORM B 8101-1:2009-06: Bauprojekt- und Objektmanagement. Teil 1: Objekterrichtung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Juni 2009

[SED01] Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2001

[SED10] Sedlbauer, Klaus; Schunck, Eberhard; Barthel, Rainer; Künzel, Hartwig M.: Flachdach Atlas. Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser GmbH, 2010

[VER11] Vereecken, Evy; Saelens, Dirk; Roels, Staf: A comparison of different mould prediction models. Proceedings of Building Simulation 2011: 12<sup>th</sup> Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney, November 2011

[VII11] Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo; Peuhkuri, Ruut; Vinha, Juha; Lähdesmäki, Kimmo; Salminen, Kati: Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials. International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto-Portugal, April 2011

[WAG08] Wagenführ, André; Scholz, Frieder [Hrsg]: Taschenbuch der Holztechnik. München: Carl Hanser Verlag, 2008

[WIN09] Winter, Stefan; Fülle, Claudia; Werther, Norman: Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Konstruktionen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009

[ZIN13] Zingerle, Martin: Entwicklung einer statistischen Methode für die Ermittlung der erforderlichen Stichprobengröße zur Qualitätssicherung der Luftdichtheit von Gebäuden. Diplomarbeit. Wien: Technische Universität Wien, 2013