

Stefan Winter, Claudia Fülle, Norman Werther

**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**



F 2736

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8154-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



**Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das
Bauwesen (MFPA) Leipzig mbH**
Geschäftsbereich IV Bauphysik
Hans-Weigel-Str. 2 b, 04319 Leipzig

www.mfpa-leipzig.de



Technische Universität (TU) München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21, 80333 München

www.hb.bv.tum.de

Abschlussbericht

**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**

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) e.V.
aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR):

Z 6 - 10.08.18.7-07.18

Autoren: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Dipl.-Ing. Claudia Fülle
Dipl.-Ing. Norman Werther

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Leipzig, 15.05.2009

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
VORWORT	1
1 EINFÜHRUNG	3
1.1 Ausgangssituation - Problemstellung.....	3
1.2 Ziele des Forschungsvorhabens	5
1.3 Grundlagen	6
1.3.1 Konstruktionsgrundsätze für Flachdächer in Holzbauweise	6
1.3.2 Hygrothermische Simulation	13
1.3.3 Fazit.....	14
2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	15
2.1 Versuchsstand Leipzig	15
2.1.1 Konstruktiver Aufbau.....	15
2.1.2 Messtechnische Erfassung	28
2.2 Hygrothermische Simulation	30
2.2.1 Materialkennwerte.....	30
2.2.2 Klimamessdaten	34
3 ERGEBNISSE	40
3.1 Ergebnisse Versuchsstand	40
3.1.1 Oberflächentemperaturen – Deckschichteinfluss	40
3.1.2 Varianten Schwarze Bahn.....	44
3.1.3 Varianten Gründach.....	50
3.2 Hygrothermische Simulation - Versuchsgebäude	54
3.2.1 Varianten Schwarze Bahn.....	55
3.2.2 Varianten Gründach.....	60
3.3 Hygrothermische Simulation - Parameterstudien	65
3.3.1 Grundsätzliches	65
3.3.2 Parameterstudien zu Varianten Schwarze Bahn	67
3.3.3 Parameterstudien zu Varianten Gründach	76
4 BESTEHENDE OBJEKTE	80
5 ZUSAMMENFASSUNG	90
LITERATURVERZEICHNIS	94
ANHANG	97

Vorwort

Das Forschungsvorhaben „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 zukunftsgerichteter Konstruktionen“ wurde am Bereich Bauphysik der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH (MFPA Leipzig) in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München im Zeitraum von September 2007 bis April 2009 durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben diente der systematischen Untersuchung der hygrothermischen Verhältnisse bei einschaligen Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise mit oberseitiger dampfdichter Abdichtung und raumseitiger feuchtevariabler Sperrschicht. Dabei wurden verschiedene Aufbauten, die sich in der raumseitigen diffusionshemmenden Schicht, dem Gefachdämmstoff und der Art der Deckschicht über der außenseitigen Abdichtung unterschieden, experimentell untersucht. Für zusätzliche Untersuchungen und Parameterstudien an weiteren Konstruktionsvarianten und für variierende klimatische Verhältnisse wurden hygrothermische Simulationsrechnungen durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse sollen konstruktive Randbedingungen abgeleitet werden, bei denen hygrothermische Verhältnisse auftreten, die eine dauerhafte und schadensfreie Konstruktion ermöglichen.

Die Autoren danken dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) und dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) für die Förderung des Projektes und der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) für die Koordination des Forschungsvorhabens.

Wir danken den Firmen EGGER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, Kronoply GmbH, GLUNZ AG, isofloc Wärmedämmtechnik GmbH, MOLL bauökologische Produkte GmbH, Henkel AG & Co.KGaA - Bautechnik Deutschland – WOLFIN und Optigrün international AG für die finanzielle Unterstützung und Bereitstellung von Sachmitteln zur Erstellung des Versuchsgebäudes sowie den zahlreichen Ingenieuren und Holzbauern, die Informationen zu gebauten Objekten zur Verfügung stellten.

Besonderer Dank geht an Dipl.-Ing. Daniel Kehl (Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau) für sein Engagement bei der Projektbeantragung, Dipl.-Ing. Hans Wollny (MFPA Leipzig) für die Unterstützung bei der messtechnischen Betreuung sowie allen Mitarbeitern der MFPA Leipzig, die zu Erstellung und Entwicklung des Versuchsstandes beigetragen haben.

Weiterhin richtet sich unser Dank an die projektbegleitende Arbeitsgruppe: Dipl.-Ing. Richard Adriaans, AKÖH Arbeitskreis Ökologischer Holzbau e.V.; Robert Borsch-Laaks, Sachverständiger für Bauphysik; Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel und Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach, Fraunhofer-Institut für Bauphysik; Dipl.-Ing. Wolfgang Schäfer, Gütegemeinschaft Deutscher

Fertigbau e.V., Verband des Zimmerer- und Holzbaugewerbes des Landes Baden-Württemberg; Ahmed Al Samarraie und Jürgen Küllmer, isofloc Wärmedämmtechnik GmbH; Dipl.-Ing. Jana Sprockhoff, EGGER Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG; Dipl.-Ing. Stefan Gottfried, Kronoply GmbH; Dr. Stefan Remme und Dipl.-Ing. Thomas Schmidtke, GLUNZ AG; Dipl.-Ing. Lothar Moll und Dipl.-Ing. Michael Förster, Moll bauökologische Produkte GmbH; Gerd Hecker, Henkel KGaA; Dipl.-Ing. Martin Fischer, DGfH e.V., Dipl.-Ing. Hubertus Quitt, Deutsches Institut für Bautechnik; Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau - Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und Walter Bauer, Bauer Holzbau GmbH, für die Anregungen und Diskussionsbeiträge, die zum Gelingen dieses Forschungsvorhabens maßgeblich beigetragen haben.

Leipzig, 15.05.2009

Die Autoren

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation - Problemstellung

In den vergangenen Jahren galten Flachdachkonstruktionen oft als architektonisch uninteressant. Aktuell ist aber festzustellen, dass von Bauherren und Architekten, besonders im Verwaltungs- und Industriebau, aber auch im privaten Sektor, wieder vermehrt Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise nachgefragt und ausgeführt werden, was Abb. 1 eindrucksvoll belegt.

Dabei stehen bei Planern und Ausführenden besonders nachhaltige Konstruktionen, mit einschaligem schlanken und energetisch effizienten, hoch gedämmten Aufbau, unter Anwendung von ökologischen Baustoffen und ohne chemischen Holzschutz, im Fokus der Baupraxis. Diese Ausführungen weichen jedoch oft wesentlich von den normativen Vorgaben der DIN 68800-2 [27] und anerkannten Fachregeln ab und sind zum Teil als bauphysikalisch kritisch zu bewerten.



Abb. 1 Montessorischule Erding, Holzrahmenbau mit begrüntem einschaligen Flachdachaufbau

Bereits in den 60-er bis 90-er Jahren des 20. Jahrhunderts war infolge verschiedener Wohnungsbauprogramme und architektonischer Einflüsse eine große Nachfrage bei Flachdachkonstruktionen, auch im Bereich der Holzbauindustrie, zu verzeichnen. Systematische Untersuchungen zu einschaligen Aufbauten ohne Unterlüftung der Dachhaut, mit vollständiger Dämmung in der Gefachebene, sind jedoch auch aus dieser Periode nicht bekannt.

Anmerkungen wie im Holzbauhandbuch [1] zeigen jedoch, dass bezüglich schlanker, beiderseits mit diffusionshemmenden Schichten ausgeführter Flachdachaufbauten Skepsis bestand, da sie bei Einwirkung außerplanmäßiger Feuchte stark gefährdet sein können.

„Solche Konstruktionen haben sich in der Vergangenheit als schadensträchtig erwiesen, da der chemische Holzschutz bei solchen Bauteilquerschnitten bei ungewollt auftretender Feuchte nicht in der Lage ist, allgemeine Bauschäden zu verhindern. Deshalb sollten sie nur

in Ausnahmefällen angewandt werden“ [1]. In den Hinweisen zur Anwendung von Holzwerkstoffen der DIN 68800-2 [27] spiegeln sich diese Anmerkung ebenfalls wider. „Von solchen Konstruktionen wird wegen der Möglichkeit ungewollt auftretender Feuchte, z.B. Tauwasserbildung infolge Wasserdampf-Konvektion, im Allgemeinen abgeraten...“.

Aktuelle instationäre Berechnungen [2] mit feuchtedynamischen Simulationsprogrammen bestätigen diese Aussagen für die Ausführung mit beidseitig dampfdichten Konstruktionen nochmals - sie zeigen aber auch, dass neuartige Materialien wie feuchtevariable Dampfbremsen zu sicheren Flachdachkonstruktionen beitragen können. Eine Validierung anhand von Freilanduntersuchungen erfolgte jedoch nicht.

Anhand dieser Aussagen wird ersichtlich, dass es sich bei normkonformen Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise um kritische Konstruktionen handelt, die von Planern und Ausführenden auch aus nachfolgenden Gründen nicht angewendet werden:

- sie entsprechen häufig nicht den architektonischen Wünschen der Planer nach schlanken Konstruktionsaufbauten,
- heutige Dämmstandards führen zu hohen Dachaufbauten,
- sie sind aufwändig herzustellen und damit unwirtschaftlich,
- neuartige, feuchtevariable Dampfbremsen und Holzwerkstoffe, die zur Bauschadensfreiheit beitragen, sind aufgrund der Reglementierung nicht bzw. nur bedingt anwendbar,
- die Ausführung ist vorrangig nur mit Mineralfaserdämmstoffen zulässig, d.h. der Einsatz nachwachsender und ökologischer Dämmstoffe bedingt aufwändige Einzelnachweise und
- mit der Einführung europäischer Produktnormen im Bereich der Holzwerkstoffe verschwinden die bekannten Klasseneinteilungen vom Markt, die bei der Errichtung von Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise nach gültiger DIN 68800-2 gefordert werden.

Sensibilisiert durch aktuell aufgetretene Bauschäden wächst die Unsicherheit bezüglich angemessener, bauphysikalisch sicherer einschaliger Konstruktionsaufbauten ohne Unterlüftung der Dachhaut. Bislang liegen diesbezüglich jedoch keine systematischen Untersuchungen vor, welche die hygrothermischen Verhältnisse bei diesen Flachdachaufbauten beschreiben. Hinzu kommt, dass innovative und ökologische Baumaterialien durch die Anforderungen der Norm ausgeschlossen werden, da diese bei Erscheinen der DIN 68800-2 im Jahr 1996 noch nicht existierten bzw. nicht verbreitet waren. Ökologische Dämmstoffe als auch bereits erwähnte Holzwerkstoffe und Folienmaterialien (Oriented Strand Boards; feuchteadaptive Dampfbremsen) lassen sich demzufolge nur über umfangreiche Einzelnachweise zur Anwendung bringen. Allerdings können die Eigenschaften dieser Baustoffe dazu beitragen, dass einschalige, hochgedämmte und zudem sichere Holzkonstruktionen im Flachdachbereich entstehen. So weisen Dämmstoffe

aus nachwachsenden Rohstoffen im Gegensatz zu mineralischen Fasern sorptive Eigenschaften auf, was kurzzeitig erhöhte Feuchten innerhalb der Konstruktion kompensieren kann. Holzwerkstoffplatten und Dampfbremsen mit feuchtevariablen Eigenschaften erhöhen durch ihre Diffusionseigenschaften das Austrocknungspotenzial und bieten die effiziente Möglichkeit, Feuchtigkeit im Sommer in den Raum abzuführen. Weiterhin kommt es durch die standardmäßige Verwendung von trockenen Hölzern und durch die Verbesserung der Luftdichtheit in den letzten 10 Jahren zu einem geringeren Feuchteeintrag in die Konstruktion.

Auf Basis solcher Erkenntnisse können die infolge des bisherigen Normungsansatzes aufgetretenen Bauschäden deutlich minimiert werden und innovative Konstruktionsaufbauten mit ökologischen Baustoffen und Dampfbremsmaterialien entstehen.

Um gleichzeitig den stetigen Veränderungen von Konstruktionen und Werkstoffen im Bauwesen gerecht zu werden, ist es zudem sinnvoll, hygrothermische Berechnungswerkzeuge und Datensätze zu validieren, mit deren Hilfe es zukünftig möglich sein wird, von der Norm abweichende Konstruktionen nachzuweisen.

1.2 Ziele des Forschungsvorhabens

Ziel der Untersuchungen ist es, anhand von systematischen Freilandversuchen Daten zu den hygrothermischen Verhältnissen in unbelüfteten, einschaligen, hochgedämmten Flachdachkonstruktionen mit oberseitiger dampfdichter Abdichtung in Abhängigkeit von den Außenklimabedingungen für verschiedene konstruktive Aufbauten zu gewinnen. Anhand dieser experimentellen Untersuchungen erfolgt die Validierung weiterführender instationärer numerischer Bauteilsimulationen, über die Aussagen zum hygrothermischen Verhalten der Konstruktion bei abweichenden Aufbauten und klimatischen Randbedingungen getroffen werden können. Mit Hilfe dieser Parameterstudie werden Grenzwertbetrachtungen für nicht im Feldversuch abgedeckte Aufbauten durchgeführt. Dabei steht vor allem die Ermittlung des Gefährdungspotentials für Holz und Holzwerkstoffe infolge der sich einstellenden klimatischen Verhältnisse in der Konstruktion unter variierenden Randbedingungen im Zentrum der Fragestellung.

Im Rahmen der Untersuchungen werden folgende Punkte diskutiert:

- inwieweit durch den Einsatz von feuchtevariablen Dampfbremsen und Holzwerkstoffplatten sowie diffusionshemmenden Abdichtungsbahnen das Gefährdungsrisiko für die Konstruktion gesenkt werden kann,
- welche Kriterien beim Einsatz von ökologischen Gefachdämmstoffen, wie Zellulose- oder Holzweichfasern zu erfüllen sind,

- welchen Einfluss die Ausbildung der Deckschichten (Farbe der Abdichtungsbahn, Gründach, bekiest oder verschattet) auf das Feuchteverhalten im Gefach hat,
- unter welchen Randbedingungen eine Gefährdung der Holzbauteile ausgeschlossen und auf chemischen Holzschutz verzichtet werden kann und
- welche mit CE-Kennzeichnung versehenen Holzwerkstoffe zukünftig in diesem Einsatzbereich Anwendung finden können.

Aufgrund dieser Daten sollen dauerhafte und robuste Konstruktionsaufbauten mit ausreichendem Sicherheitsniveau abgeleitet werden. Zukünftige Schadensfälle infolge fehlender Erfahrungen und veralteter normativer Grundsätze sowie betriebswirtschaftliche Einbußen für Unternehmen lassen sich darüber vermeiden.

Ein Vergleich der aktuellen baulichen Situation an bereits ausgeführten Objekten dient zur Erweiterung der Datenbasis des Versuchsstandes. Abgeleitete Konstruktionsregeln sowie deren Umsetzung für die Baupraxis können darüber sichergestellt werden. Fragestellungen bezüglich des Risikos eines Schimmelpilzbefalls in der Konstruktion von einschaligen Flachdachaufbauten sowie zur fachgerechten Ausbildung der Abdichtung werden in nachfolgender Abhandlung angesprochen, jedoch nicht allumfassend diskutiert.

1.3 Grundlagen

1.3.1 Konstruktionsgrundsätze für Flachdächer in Holzbauweise

Im Bereich des Holzbaus werden immer mehr Flachdächer ausgeführt. Konstruktiv und bauphysikalisch zählen diese jedoch zu den anspruchvollsten Bauelementen. Die geringe Dachneigung, mit in der Regel von mindestens 2 %, führt im Vergleich zu Steildachkonstruktionen hier zur reduzierten Ableitung des Oberflächenwassers. In der Planungsphase müssen daher bereits auftretende Nutzlasten, wie Dachaufbauten oder anfallender Schnee, sowie Kriechinflüsse zur Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen Berücksichtigung finden. Konstruktionen mit geringen Dachneigungen, aber auch Aufbauten mit Deckschichten, die z.B. zur Wasserspeicherung beitragen, werden als Sonderkonstruktionen bezeichnet (vgl. Abb. A - 1). Für Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise werden im Allgemeinen Neigungen $\geq 5\%$ empfohlen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der flächigen Abdichtung zu. Anforderungen für nicht genutzte Dächer werden in der DIN 18531 [5] beschrieben. Für genutzte Dächer, die jedoch in Holzbauweise weniger vertreten sind, ist zusätzlich DIN 18195-5 [6] zu berücksichtigen. Das erforderliche Abdichtungssystem (Materialart, Dicke und Lagenzahl) wird in Abhängigkeit von der Anwendungskategorie und erwarteter Beanspruchung definiert.

Zur Erstellung von Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise stehen zwei grundsätzliche Konstruktionsprinzipien zur Verfügung.

Belüftete Flachdachkonstruktionen:

Belüftete Flachdachkonstruktionen können ebenfalls in zwei Gruppen eingeteilt werden (vgl. Abb. 2 und Abb. 3). Einerseits kann die Belüftung in der Tragebene, direkt über der Dämmung erfolgen (Kaltdachkonstruktion). Durch die meist ungenügende Dämmung und ihre planmäßige Durchströmung wird den heutigen Anforderungen an den sommerlichen und winterlichen Wärmeschutz jedoch nicht mehr entsprochen. Andererseits werden in der Tragebene voll ausgedämmte Konstruktionen, mit Unterdeckung und darauf aufgesetzter, unterlüfteter Dachhaut ausgeführt. Dieses Konstruktionsprinzip basiert auf der Annahme, dass aus dem Innenraum eingedrungene Diffusionsfeuchtigkeit durch die Belüftung abgeführt werden kann [10]. Um dies zu gewährleisten, muss ein ausreichender Luftwechsel sichergestellt werden, was besonders bei Flachdachkonstruktionen zu hinterfragen ist.

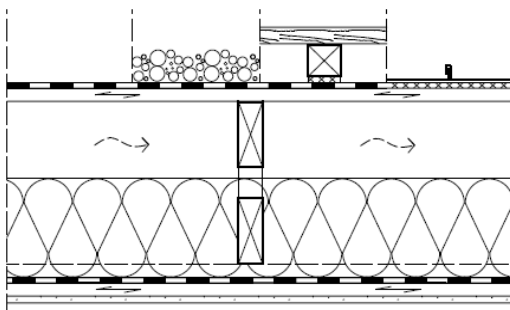


Abb. 2 Teildämmung Belüftung innerhalb der Tragkonstruktion [3]

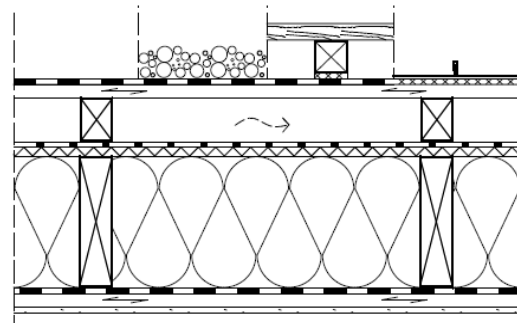


Abb. 3 Volldämmung unterlüftete Dachhaut [3]

Infolge des geringen Höhenunterschiedes zwischen Traufe und First reduziert sich der thermische Auftrieb, der wiederum als eine der wichtigsten Größen für eine funktionsfähige Belüftung anzusehen ist. Im Merkblatt „Wärmedämmung bei Dächern“ des Zentralverbandes des Deutschen Dachdeckerhandwerks werden weitere Einschränkungen, die die Funktionalität der Belüftung beeinflussen, diskutiert [9]:

„Bei Dachkonstruktionen mit geringer Dachneigung kann in einem durchlüfteten Dachraum Luftbewegung nur durch Windeinwirkung, Druckdifferenzen an Dachkanten (Staudruck und Windsog) und temperaturbedingten Überdruck in der Belüftungsebene bewirkt werden... Dies ist in der Regel nicht der Fall, wenn sich eine Dachfläche in enger Bebauung befindet und z.B. auf allen Seiten von höheren Gebäuden umgeben ist... Die Funktion von Lüftungsöffnungen kann kurzfristig durch Schnee ausfallen bzw. beeinträchtigt werden. Eine geplante Belüftung der Dachfläche kann durch Aufbauten, stark strukturierte Dachflächen, häufig unterbrochene Belüftungsebenen, ungünstige Dachformen etc. zum Erliegen kommen bzw. deren Funktion wesentlich einschränken. In solchen Fällen sind unbelüftete Dächer hinsichtlich der bauphysikalischen Funktion zuverlässiger.“ [8]

Entsprechende Hinweise und Schlussfolgerungen sind auch im Abschnitt 4.3.3.3 der DIN 4108-3 [26] aufgenommen. Erfolgt trotz dieser Hinweise eine Ausführung, wird gemäß [9] für Flachdächer ($< 3^\circ$) ein freier Lüftungsquerschnitt von $\geq 150 \text{ mm}$ empfohlen, was die

Anforderungen der DIN 4108 deutlich übersteigt. Problematisch können sich diese Konstruktionen ebenfalls in Bezug auf die Bildung von Sekundärtauwasser im Belüftungsspalt verhalten.

Beide Konstruktionen führen somit im Allgemeinen durch die Belüftungsöffnungen zu hohen Bauteilaufbauten, was architektonisch nicht gewünscht und konstruktiv oftmals nicht ausführbar ist.

Nicht belüftete Flachdachkonstruktionen:

Diese als einschalig anzusehende Konstruktionsform, bei der die Dachhaut ohne zusätzliche Unterlüftung direkt auf der Tragebene aufliegt, kam infolge des einfacheren Bauteilaufbaus in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung. Dabei wird zwischen Konstruktionen mit Volldämmung in der Tragebene (Abb. 4) und Aufbauten mit Dämmung oberhalb der Tragkonstruktion (Abb. 5) unterschieden. Letztere zeichnen sich zwar durch tragende und aussteifende Holzbauteile aus, die vollständig dem Raumklima ausgesetzt und damit im Regelfall nach DIN 68800-3 in die Gefährdungsklasse 0 (zukünftig als Gebrauchsklasse bezeichnet) eingestuft werden können. Sie führen jedoch wiederum zu hohen Dachaufbauten und bedürfen druckfester Aufdachdämmstoffe.

Nicht belüftete Aufbauten mit Volldämmung in der Tragebene zeichnen sich dagegen durch einen sehr guten Wärmeschutz bei geringer Bauhöhe, einen hohen Vorfertigungsgrad mit einfachen Anschlussdetails, bei vergleichbar geringen Baukosten, aus.

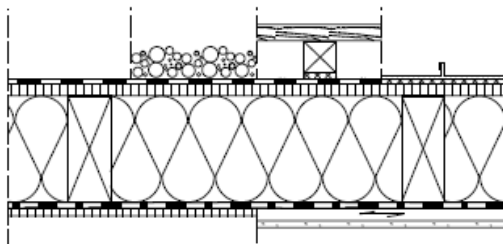


Abb. 4 nicht belüftet, Volldämmung in der Tragkonstruktion [3]

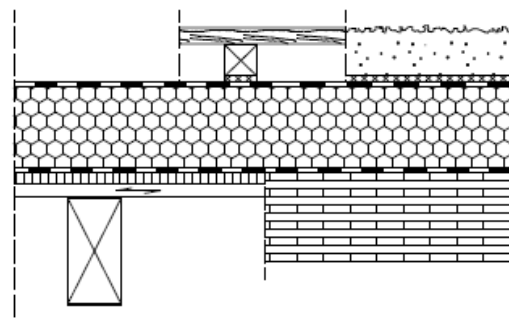
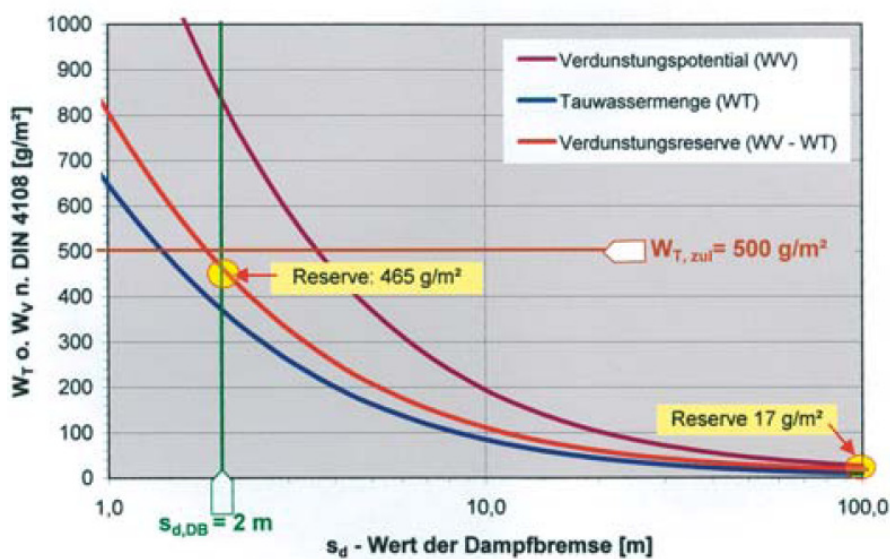


Abb. 5 nicht belüftet, Aufdachdämmung [3]

Ein rechnerischer Tauwassernachweis nach DIN 4108-3 kann für nicht belüftete (Abb. 4) und für um $< 5^\circ$ geneigte belüftete Dächer entfallen, wenn konstruktiv die Randbedingung erfüllt wird, dass der s_d -Wert der raumseitig diffusionshemmenden Schicht („Dampfsperre“) $\geq 100 \text{ m}$ ist (vgl. Tab. 1). Ein Abweichen von dieser Anforderung ist möglich, was nach Meinung der Autoren zugleich für die praktische Anwendung empfohlen wird, zieht jedoch einen rechnerischen Diffusionsnachweis nach sich.

Infolge der Abdichtungsbahnen entstehen für Flachdachkonstruktionen außenseitig diffusionshemmende oder sogar diffusionsdichte Schichten, die einen $s_{d,e} \geq 2$ m aufweisen. Als Anmerkung zur DIN 4108-3, aber auch zur DIN 68800-2 wird auf die Problematik der Erhöhung von Feuchtigkeit in der Konstruktion durch unplanmäßige Baufeuchte oder konvektiv eindringende Feuchte eingegangen und auf das unzureichende Austrocknungsverhalten (bei $s_{d,e} \geq 2$ m und $s_{d,i} \geq 100$ m) hingewiesen. In Bezug auf den Holzschutz der Tragkonstruktion erfolgt somit eine Zuordnung zur Gefährdungsklasse 2 (Gebrauchsklasse 2).

Die Ermittlung der Diffusionsbilanz nach dem Glaser-Verfahren (gemäß DIN 4108-3) für außenseitig dampfdicht abgedeckte Flachdachaufbauten verdeutlicht jedoch mögliche Verdunstungsreserven bei nicht nachweisfreien Aufbauten (Abb. 6). Zum Einhalten der maximal zulässigen Tauwassermenge im rechnerischen Nachweis sind diffusionshemmende Schichten mit deutlich geringeren s_d -Werten als 100 m ausreichend, was gleichzeitig das Verdunstungspotential der Konstruktion in den Sommermonaten erhöht und zur feuchtetechnischen Robustheit und Austrocknung beiträgt.



Randbedingungen:

$s_{d,e} = 300$ m,

$d_{\text{Dämm}} = 200$ mm

Abb. 6 Diffusionsbilanz eines außenseitig dampfdichten, nicht belüfteten Flachdachs [7]

Studien an Holzkonstruktionen in Nordamerika quantifizieren den bereits in der Norm erwähnten konvektiven Feuchteeintrag, mit dem trotz fachmännischer Ausführung der Luftdichtheitsebene gerechnet werden muss. Übertragen auf deutsche Verhältnisse, resultiert daraus eine zusätzliche Feuchtemenge von 250 g/m^2 in der Tauperiode [11], was dem Diffusionsstrom durch eine Dampfbremse mit einem s_d -Wert von $3,3$ m entsprechen würde. Für Holzkonstruktionen wird seitens des Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) daher empfohlen, diese Tauwassermenge als Verdunstungsreserve für die Konstruktion vorzusehen. Die gleiche Anforderung findet auch in der aktuellen Überarbeitung der DIN 68800-2 Berücksichtigung ($m_{WV} - m_{WT} \geq 250 \text{ g/m}^2$).

Konstruktionen mit raumseitiger diffusionshemmender Schicht $s_{d,i} \geq 100 \text{ m}$ erfüllen im allgemeinen diese Anforderungen nicht, stattdessen werden in der Literatur konstante $s_{d,i} \leq 5 \text{ m}$ bzw. feuchtevariable Schichten empfohlen [7].

Tab. 1 Dachkonstruktionen ohne rechnerischen Tauwassernachweis in Anlehnung an DIN 4108-3 (entnommen aus [3])

Konstruktion	Anforderung an den s_d -Wert	
	außen	innen
nicht belüftete Dächer mit unterlüfteter Dachhaut Zuordnung der Werte der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der außen- und raumseitig zur Wärmedämmung liegenden Schichten	$s_{d,e} \leq 0,1 \text{ m}$	$s_{d,i} \geq 1,0 \text{ m}$
	$s_{d,e} \leq 0,3 \text{ m}$	$s_{d,i} \geq 2,0 \text{ m}$
	$s_{d,e} > 0,3 \text{ m}$	$s_{d,i} \geq 6 \cdot s_{d,e}$
nicht belüftete Dächer mit nicht belüfteter Dachhaut (unabhängig vom s_d Wert der äußeren Schicht)	keine Anforderung	$s_{d,i} \geq 100 \text{ m}^{1)}$
nicht belüftete Flachdächer mit Dachabdichtung und belüftete Flachdächer mit Dachneigung $< 5^\circ$ (Wärmedurchlasswiderstand R der Bauteilschichten unterhalb der diffusionshemmenden Schicht max. 20 % von R_{ges} ; fachgerechte Ausführung der Belüftung)	Keine Anforderung ²⁾	$s_{d,i} \geq 100 \text{ m}^{1)}$
Belüftete Dächer mit Dachneigung $\geq 5^\circ$ Höhe des freien Belüftungsquerschnitts über der Wärmedämmung: mind. 20 mm; freier Lüftungsquerschnitt an den Traufen bzw. am Pultdachabschluss mindestens 2 ‰ der zugehörigen geneigten Dachfläche, mindestens jedoch $200 \text{ cm}^2/\text{m}$	keine Anforderung ²⁾	$s_{d,i} \geq 2 \text{ m}$
1) von der Verwendung wird aufgrund des hohen Schadensrisikos grundsätzlich abgeraten. Bei beidseitig diffusionshemmender Ausführung kann erhöhte Baufeuchte oder unplanmäßig eingebrachte Feuchte nur schlecht oder gar nicht austrocknen. 2) Für belüftete Konstruktionen werden die größeren Belüftungshöhen aus den Klempner-Fachregeln empfohlen.		

Feuchtevariable Schichten (raumseitig)

Wie im vorherigen Absatz beschrieben, kommt der Auswahl der raumseitigen diffusionshemmenden Schicht bei unbelüfteten Flachdachkonstruktionen eine besondere Bedeutung zu. Das eingesetzte Material muss den Diffusionsstrom ins Bauteil während der Tauperiode auf das zulässige Maß begrenzen und muss gleichzeitig in der

Verdunstungsperiode ein Trocknungspotenzial zur Raumseite hin ermöglichen, welches die empfohlene Verdunstungsreserve für unplanmäßigen, konvektiven Feuchteeintrag von 250 g/m^2 abdeckt.

Mit der Entwicklung und Anwendung von feuchtevariablen Dampfbremsen seit ca. 15 Jahren wurden diesbezüglich weitere Fortschritte ermöglicht. Diese Bahnen ändern ihren Diffusionswiderstand in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Im trockenen Klima, wie in beheizten Innenräumen, weisen die Produkte hohe Diffusionswiderstände, mit s_d -Werten von bis zu 10 m, auf. Bei ansteigender relativer Luftfeuchtigkeit, die im Bereich der raumseitigen Dampfbremse im Regelfall während der Umkehrdiffusion in der Verdunstungsperiode auftritt, sinkt der Diffusionswiderstand deutlich (vgl. Abb. 7). Für Luftfeuchten über 70% sind dabei im Regelfall bei synthetischen Bahnen s_d -Werte von kleiner 2 m zu verzeichnen. Neben diesen speziell entwickelten Kunststofffolien und Dampfbremspappen verhalten sich auch viele Holzwerkstoffe diffusionsvariabel, d.h. ihr Diffusionswert verändert sich mit der Materialfeuchte.

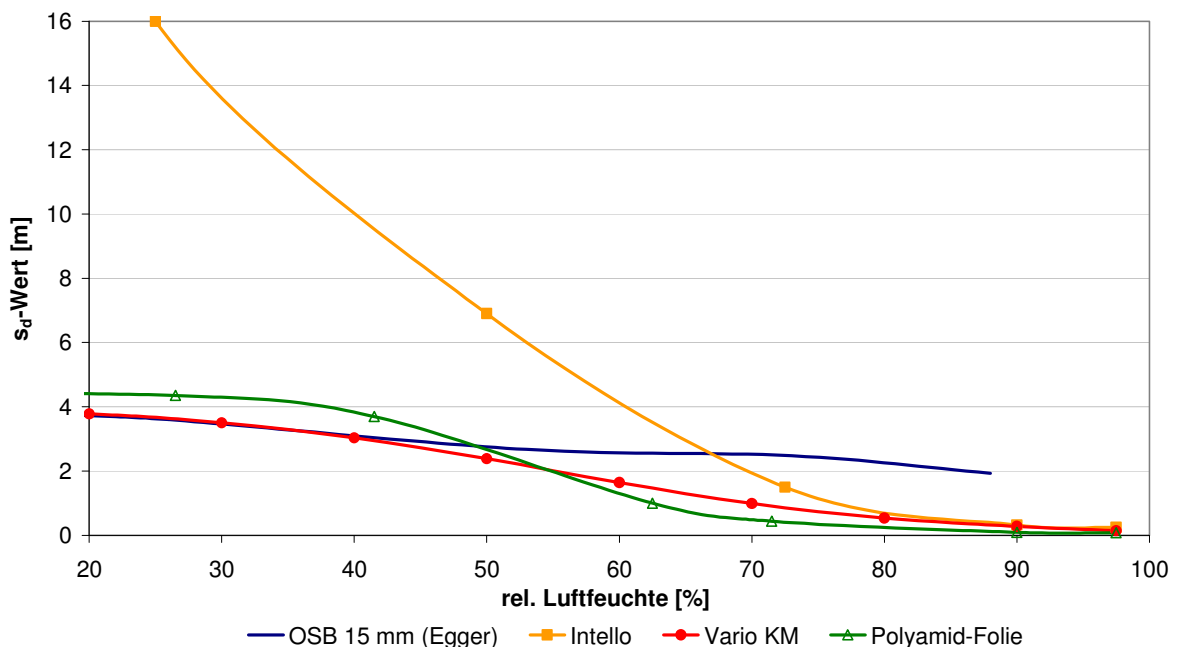


Abb. 7 Verlauf der s_d -Werte für feuchtevariable Dampfbremsschichten

Der zur Trocknung des Bauteils zusätzliche Effekt von raumseitig angeordneten feuchtevariablen Dampfbremsen kann nur durch feuchtedynamische Berechnungen unter instationären Klimarandbedingungen nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 1.3.2). Untersuchungen an außenseitig dampfdichten Steildächern [14] weisen nochmals auf das positive Verhalten dieser Materialien zur Erhöhung der Verdunstungsreserve hin.

Für die praktische Anwendung sei jedoch auch bei ausgeprägt diffusionsvariablen Materialien darauf hingewiesen, dass diese bei hohen Feuchtelasten, wie sie in der Rohbauphase oder in Wintergärten auftreten können, einen ausreichend hohen Diffusionswiderstand aufweisen müssen, um übermäßigen Feuchteeintrag zu verhindern.

Eine Grundvoraussetzung zur Vermeidung von Bauschäden ist dabei, die Konstruktion frühzeitig zu dämmen, die luftdichte Ebene herzustellen und bei Bedarf die raumseitigen Klimaverhältnisse zu kontrollieren und zu entfeuchten.

Deckschichteinfluss

Neben dem raumseitigen Diffusionswiderstand für vorgenannte Konstruktionen nimmt vor allem die Ausführung der Deckschicht eine besondere Bedeutung auf das Feuchteverhalten im Gefach ein. Wärme- und feuchtespeichernde Deckschichten, wie Kiesauflagen, Gründächer, Bohlenbeläge, aber auch helle Abdichtungsbahnen, nicht selbstpatinierende Blecheindeckungen und Verschattungen führen zur Minimierung der Oberflächentemperatur (vgl. Abb. 8) und zur Reduktion der Umkehrdiffusion über die Verdunstungsperiode hinweg [12], [13]. Bei normkonformer Berechnung nach DIN 4108-3 darf in der Verdunstungsperiode für Dächer eine Oberflächentemperatur von 20°C angenommen werden, was im Vergleich zu konstruktiv gleich aufgebauten Wänden eine ca. dreifach höhere Verdunstungsmenge ermöglichen würde. Untersuchungen [13] weisen jedoch darauf hin, dass diese Annahmen nur unter bestimmten Voraussetzungen „auf der sicheren Seite“ liegen.

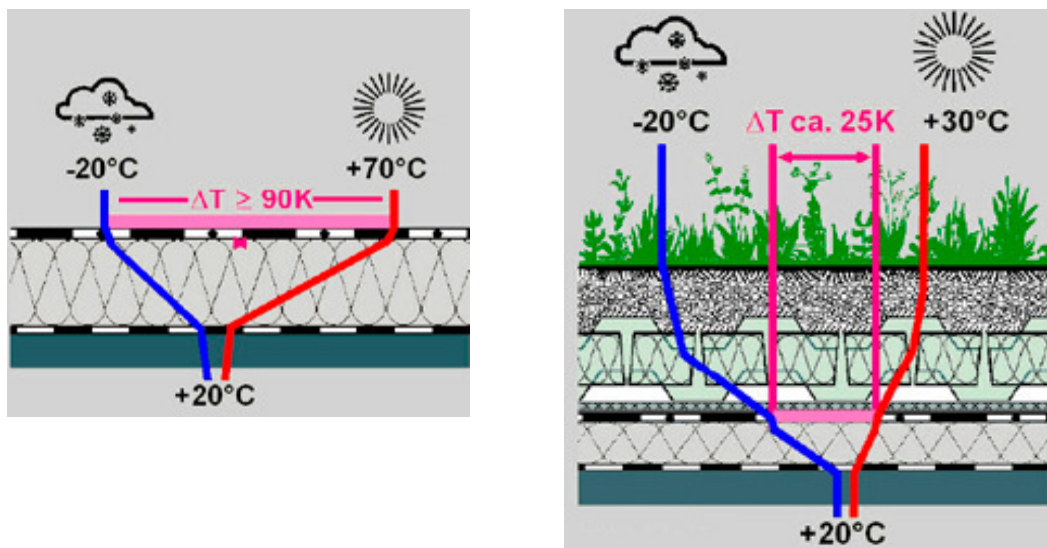


Abb. 8 Temperaturdifferenz an der Abdichtungsbahn mit und ohne Gründachauflage [4]

Für Grün- und Kiesdachaufbauten ist dies sehr schwierig einzuschätzen. Einflüsse der Substrat- und Vegetationsschicht können rechnerisch bis zum heutigen Zeitpunkt nicht eindeutig abgebildet werden, da validierte Datensätze in Verbindung mit Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise ausstehen. Eine Vielzahl an gebauten Flachdachkonstruktionen mit extensivem Gründachaufbau (vgl. Abschnitt 4) zeigen unter bestimmten Randbedingungen dennoch, dass es auch hier zu einer sommerlichen Rückdiffusion kommen kann und positive Effekte, wie erhöhte Wärmespeicherung, „Wärmedämmung“ und verminderte Wärmeabstrahlung, vorliegen.

Aufschluss über den Einfluss von Blechabdeckungen, Verschattung oder Farbe der Abdichtungsbahn können aktuell bereits dynamische Berechnungsprogramme liefern. Eine exaktere Aussage über das Feuchteverhalten dieser Konstruktionen wird im Vergleich zur Normberechnung ermöglicht. Diese Methoden verwenden im Gegensatz zum stationären Blockklima der DIN 4108-3 reale Klimarandbedingungen sowie weiterführende Materialparameter.

1.3.2 Hygrothermische Simulation

Die bisher übliche Anwendung des Glaser-Verfahrens zur Berechnung des Tauwasserausfalls in der Konstruktion und der Rücktrocknung während der Verdunstungsperiode nach

DIN 4108-3 erlaubt im allgemeinen nur eine vereinfachte Beurteilung. Genaue Aussagen zum Feuchteverhalten unter spezifischen realen Klimarandbedingungen sowie zum Feuchtegehalt bei Berücksichtigung von Einbaufeuchte und Leckagen sind nicht möglich. Seit einigen Jahren sind jedoch auch für die praktische Anwendung hygrothermischer Berechnungsprogramme [37], [38] verfügbar, mit deren Hilfe baupraktisch relevante gekoppelte Wärme- und Feuchtetransportvorgänge in mehrschichtigen Bauteilen unter realen (instationären) Klimarandbedingungen beurteilt werden können. Deren Anwendbarkeit und Qualitätssicherung wird über die DIN EN 15026 geregelt [28].

Im Gegensatz zum Glaser-Verfahren werden hier Wärme- und Feuchtespeicherfunktion von Baustoffen sowie Latentwärmeeffekte durch Verdunstung und Kondensation und das parallele Auftreten von Diffusion und Flüssigkeitstransport berücksichtigt.

Ziel dieser Berechnungen ist es zu prüfen, ob über mehrjährige Zyklen eine Feuchteakkumulation in der Konstruktion auftritt. Dabei können spezielle Fragestellungen

- zur winterlichen Tauwasserbildung während der Heizperiode,
- der Sommerkondensation durch Feuchtwanderung,
- der Austrocknung von Baufeuchte,
- zur Bildung von Oberflächenkondensat infolge Unterkühlung durch nächtliche Wärmeabstrahlung,
- zum Wärmeverlust durch Transmission und Verdunstung,
- zum Einfluss der Neigung und Farbe der Oberfläche von Bauteilen,
- zur Art raum- und außenseitiger Klimabedingungen,
- zur Auswirkung von Schlagregen auf Außenbauteile sowie
- zur Beurteilung des Feuchteintrags durch Leckagen

diskutiert werden.

1.3.3 Fazit

Anhand der getroffenen Aussagen wird ersichtlich, dass vielversprechende Ansatzpunkte für einschalige, nichtbelüftete Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise vorliegen.

So bilden feuchteresistentere Plattenwerkstoffe, planmäßig luftdichte Ausführung der Konstruktion und trocken verbautes Holz in Verbindung mit innovativen und ökologischen Baumaterialien, wie feuchtevariable Dampfbremsen, im Gegensatz zu früheren normkonformen Ausführungen bessere Voraussetzungen und Möglichkeiten, einen dauerhaft schadensfreien Aufbau zu erhalten. Ein generelles Abraten von dieser Konstruktionsform ist demzufolge nicht mehr haltbar.

Rechnergestützte hygrothermische Simulationen, die eine Berücksichtigung von feuchtevariablen Materialien im Gegensatz zum bisherigen Glaser-Verfahren erlauben und reale, instationäre Klimarandbedingungen in die Beurteilung einbeziehen, bedürfen jedoch in Bezug auf Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise einer allgemeingültigen Bestätigung. Eine Validierung der Berechnungen durch Freilandversuche und eine systematische Untersuchung von vorhandenen Flachdachkonstruktionen hat allerdings bisher noch nicht stattgefunden. Beide sind aber erforderlich, um belegen und damit überzeugen zu können, dass Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise dauerhaft funktionsfähig sein können.

Ein Ansatz dafür wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen geschaffen.

2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Beurteilung der hygrothermischen Verhältnisse in einschaligen Flachdachkonstruktionen und deren Einfluss auf die Konstruktion wurden experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Dachaufbauten in einem Versuchsstand in Leipzig durchgeführt. Die darüber ermittelten Daten dienten weiterhin der Validierung von hygrothermischen Simulationen, mit deren Hilfe weiterführende Parameterstudien erfolgten.

2.1 Versuchsstand Leipzig

2.1.1 Konstruktiver Aufbau

Die Untersuchungen wurden in einem Freilandversuchsgebäude der MFPA Leipzig GmbH an einer einschaligen Flachdachkonstruktion mit praxisrelevanten Aufbauten durchgeführt (Abb. 9). Hierbei wurde in der Art der raumseitigen diffusionshemmenden Schicht, der Art der Gefachdämmung und zwischen verschiedenen Deckschichten unterschieden.

Das genutzte Flachdach des Versuchsgebäudes besaß eine Fläche von 8,0 m in der Länge und 5,5 m in der Breite, bei einer Dachneigung von 2°. Das flach geneigte Dach in Holzbauweise wurde umlaufend von einer Attika umschlossen. Die Entwässerung der Dachfläche erfolgte über einen Einlauf am Tiefpunkt auf der Südseite des Versuchsstandes. Die Höhe der Attika variierte infolge des Gefälles zwischen 0,3 m und 0,5 m. Um eine mögliche Verschattung



Abb. 9 Versuchsstand mit den untersuchten Deckschichten

der Messbereiche durch die Attika auszuschießen, wurden nur Flächen mit einem Abstand von mindestens 0,5 m zu dieser genutzt. Infolgedessen standen acht Messfelder mit jeweils $\sim 3 \text{ m}^2$ zur Verfügung. Jedes Feld umfasste dabei zwei durch die Deckenbalken getrennte Gefache. Zusätzlich entstanden drei Messfelder, in denen der Einfluss der Deckschichtausbildung weiterführend untersucht werden konnte. Alle untersuchten Bereiche innerhalb der Konstruktion wurden durch die Deckenbalken oder speziell beschichtete Stellbretter, die quer zu den Deckenbalken eingeschoben wurden, voneinander getrennt.

Zur Herstellung üblicher Nutzungsbedingungen wurde der Versuchsstand raumseitig klimatisiert.

Die eingesetzte Holztafeldachkonstruktion wurde vor Ort, ab November 2007, errichtet. Als Tragebene dienten Deckenbalken mit einer Abmessung $B \times H = 80 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ aus Konstruktionsvollholz. Die darauf aufgebrachte oberseitige Beplankung bestand aus 22 mm

dünnen OSB-3 Platten (DIN EN 300 [16]) der Firma Glunz AG. Um eine ungünstige Ausgangssituation zu schaffen, wurden die OSB-Platten mit erhöhter Bauteilfeuchte von 12 M-% eingebracht. Dazu wurden die Platten 5 Wochen lang vor dem Einbau bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % gelagert und die Feuchtezunahme kontinuierlich über gravimetrische Messungen mit abschließender Darrprobe sowie über elektronische Holzfeuchtemessung an Probestücken aufgezeichnet (vgl. Anlage Abb. A -2 und Abb. A - 3). Zur Beurteilung des Einflusses von verschiedenen Dämmstoffen im Gefachbereich auf die hygrothermischen Verhältnisse kam neben Mineralwolldämmstoff der Firma Isover weiterhin Isofloc L - Zelluloseeinblasdämmstoff zur Anwendung. Beide Dämmstoffe wurden in den entsprechenden Gefachen ohne Hohlraum über die gesamte Höhe eingebracht (Abb. 10). Zur Bestimmung des Einflusses der raumseitig angeordneten diffusionshemmenden Schicht (Bekleidung) auf die Feuchteentwicklung der Aufbauten über die Untersuchungsperiode hinweg wurden ebenfalls zwei verschiedene Materialien angeordnet. Hierbei kam raumseitig als diffusionshemmende Schicht neben der feuchtevariablen Dampfbremse proclima INTELLO® eine 15 mm dicke OSB/3-Platte der Firma Glunz zum Einsatz (Abb. 11). Beide Materialien wurden raumseitig an den Fugen und im Anschlussbereichen luftdicht verklebt.



Abb. 10 Gefachbereich beim Einbringen des Dämmstoffes (Glaswolle)



Abb. 11 raumseitig diffusionshemmende Schichten, OSB-Platte

Zur Untersuchung des Einflusses der Deckschichten auf die Verhältnisse im Aufbau wurde zwischen folgenden Varianten unterschieden (vgl. Abb. 12):

- schwarze PVC-Dach-Abdichtungsbahn mit einer Dicke von 1,5 mm, der Firma Wolfen, Henkel
- schwarze PVC-Dach-Abdichtungsbahn mit zusätzlichem 80 mm dicken extensiven Gründachaufbau, bestehend aus Filtervlies, Leichtsubstrat und Sedum
- schwarze PVC-Dach-Abdichtungsbahn mit vollständiger Verschattung
- schwarze PVC-Dach-Abdichtungsbahn mit Kiesauflage (Körnung 16/32)
- hellgraue PVC-Dach-Abdichtungsbahn mit einer Dicke von 1,5 mm

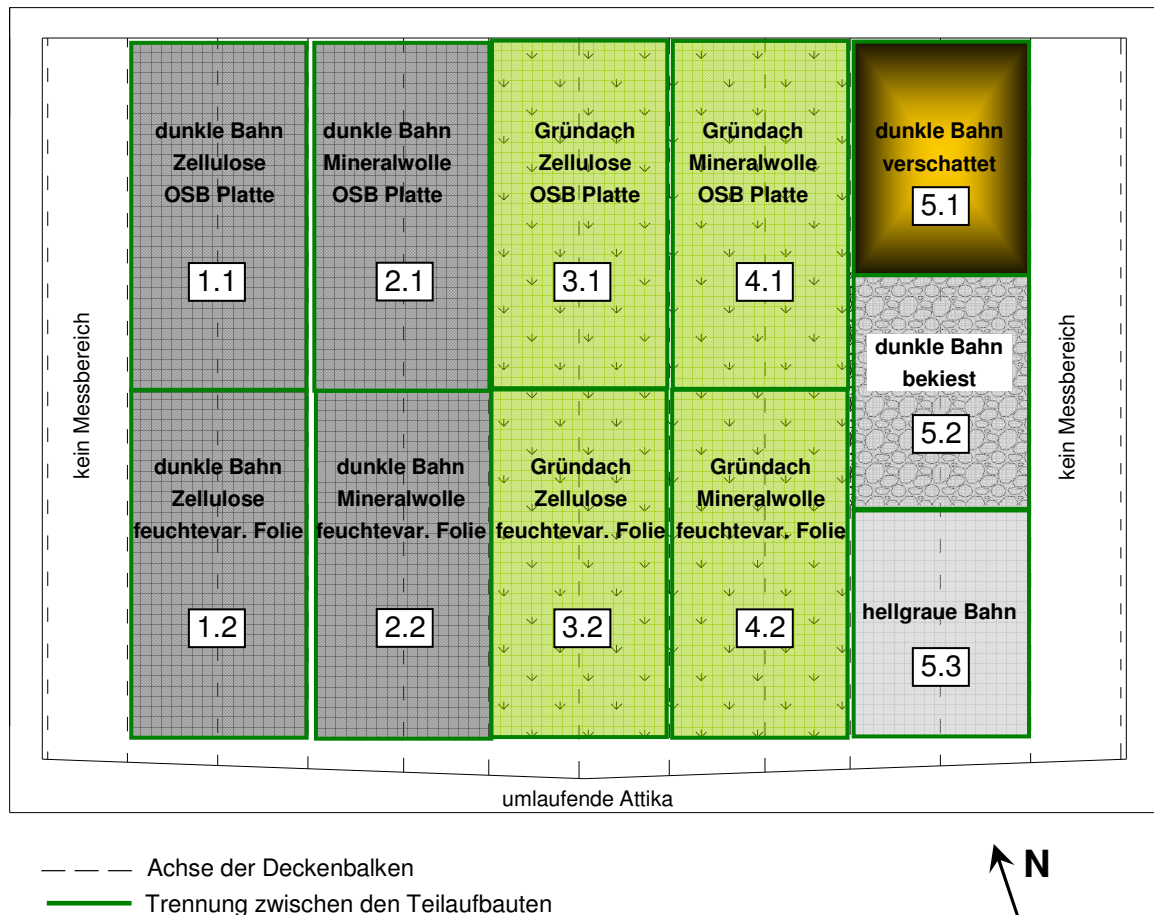
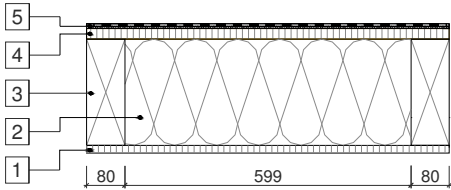


Abb. 12 Konstruktiver Aufbau des Versuchsstandes, schematische Aufsicht

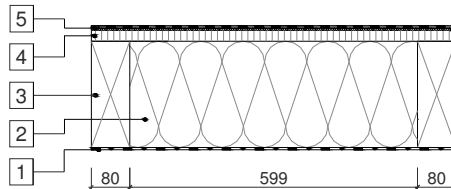
Die detaillierten Konstruktionsaufbauten und die zugehörigen Baustoffkennwerte enthalten die folgenden Tabellen Tab. 2 bis Tab. 12. Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der einzelnen Aufbauten, unter Berücksichtigung des Holzanteils im Gefach, kann unabhängig von der raumseitigen Bekleidung im Allgemeinen mit $U_m = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angegeben werden. Der Einfluss von zusätzlich aufgetragenen Deckschichten, wie Gründachsubstrat und Kiesauflage fand bei dieser Ermittlung keine Berücksichtigung.

Eine Fotodokumentation zur Erstellung des Versuchsstandes kann der Abbildungsserie im Anhang (Abb. A - 4) entnommen werden.

Tab. 2: Versuchsaufbau im Feldbereich 1.1

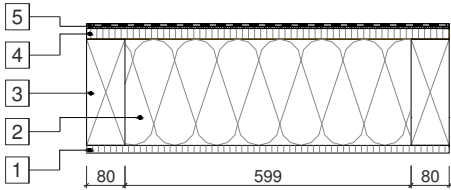
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000

Tab. 3: Versuchsaufbau im Feldbereich 1.2

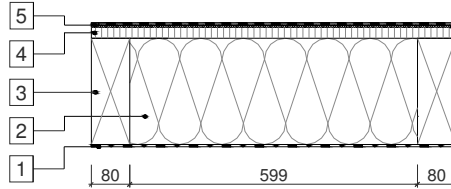
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	Feuchtevariable Dampfbremse INTELLO® [34]	0,2	-	-	26000-250
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000

Kennwerte entsprechend DIN 4108 und Herstellerinformationen

Tab. 4: Versuchsaufbau im Feldbereich 2.1

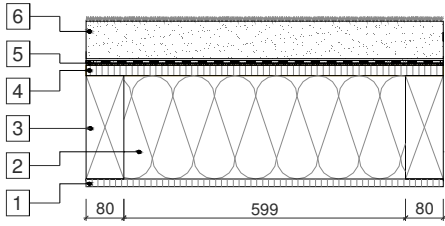
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Mineralwolldämmung [35]	220	14	0,04	1
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000

Tab. 5: Versuchsaufbau im Feldbereich 2.2

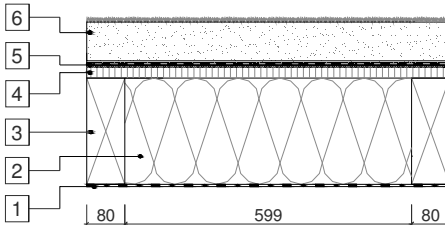
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	Feuchtevariable Dampfbremse INTELLO® [34]	0,2	-	-	26000-250
2	Mineralwolldämmung [35]	220	14	0,04	1
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000

Kennwerte entsprechend DIN 4108 und Herstellerinformationen

Tab. 6: Versuchsaufbau im Feldbereich 3.1

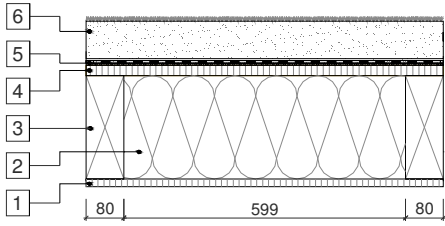
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	extensive Begrünung [36]	80	-	-	-

Tab. 7: Versuchsaufbau im Feldbereich 3.2

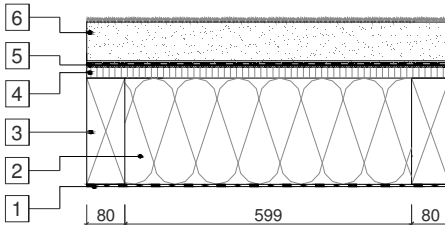
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	Feuchtevariable Dampfbremse INTELLO® [34]	0,2	-	-	26000-250
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC- Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	extensive Begrünung [36]	80	-	-	-

Kennwerte entsprechend DIN 4108 und Herstellerinformationen

Tab. 8: Versuchsaufbau im Feldbereich 4.1

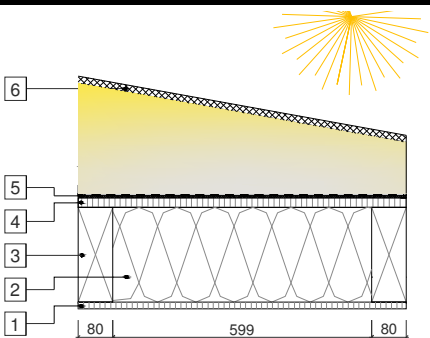
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Mineralwolldämmung [35]	220	14	0,04	1
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	extensive Begrünung [36]	80	-	-	-

Tab. 9: Versuchsaufbau im Feldbereich 4.2

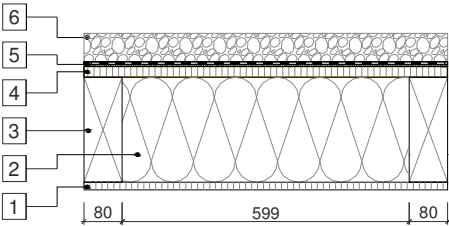
Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	Feuchtevariable Dampfbremse INTELLO® [34]	0,2	-	-	26000-250
2	Mineralwolldämmung [35]	220	14	0,04	1
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	extensive Begrünung [36]	80	-	-	-

Kennwerte entsprechend DIN 4108 und Herstellerinformationen

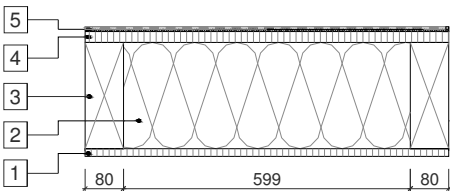
Tab. 10: Versuchsaufbau im Feldbereich 5.1

Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	Verschattung	150	-	-	-

Tab. 11: Versuchsaufbau im Feldbereich 5.2

Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	15	620	0,13	250-200
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000
6	Kiesschicht - Körnung 16/32	50	-	-	-

Tab. 12: Versuchsaufbau im Feldbereich 5.3

Schicht	konstruktiver Aufbau				
außen ↓ innen					
Nr.:	Bezeichnung	s [mm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m*K]	μ [-]
1	Feuchtevariable Dampfbremse INTELLO® [34]	0,2	-	-	26000-250
2	Isofloc Zellulosedämmung [32]	220	50	0,04	1 - 2
3	Deckenbalken (KVH)	80/220	500	0,13	40
4	OSB/3-Platte (DIN EN 300) [31]	22	590	0,13	250-200
5	PVC-Abdichtungsbahn grau inkl. Schutzvlies [33]	1,5	1360	0,16	≤ 13000

Kennwerte entsprechend DIN 4108 und Herstellerinformationen

Beurteilungskriterien der Konstruktion

Schadhafte Dachaufbauten sind dort zu erwarten, wo hohe Feuchtigkeitsbelastungen über längere Zeiträume auftreten und die Jahresfeuchtebilanz stetig positive Werte aufweist. Aufgrund der Ausführung als normativ nicht geregelter Konstruktionsaufbau werden die Anforderungen und Beurteilungsgrundlagen aus den Anwendungsbereichen der eingesetzten Bauprodukte abgeleitet. Der Einsatzbereich der verwendeten Holzwerkstoffe wird dabei in den entsprechenden Produkt- und Anwendungsnormen geregelt.

Die als obere Beplankung genutzte OSB/3-Platte ist gemäß der DIN EN 300 klassifiziert und für die Anwendung im Feuchtbereich unter tragenden Bedingungen zugelassen. Dieser Einsatzbereich wird entsprechend der Nutzungsklasse 2 gemäß EN 1995-1-1 [17] bzw. DIN 1052 [18] definiert und durch Werkstofffeuchten gekennzeichnet, welche sich bei Temperaturen von 20°C und Rel. Luftfeuchte der Umgebung einstellen, die nur wenige Wochen im Jahr den Wert von 85 % überschreiten. Entsprechend DIN EN 335-3 [22] lassen sich Anwendungen bis zur Gebrauchsklasse 2 mit Plattenfeuchten $u < 20 \text{ M-\%}$ ableiten, wobei der Feuchtegehalt ein gelegentliches Wachstum von holzerstörenden Pilzen ermöglichen kann. Zusammensetzung und Herstellungsart schließen normativ jedoch einen Befall durch holzerstörende Insekten (Termiten ausgenommen) aus. Entsprechend dem Entwurf zur DIN 68800-2 [23] werden zur Einstufung in die Gebrauchsklasse 0 zukünftig für dieses Plattenmaterial Holzwerkstofffeuchten von maximal 18 M-% toleriert.

Die in Teilbereichen als raumseitige Bekleidung angeordnete OSB/3-Platte wird ebenfalls nach vorgenannten Kriterien beurteilt. Infolge des Einbauortes und der Klimatisierung des Versuchsstandes sind jedoch maximal Klimabedingungen entsprechend der Nutzungsklasse 1 (20°C / 65 % Rel. Luftfeuchte) der DIN EN 1995-1-1 bzw. DIN 1052 anzunehmen, woraufhin für die OSB-Platte über den Untersuchungszeitraum hinweg unkritische Bedingungen erwartet werden.

Die Deckenbalken aus Fichte ohne chemischen Holzschutz können entsprechend der DIN EN 350-2 [24] der Dauerhaftigkeitsklasse 4 (wenig dauerhaft gegen holzerstörende Pilze) zugeordnet werden. Ein Einsatz in der Gebrauchsklasse 1 bzw. 2 nach DIN EN 460 [25] wäre ohne weitere Schutzmaßnahmen möglich, was abgedeckten Bereichen entsprechen würde. Materialfeuchten in Teilen oder im Gesamtquerschnitt bis 20 M-% wären zulässig. Zur Sicherung von Holzfeuchten $u < 20 \text{ M-\%}$ sollten gemäß [29], als auch nach Erfahrungen der Autoren dauerhaft Relative Luftfeuchten unter 90 % vorliegen. Ein Risiko für Insektenbefall kann infolge der baulichen Situation ausgeschlossen werden. Die maximalen Materialfeuchten innerhalb der Konstruktion werden während des Untersuchungszeitraumes innerhalb der Kondensationsperiode erwartet.

Trotz der nicht normkonformen Konstruktionsaufbauten werden zur erweiterten Beurteilung die Anforderungen nach DIN 4108-3 [26] und DIN 68800-2 [27] mit diskutiert, um die Ergebnisse der Bauteilversuche im Rahmen dieser Kriterien werten zu können.

Nach DIN 4108-3 und DIN 68800-2 darf eine flächenbezogene Tauwassermasse $m_{w,T}$ von

insgesamt $1,0 \text{ kg/m}^2$ nicht überschritten werden. Diese Forderung gilt jedoch nicht an kapillar nicht wasseraufnahmefähigen Flächen. Dabei ist die flächenbezogene Tauwassermasse $m_{w,T}$ auf $0,5 \text{ kg/m}^2$ zu begrenzen. Holz- und Holzwerkstoffe unterliegen einer weiteren Anforderung zum massebezogenen Feuchtegehalt. Bei Holz ist eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes um auf maximal 5 M-% und bei Holzwerkstoffen auf maximal 3 M-% durch den konstruktiven Aufbau zu begrenzen.

Als weiteres Bewertungskriterium werden die Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen eingeführt. Schimmelpilzbefall auf und innerhalb der Konstruktion muss hinsichtlich der Wohnhygiene durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden. Nicht sichtbarer Schimmelbefall innerhalb der Konstruktion fand bisher in Untersuchungen dieser Art jedoch nur untergeordnete Beachtung, soll aber im Rahmen der Auswertungen zu diesen Untersuchungen Berücksichtigung finden. Entgegen der vorangestellten Ausführungen zum Schutz gegen holzerstörende Pilze können Schimmelpilze auch bei Holzfeuchten unter 20 M-% auftreten. Nach Sedlbauer [30] werden die in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze in Gesundheitsgefährdungsklassen von A bis C eingeteilt. Als Voraussetzungen für das Wachstum von Schimmelpilzen lassen sich folgende Punkte zusammenfassen.

- Relative Luftfeuchte zwischen 80 % und 100 %
- Temperaturen zwischen $-8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Nährstoffverfügbarkeit (Substrat)
- Milieu der Oberfläche pH-Wert von 2 – 11 (abhängig von Temperatur und relativen Luftfeuchte)
- Sauerstoffgehalt von mindestens 0,25 % in der Luft, der immer vorhanden ist

Diese Voraussetzungen müssen in bestimmten Zeitperioden simultan auftreten, um Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum zu ermöglichen. Zusammengefasst wird diese Beziehung in einem Isoplethenmodell für in Gebäuden auftretende Schimmelarten. In temperatur- und feuchteabhängigen Kurvenscharen wird zwischen folgenden drei Substratgruppen unterschieden.

Substratgruppe 0: optimaler Nährboden wie z.B. Nährmedium/Vollmedium, das dafür gültige Isoplethensystem gibt minimale Wachstumsvoraussetzungen an und gilt als unterste Wachstumsgrenze (niedrigste Oberflächenfeuchte) für in Gebäuden auftretende Schimmelpilze

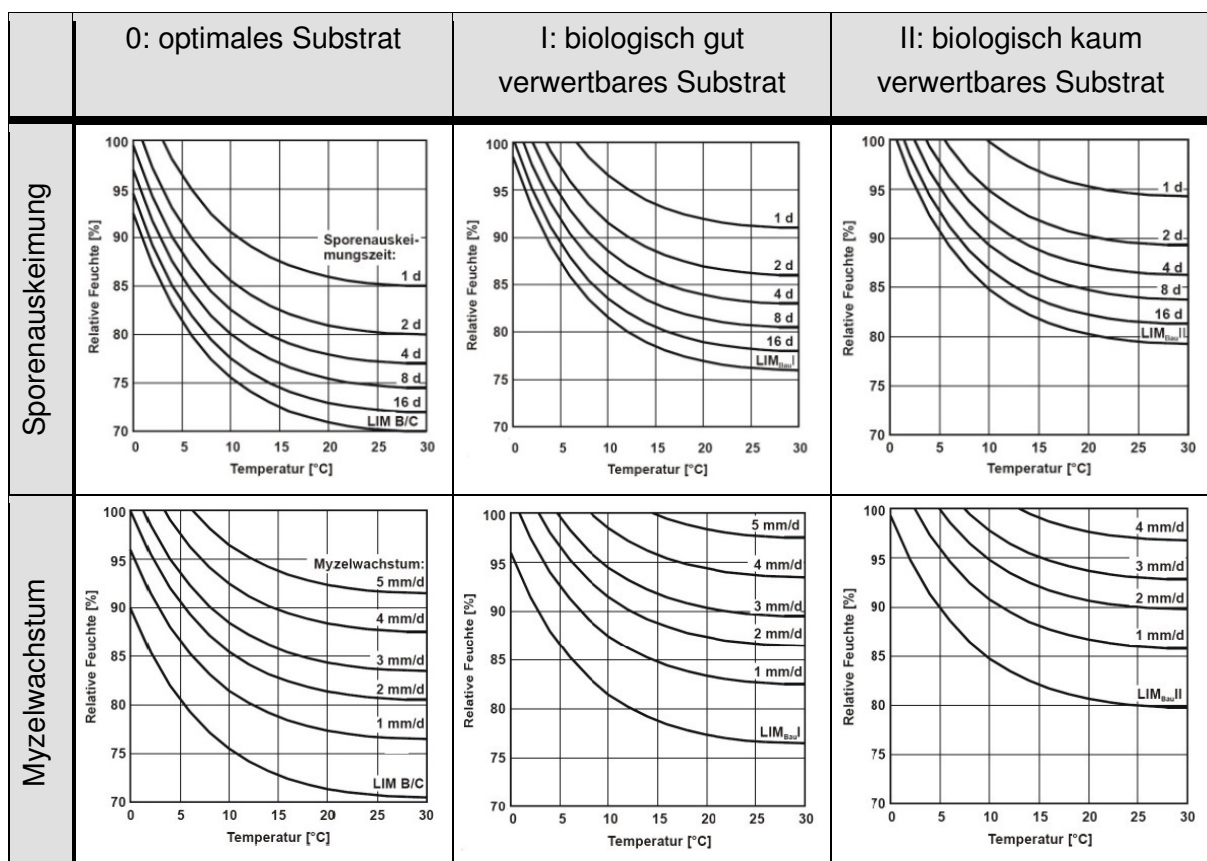
Substratgruppe I: biologisch gut verwertbare Substrate, wie z.B. Tapete, Gipskarton oder Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen sowie stark verschmutztes Material. Dieses zeigt im Vergleich zur Substratgruppe 0 erhöhten Feuchtebedarf.

Substratgruppe II: biologisch kaum verwertbare Substrate, wie z.B. mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge (Putze etc., manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen)

Es zeigt sich im Vergleich zur Substratgruppe 0 und I einen weiter erhöhter Feuchtebedarf.

Anhand dieser drei Parameter lassen sich die Sporenauskeimzeit in Tagen, nach der eine Keimung abgeschlossen ist und für das Myzelwachstum die zu erwartenden Wachstumsraten ablesen (vgl. Tab. 13).

Tab. 13: Verallgemeinertes Isoplethenmodell für Sporenauskeimung und Myzelwachstum nach [30] für bauspezifische Schimmelpilze



In den Untersuchungen eingesetztes Holz und Holzwerkstoffe sowie die verwendeten Dämmstoffe können der Substratgruppe I und II zugeordnet werden. Für die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum sind demnach je nach auftretender Temperatur länger andauernde Feuchten erforderlich. In den Sommermonaten bei erwarteten Tagesmitteltemperaturen von über 20 °C sind dafür bereits Relative Feuchten zwischen 75 und 80 % zur Schimmelpilzbildung ausreichend. In den Wintermonaten und

Frühjahrsmonaten mit erwarteten mittleren Tagestemperaturen im oberen Gefachbereich zwischen 0 – 10 °C sind höhere Feuchten im Bereich von 80 – 95 % erforderlich.

Für die Gefachbereiche mit Zellulosedämmung wird aufgrund langjähriger Erfahrungen bei trotz möglicher hoher Luft- und Materialfeuchten nicht von einem Schimmelwachstum ausgegangen, da sich infolge des eingesetzten Brandschutzmittels im Dämmstoff wachstumshemmende Bedingungen einstellen. Diese Aussage gilt nur unter Sicherstellung einer hohlraumfreien Gefachfüllung. Vorgenannte Randbedingungen dienen in der weiteren Betrachtung als zulässige Grenzbedingungen.

2.1.2 Messtechnische Erfassung

Am Versuchsgebäude in Leipzig wurden über den Untersuchungszeitraum folgende Messgrößen bestimmt:

- Umgebungsklimabedingungen / Raumklima
 - Temperatur der Außenluft
 - Relative Luftfeuchte der Außenluft
 - Windgeschwindigkeit und Windrichtung
 - Niederschlagsmenge
 - Globalstrahlung
 - Temperatur der Innenluft
 - Relative Luftfeuchte der Innenluft
- klimatische Verhältnisse im Dachaufbau
 - Temperatur unter den Deckschichten
 - Temperatur und Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene, auf der kalten Seite des Gefachdämmstoffs
- Materialfeuchten
 - Holzfeuchten der Tragkonstruktion und oberseitigen Beplankung

Die Lage der Messtechnik ist im Messstellenplan in der Anlage (Abb. A-6) dargestellt.

Klimamessdaten:

Zur Beurteilung des Einflusses des Außenklimas auf die klimatischen Verhältnisse der einzelnen Dachaufbauten sowie als Eingangsgröße zur hygrothermische Simulation erfolgte die kontinuierliche Aufzeichnung von Temperatur, Relativer Luftfeuchte, Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit und Strahlungsintensität. Alle Messgrößen der Wetterdaten wurden direkt am Versuchsgebäude im Intervall von 5 Minuten gewonnen. Ergänzt wurden diese Kennwerte mit Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zum Bedeckungsgrad. Zur Klimatisierung des Innenraumes wurden dessen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen, geregelt und aufgezeichnet.

Zum Nachweis des Einflusses der Deckschicht auf das Auffeuchtungs- und Trocknungsverhalten der Konstruktionen wurde bei allen Aufbauten zwischen PVC-Abdichtungsbahn und oberseitiger OSB-Beplankung eine Temperaturmessstelle eingebracht, die eine stetige Aufzeichnung ermöglichte. Innerhalb der einzelnen Konstruktionsvarianten wurden weiterhin direkt zwischen der oberseitigen OSB-Beplankung und den Dämmstoffen, jeweils in Feldmitte Datenlogger zum Erfassen von Temperatur und relativer Luftfeuchte installiert (vgl. Abb. 13). Die Erfassung aller Temperaturen und Relativer Luftfeuchten innerhalb der Konstruktion erfolgte jeweils alle 30 Minuten.

Zur Ermittlung von Kennwerten für Temperatur und Relative Luftfeuchte, die sich während der Untersuchungsperiode innerhalb der Kiesschicht und dem Substrat des Gründachaufbaus einstellen, wurden weitere Datenlogger in diesen Bereichen installiert.

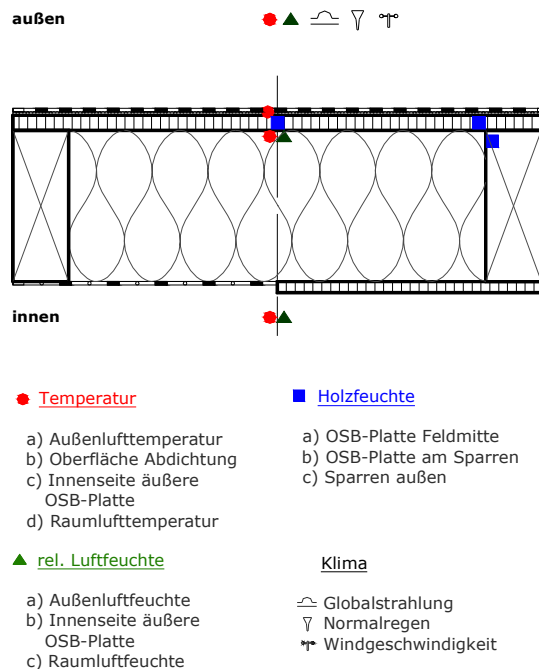


Abb. 13 Anordnung und Aufbau der Messstellen in den untersuchten Feldbereichen

Holzfeuchtemessung:

Die Materialfeuchten im Untersuchungszeitraum wurden über ein automatisches Messwerterfassungssystem, basierend auf dem Prinzip der elektronischen Widerstandsmessung, kontinuierlich registriert. (Abb. 14). Messstellen waren hierfür in den Untersuchungsbereichen 1.1 bis 4.2 jeweils an der oberseitigen OSB-Beklankung in Feldmitte und im Randbereich sowie an der Oberkante des Deckenbalkens angebracht (Abb. 13). Die Messwerterfassung für die Holzfeuchte hat eine Untergrenze von ca. 8 M-%, was bei der Auswertung der Messergebnisse zu beachten ist.

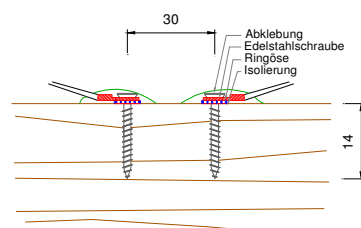
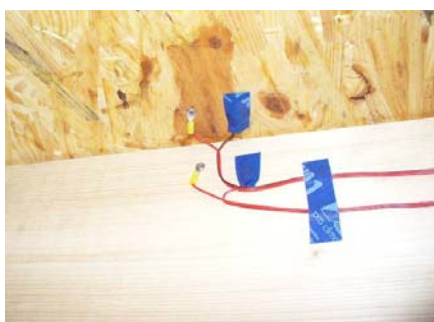


Abb. 14 Aufbau der Messstellen zur elektronischen Holzfeuchtemessung

2.2 Hygrothermische Simulation - Vorgehen

2.2.1 Materialkennwerte

2.2.1.1 Holzwerkstoffplatten

Ziel des Forschungsprojekts war es u.a., gesicherte Materialdatensätze für die hygrothermische Simulation zur Verfügung zu stellen. Insbesondere über die Eigenschaften der Holzwerkstoffplatten bestand große Unsicherheit. Aus diesem Grunde beauftragten die drei am Projekt beteiligten Hersteller von OSB-Platten die Ermittlung der notwendigen feuchtetechnischen Parameter bei anerkannten Prüfeinrichtungen.

Tab. 14 Kennwerte der OSB-Platten aus Messungen des WKI Braunschweig

Eigenschaft		Egger	Glunz	Kronoply
Plattentyp/ Bezeichnung		OSB/3	OSB/3	OSB/3
Nennstärke	[mm]	13	15	15
Rohdichte	[kg/m³]	-	620	-
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]		1500*	
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]		0,13*	
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	[%/M-%]		1,5*	
Porosität	[Vol-%]	-	80*	-
Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl μ [-] bei T= 23 °C und:	$\phi = 16 \%$	251	247	636
	$\phi = 25 \%$	240	207	395
	$\phi = 53 \%$	178	134	370
	$\phi = 72 \%$	165	99	250
	$\phi = 88 \%$	129	81	127
Sorptionsfeuchten [kg/m³] bei T = 23 °C und:	$\phi = 30 \%$	58	38	61
	$\phi = 50 \%$	75	49	78
	$\phi = 65 \%$	90	61	95
	$\phi = 80 \%$	138	88	135
	$\phi = 93 \%$	262	168	248

* Erfahrungswert der Autoren bzw. der Literatur entnommen

Für den Versuchsstand wurden in Abstimmung mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe OSB-Platten der Herstellerfirma Glunz ausgewählt. Für die hygrothermische Simulation wurden deshalb die entsprechenden Materialkennwerte verwendet.

Für die Eigenschaften zum Flüssigtransport standen leider keine Messwerte zur Verfügung. Hier wählten die Autoren Werte aus der WUFI-Materialdatenbank. Die Eigenschaften der OSB-Platte, die als Beplankung dient (OSB/3 mit d = 22 mm), wurden in Anlehnung an die Messwerte der Platte von Glunz (Tab. 14) mit d = 15 mm gewählt.

2.2.1.2 Zellulose

Für die Zellulosedämmung isofloc L stand in der Material-Datenbank des genutzten Simulationsprogrammes kein spezifischer Datensatz zur Verfügung. Vielmehr sind mehrere Datensätze verfügbar, welche aber alle keine eindeutige Beschreibung des hygrothermischen Verhaltens der Dachaufbauten im Versuchsstand zuließen bzw. zu großen Abweichungen zu den Messergebnissen führten. Die Autoren entwickelten deshalb in Anpassung an die gewonnenen Messwerte im Versuchsstand einen neuen Datensatz, welcher für die Simulationen Verwendung fand und in folgender Tabelle gezeigt wird:

Tab. 15 Kennwerte der Zellulose-Wärmedämmung

Rohdichte	[kg/m ³]	50
Porosität	[Vol-%]	95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2000
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]	0,037
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	[%/M-%]	1,0
Sorptionsfeuchten w [kg/m ³] bei $T = 23^\circ\text{C}$ und:	$\phi = 35 \%$	4,5
	$\phi = 65 \%$	8
	$\phi = 80 \%$	10
	$\phi = 93 \%$	14
	$\phi = 96 \%$	35
	$\phi = 98 \%$	160
	$\phi = 100 \%$	500
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	[-]	1,5
Flüssigtransportkoeffizient Saugen [m ² /s] bei	$w = 0 \text{ kg/m}^2$	0
	$w = 12 \text{ kg/m}^2$	2 E-10
	$w = 500 \text{ kg/m}^2$	2,4E-6
Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen [m ² /s] bei	$w = 0 \text{ kg/m}^2$	0
	$w = 12 \text{ kg/m}^2$	1 E -8
	$w = 500 \text{ kg/m}^2$	3 E-7

2.2.1.3 Mineralwolle

Für die im Versuchsstand verwendete Mineralwolle *Integra* ZKF 1-040 - Glaswolle der Firma isover – stand kein spezieller Materialdatensatz zur Verfügung. Hier wurde ebenfalls der im Simulationsprogramm vorhandene Datensatz für Mineralwolldämmung um die bekannten Materialparameter erweitert. Das hygrothermische Simulationsprogramm WUFI gibt in seiner Datenbank für Mineralwolle eine Feuchtespeicherfunktion von Null an. Da jedoch programmintern in jedem Fall aus Gründen des numerischen Lösungsalgorithmus Sorptionsfeuchten eingesetzt werden, wurden diese aus Transparenzgründen im Vorfeld als

Stoffkennwert definiert. Die verwendete Sorptionsisotherme orientiert sich an Daten aus der Material-Datenbank im hygrothermischen Simulationsprogramm Delphin 4 [38].

Tab. 16 Kennwerte der Mineralwolldämmung

Rohdichte	[kg/m³]	14
Porosität	[Vol-%]	95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]	0,037
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	[%/M-%]	1,0
Sorptionsfeuchten w [kg/m³] bei $T = 23^\circ\text{C}$ und:	$\phi = 10 \%$	0,4
	$\phi = 30 \%$	0,6
	$\phi = 50 \%$	0,7
	$\phi = 80 \%$	0,8
	$\phi = 93 \%$	1,5
	$\phi = 95 \%$	2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	[-]	1,3

2.2.1.4 Feuchtevariable Dampfbremse

Als raumseitig diffusionshemmende Schicht wurde in Teilbereichen des Versuchsstandes die feuchtevariable Dampfbremse *Intello* der Firma proclima (Moll) verwendet. In der Simulationen wurde der in der WUFI-Datenbank enthaltene Datensatz *Intello* herangezogen.

Tab. 17 Kennwerte der feuchtevariablen Dampfbremse

Rohdichte	[kg/m³]	115
Porosität	[Vol-%]	8,6
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2500
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]	2,4
Sorptionsfeuchten w [kg/m³] bei $T = 23^\circ\text{C}$ und:	$\phi = 80 \%$	6,7
	$\phi = 93\%$	10
	$\phi = 100 \%$	85
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] bei: (unter Annahme von $d = 0,001 \text{ m}$)	$\phi = 0 \%$	26000
	$\phi = 17,5 \%$	26000
	$\phi = 25 \%$	16000
	$\phi = 50 \%$	6900
	$\phi = 72,5 \%$	1500
	$\phi = 90 \%$	320
	$\phi = 97,5 \%$	250

2.2.1.5 PVC-Dachbahn

Als Dachbahn wurde die PVC-Bahn Wolfen M der Firma Wolfen/Henkel verwendet. Sie wurde im Versuchsstand sowohl als alleinige Dachabdichtung (Varianten 1.1 bis 2.2) als auch als Abdichtung unter dem Gründachaufbau (Varianten 3.1 bis 4.2) verwendet.

Die nachfolgend genannten Materialeigenschaften sind Angaben der Firma Wolfen/Henkel [33].

Tab. 18 Kennwerte der PVC-Dachbahn

Rohdichte	[kg/m ³]	1000
Porosität	[Vol-%]	0,2
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]	0,16
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (unter Annahme von $d = 0,0015$ m)	[-]	12667

2.2.1.6 Gründach-Substrat

Die Bestimmung der Eigenschaften des Gründachaufbaus erwies sich als aufwändig, da die reale Schüttdichte bei Prüfungen nur annähernd hergestellt werden kann. Das eingesetzte mineralische Substrat stammt von der Firma Optigrün [36].

Zur Überprüfung der hygrischen und thermischen Eigenschaften des Gründachsubstrates wurden mobile Temperatur- und Luftfeuchtefühler in der Substratschicht des Versuchsstandes eingebracht. Trotz aufgetretener Messwertausfälle und Unsicherheiten lassen diese Messungen darauf schließen, dass im Substrat fast durchgehend sehr hohe Luftfeuchten zwischen 90 und 100 % an der Grenzschicht zur Abdichtungsbahn herrschten. Nur ausgeprägte Trockenperioden führten zur Absenkung des Feuchteniveaus. Die Materialkennwerte der Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit wurden von der MFPA Leipzig ermittelt, weiterführende Werte wurden der Literatur entnommen, sind Erfahrungswerte der Autoerne und auf Grundlage der Messwerte am Versuchsstand angepasst sowie mit Messungen des IBP Holzkirchen abgeglichen.

Tab. 19 Kennwerte des Gründach-Substrats

Rohdichte	[kg/m ³]	1500
Porosität	[Vol-%]	95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/(m*K)]	0,5

2.2.2 Klimamessdaten

Um für die hygrothermische Simulation korrekte Klimadaten zur Verfügung zu stellen, wurden sowohl Außen- als auch Innenklima am Versuchsstand messtechnisch erfasst.

Die Wetterstation für das Außenklima nahm am 20.11.2007 ihren Betrieb auf und erfasst seitdem Temperatur und Relative Feuchte der Außenluft, Kurzwellige Globalstrahlung, Vertikale Regenstromdichte, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck.

Für die Berechnung des hygrothermischen Verhaltens eines flach geneigten Dachs ist zudem die langwellige Strahlungsbilanz von großer Bedeutung. Die messtechnische Erfassung von Bedeckungsgrad und/oder langwelliger atmosphärischer Strahlung („Gegenstrahlung“) erweist sich jedoch als messtechnisch sehr aufwändig und wird vorrangig von speziellen meteorologischen Instituten durchgeführt. Für das bei den Simulationen verwendete Außenklima wurde deshalb im Falle des Bedeckungsgrads auf Daten des Deutschen Wetterdienstes (Station Leipzig-Schkeuditz, etwa 15 km entfernt vom Versuchsstand) zurückgegriffen.

Für das Innenklima wurden die gemessenen Temperaturen und relative Luftfeuchten des Versuchsstandes genutzt.

2.2.2.1 Außenklima

Temperatur und Relative Feuchte der Außenluft.

Die Temperatur der Außenluft wurde von der Wetterstation am Versuchsstand erfasst (vgl. Abb. 15). Vergleiche mit hinzugezogenen Messwerten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am Standort Leipzig-Schkeuditz zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

Während der erste Winter des Untersuchungszeitraums in der Region Leipzig 2007/2008 relativ mild war - die mittlere Außenlufttemperatur 20.11.07-17.01.08 betrug 2,6 °C -, ist der zweite Winter 2008/2009 als deutlich kälter (mittlere Außenlufttemperatur 20.11.08-17.01.09: 0,3 °C) einzustufen.

Es sei besonders hingewiesen auf die für die Region Leipzig extrem kalten Tage zu Anfang Januar 2009: Am 6.1.09, dem kältesten Tag dieses Zeitraums, fiel die Lufttemperatur auf bis zu -19,8 °C.

Für die Ergebnisse im Versuchsgebäude und die hygrothermischen Berechnungen relevant ist ebenso die Schlechtwetterperiode zu Anfang Juni 2008 sowie der schnelle Abfall der Außenlufttemperatur Mitte September 2008.

Die Relative Luftfeuchte (vgl. Abb. 16) wurde ebenfalls in der Nähe des Versuchsgebäudes erfasst. Sie zeigt den typischen Jahresverlauf. Auffällig ist jedoch, dass die Werte nur sehr selten Werte von bis zu 99 % aufweisen, was auf die Art des messtechnischen Erfassungssystems zurückzuführen ist, dessen Schwächen sich vor allem im hochfeuchten Bereich zeigen. Aus Sicht der Autoren ist dies aber wegen der relativ diffusionsdichten Dachabdichtung ($s_d = 19 \text{ m}$) vernachlässigbar.

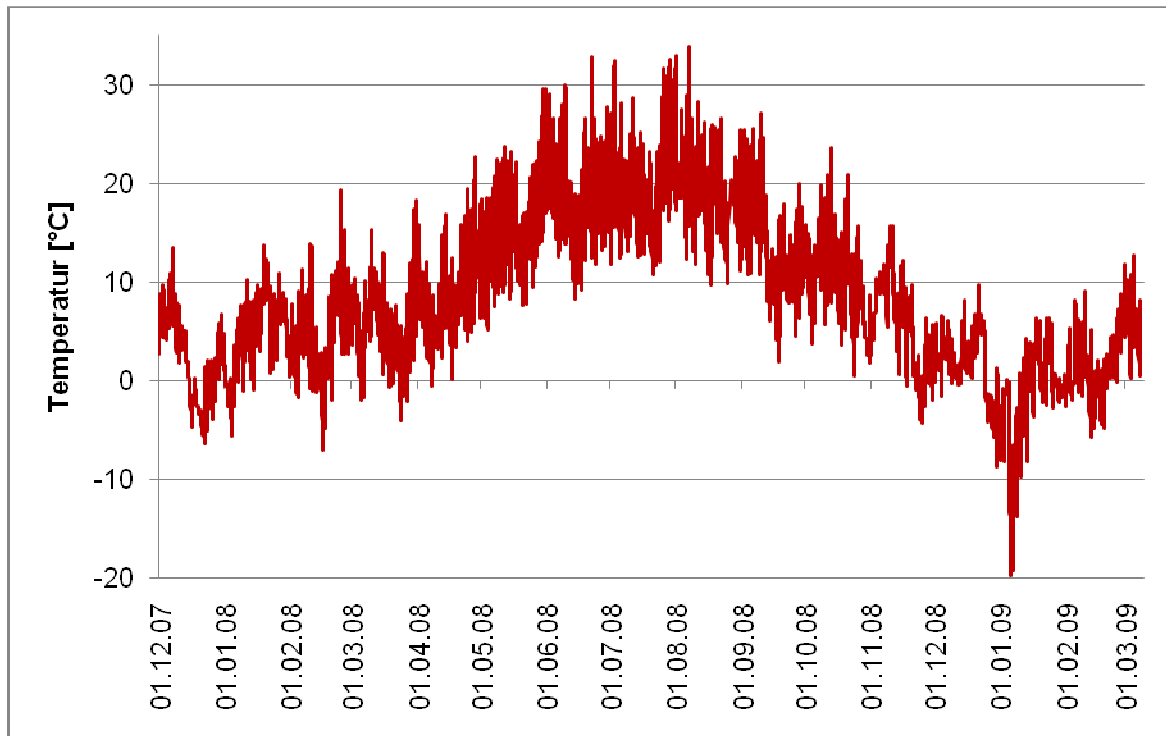


Abb. 15 Temperatur der Außenluft, gemessene Stundenmittelwerte

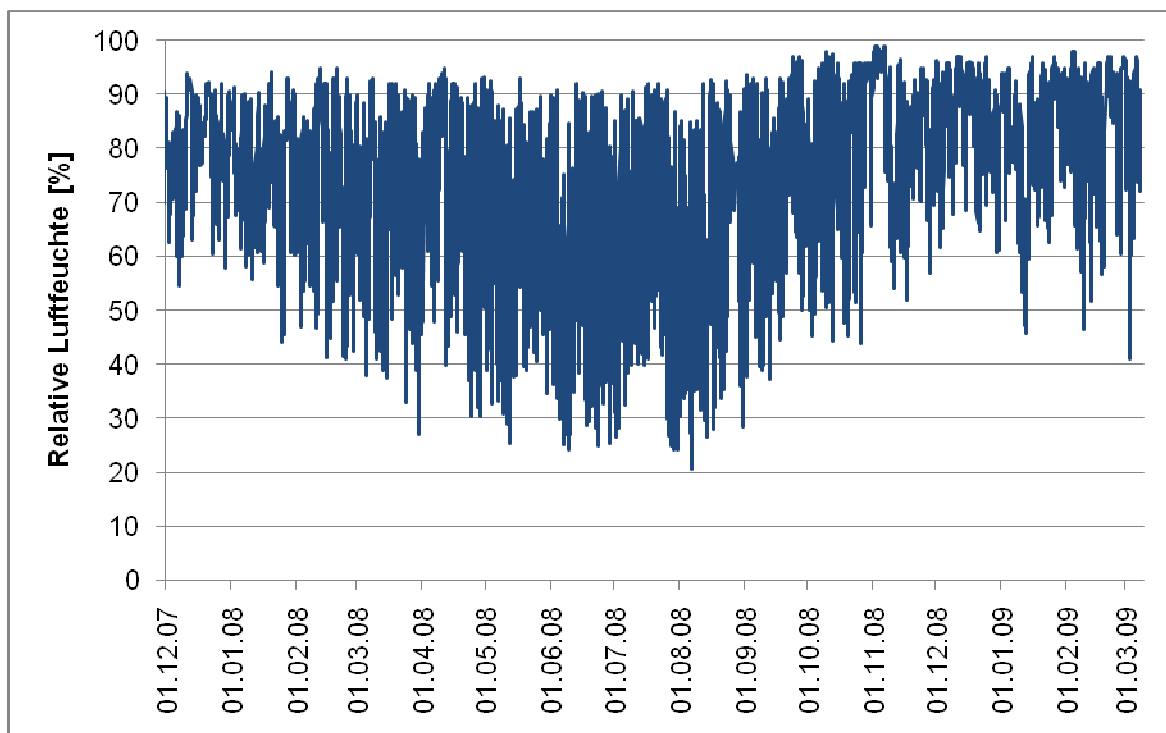


Abb. 16 Relative Feuchte der Außenluft, gemessene Stundenmittelwerte

Kurzwellige Globalstrahlung.

Die Strahlungswärmestromdichte der kurzwelligen Globalstrahlung (Summe aus direkter und diffuser solarer Strahlung auf die Horizontalfläche) wurde am Versuchsstand erfasst. Vergleichswerte konnten vom DWD nicht bezogen werden. Die Messdaten stehen wegen der aufwändigen Kalibrierung der Messtechnik erst ab Januar 2008 zur Verfügung.

Die Daten zeigen den typischen Verlauf mit Maximum in Sommermitte. Auffällig sind die besonders strahlungsreichen Perioden Anfang Mai 2008 und Ende Juli 2008 (vgl. Abb. 17).

Die jährliche Strahlungssumme betrug 1004 kWh/m^2 , ein vergleichsweise hoher Wert, wenn man z.B. die jährliche Strahlungssumme des für den Standort gültigen Testreferenzjahres Nr.4 [39] (Nordostdeutsches Tiefland/ Potsdam) von $953 \text{ kWh/(m}^2)$ bedenkt.

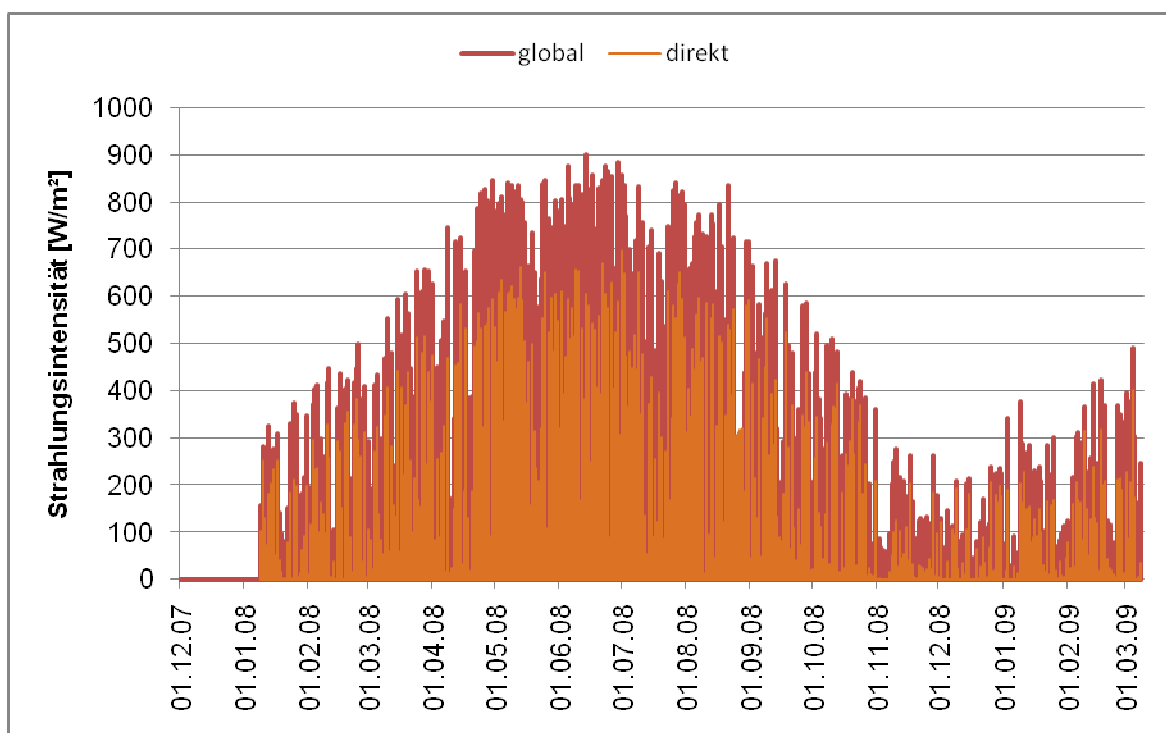


Abb. 17 Strahlungsintensität der solaren Strahlung, gemessene Stundenmittelwerte

Die Strahlungsintensität der Globalstrahlung ist jedoch nur bedingt für die hygrothermische Simulation verwendbar. Nötig ist i.a. die Aufteilung der Globalstrahlung in ihre direkten und diffusen Anteile, auch wenn man dies im vorliegenden Fall (Dachneigung 2°) vernachlässigen könnte. Die Berechnung der direkten und diffusen Strahlungsanteile wird jedoch für die folgenden Parameterstudien gebraucht und wurde nach [40] durchgeführt. Das Programm WUFI hat auch intern einen solchen Algorithmus hinterlegt.

Regen.

Die vertikale Regenstromdichte [mm/h] wurde am Versuchsstand erfasst. Die Gesamt-Regenmenge für das Jahr 2008 betrug 351 mm, was für die Region Leipzig als sehr gering einzustufen ist. Das durchschnittliche Jahresmittel für die Region Leipzig wurde im Vergleich dazu im Zeitraum von 1961-1990 mit 512 mm angegeben.

Allerdings ist dies im vorliegenden Forschungsvorhaben zu vernachlässigen, da die Dachabdichtung im Versuchsgebäude dicht gegen Schlagregen ist.

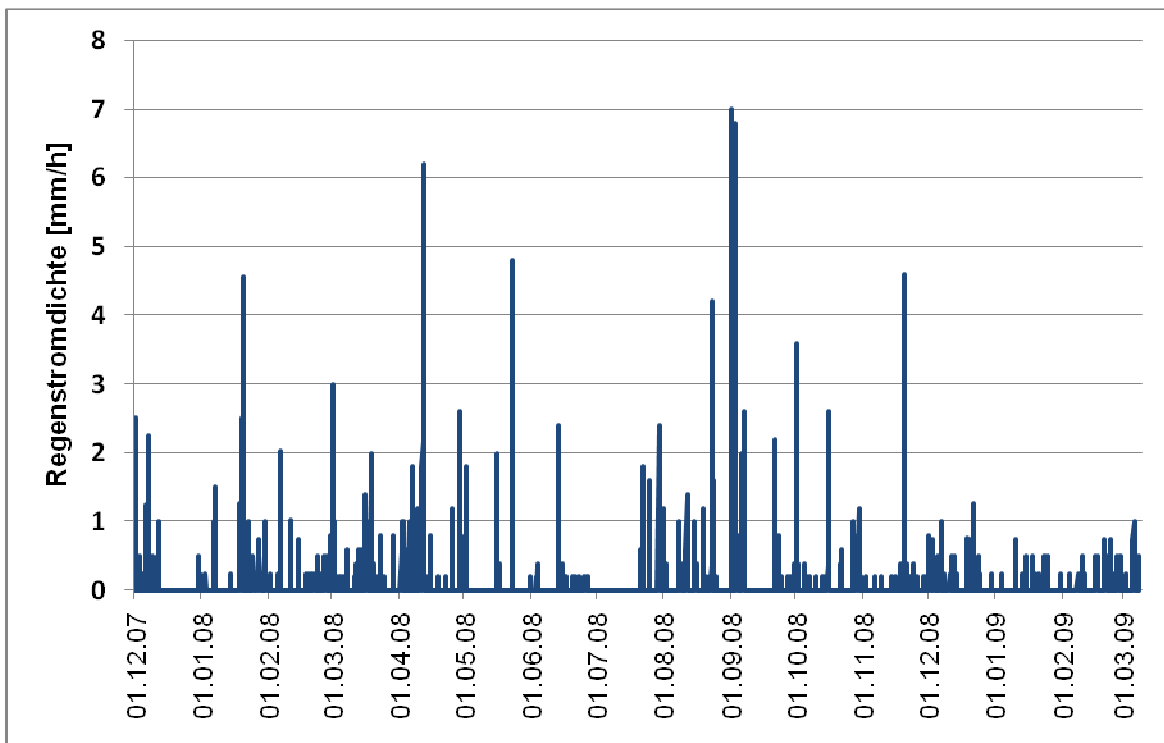


Abb. 18 Vertikale Regenstromdichte, gemessene stündliche Regensummen

Wind.

Es wurden Daten der Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Versuchsstand ermittelt. Diese werden bei hygrothermischen Simulationen für die Berechnung der Schlagregenstromdichte auf das Bauteil benötigt. Im vorliegenden Fall des Flachdachs ist jedoch die Schlagregenstromdichte (Regen senkrecht zur Bauteiloberfläche) identisch zur Vertikalen Regenstromdichte, sofern das um das Gebäude herrschende komplizierte Strömungsfeld vernachlässigt wird. Für den vorliegenden Fall wird dies seitens der Autoren jedoch als ausreichend erachtet und auf die Darstellung der Wind-Messdaten verzichtet.

Bedeckungsgrad.

Die langwellige Strahlungsbilanz darf bei einem flach geneigten Dach nicht vernachlässigt werden. In klaren Nächten kann die relativ hohe Oberflächentemperatur des Daches dazu führen, dass die langwellige Bauteilemission größer ist als die durch die Atmosphäre abgegebene „Gegenstrahlung“. Dies kann zu Oberflächenkondensat auf der Dachoberfläche führen und für das hygrothermische Verhalten der Dachkonstruktion von Bedeutung sein. Für den Bedeckungsgrad wurden Messwerte vom DWD der Station Leipzig-Schkeuditz herangezogen.

Der Bedeckungsgrad gibt den Anteil des Himmels an, welcher von Wolken bedeckt wird. Bei einem hohen Bedeckungsgrad ist die langwellige atmosphärische Strahlung deutlich erhöht gegenüber einem klaren Himmel, weil die Wolken tiefer liegen und somit mit einer höheren Temperatur als Grauer Strahler wirken.

Die langwellige atmosphärische Strahlung („Himmelsgegenstrahlung“) kann unter Verwendung von Temperatur und Relativer Feuchte der Außenluft sowie des Bedeckungsgrads berechnet werden. Dafür stehen gut validierte Korrelationen zur Verfügung [41], auch das Programm WUFI hat eine solche implementiert.

Der Bedeckungsgrad wird in Achteln oder [-] angegeben. Der mittlere Bedeckungsgrad betrug im Jahr 2008 $n = 0,68$.

Gut nachzuvollziehen ist beispielsweise die Schönwetterperiode zu Anfang Mai 2008, wo die Globalstrahlungswerte (vgl. Abb. 17) sehr hoch und die Regenstromdichte Null ist (Abb. 18). Dazu passend tritt eine Häufung der Bedeckungsgrade 0 und 0,125 auf, hingegen gibt es bei den höheren Bedeckungsgraden ($n > 0,625$) „Lücken“.

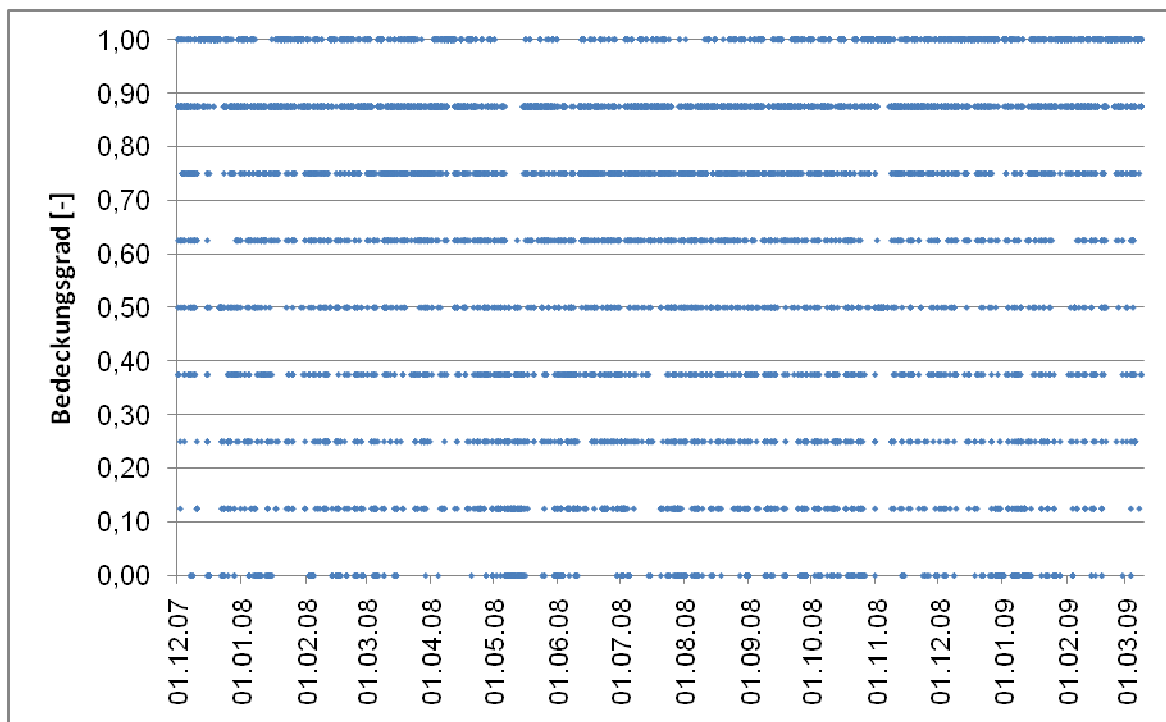


Abb. 19 Bedeckungsgrad des Himmels

2.2.2.2 Innenklima

Das Innenklima im Versuchsgebäude wurde mit Hilfe von Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchter elektronisch nach vorgegebenen Werten geregelt.

Als Ziel-Raumklimabedingungen wurde dabei das Klima „Innenklima, hohe Feuchtelast“ aus [42] verwendet. Es wird abgebildet durch eine jeweils im Jahresverlauf sinusförmige Funktion mit $T=21 \pm 1^\circ\text{C}$ sowie $\phi = 55 \pm 5\%$ (mit Maximum im August).

Folgende Abbildung zeigt das real vorhandene Innenklima im Versuchsgebäude:

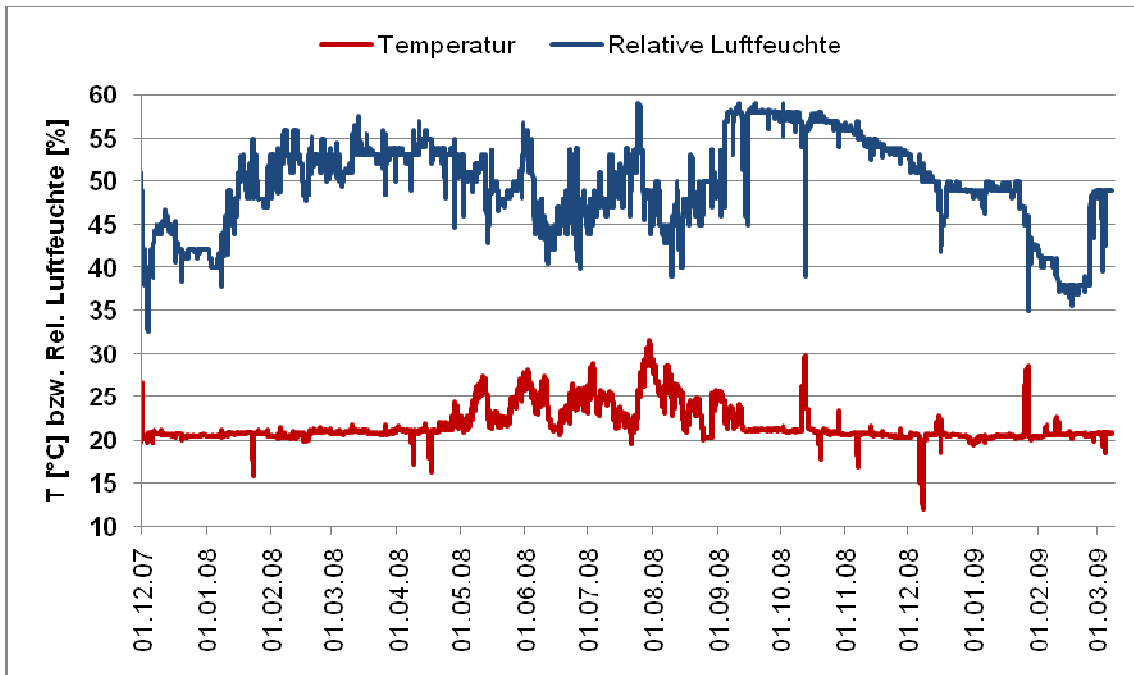


Abb. 20 Temperatur und Relative Luftfeuchte im Versuchsstand, gemessene Stundenmittelwerte

Wegen eines Ausfalls des Befeuchters wurde der Wert von 60 % Relativer Luftfeuchte als sommerliches Maximum nicht erreicht. Ab Ende August ist jedoch der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Vergleich zum Ziel-Verlauf wieder erreicht.

Im Sommer erwies sich die Kühlleistung des Geräts als nicht ausreichend, sodass die Temperatur mehrmals über 25°C anstieg. Dadurch ist die o.g. Abweichung der Relativen Luftfeuchte von den Zielvorgaben zu erklären. Seit Herbst 2008 verläuft die Temperatur im Versuchsstand jedoch weitgehend entlang der Zielfunktion.

Die erhöhte Temperatur im Sommer wird von den Autoren nicht als kritisch angesehen, da sie den realen Verhältnissen in einer Wohn- oder Bürosituation angemessen ist. Außerdem liegen die Projektergebnisse damit „auf der sicheren Seite“ - der sommerliche Dampfdruck im Innenraum ist höher als der planmäßig vorgesehene, die sommerliche Austrocknung wurde dadurch erschwert.

Das gewählte Innenklima stellt seit Herbst 2008 eine hohe Beanspruchung an die Dachaufbauten im Versuchsgebäude dar. Dies gilt insbesondere in Verbindung mit den sehr niedrigen Außenlufttemperaturen im Januar 2009.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse Versuchsstand

3.1.1 Oberflächentemperaturen – Deckschichteinfluss

Als eine der maßgebenden Ursachen für Diffusionsvorgänge durch Bauteile ist die Temperaturdifferenz zwischen den Bauteiloberflächen anzusehen. Besonders die Oberflächentemperatur der Außenseite nimmt bei Flachdachkonstruktionen eine besondere Bedeutung ein. Beeinflusst wird diese neben der Außenlufttemperatur vor allem durch Strahlungs- und Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von der Ausbildung und Art der Deckschichten. Für die Oberflächentemperaturen des Versuchsstandes wird diese in Form von Tagesmittelwerten über den Untersuchungszeitraum in nachstehender Abb. 21 dargestellt:

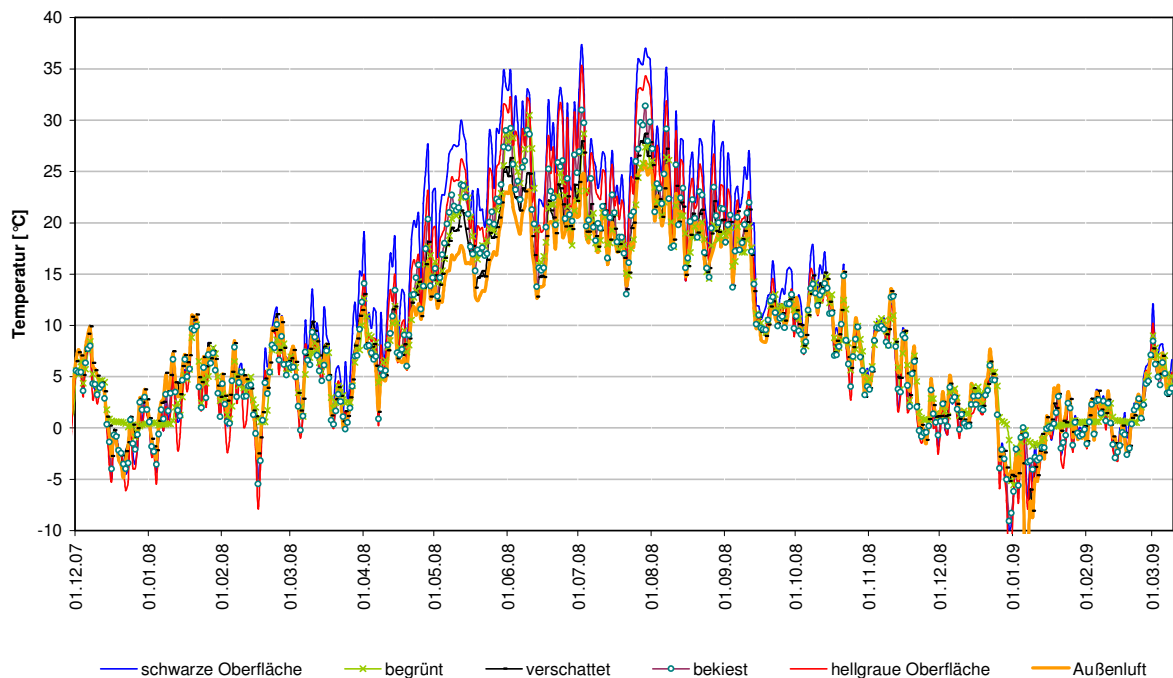


Abb. 21 Tagesmittelwerte der Oberflächentemperatur unter der Dachabdichtung für die untersuchten Deckschichten sowie Außenlufttemperatur

Deutlich erkennbar ist dabei der sinusförmige Verlauf der Außenlufttemperatur über die Untersuchungsperiode und dazu kongruent das Verhalten der Oberflächentemperaturen bei unterschiedlicher Deckschichtausbildung. Ersichtlich wird vor allem, dass besonders in den Sommermonaten mit hoher Strahlungsintensität die Oberflächentemperaturen im Tagesmittel deutlich oberhalb der Außenlufttemperatur auftraten. In den Wintermonaten trat hingegen bei unbedecktem Himmel eine nächtliche Unterkühlung mit Unterschreitung der Außenlufttemperatur auf. Die größten Amplituden traten im Winter sowie im Sommer bei den

Varianten mit schwarzer und grauer Dachbahn auf. Unterschiede zwischen beiden Oberflächentemperaturen sind auf den höheren Absorptionsgrad der schwarzen Dachbahn im Vergleich zur grauen Bahn zurückzuführen. Hierbei wird die zusätzlich absorbierte kurzwellige (solare) Strahlung in Wärmeenergie umgewandelt und führt zu höheren Oberflächentemperaturen. Die zusätzlich wärmespeichernden Deckschichten (Gründach, Kies), aber auch die Verschattung der Dachoberfläche reduzierten ersichtlich die Oberflächentemperaturen.

Um diese Einflüsse gezielter aufzuzeigen, werden in nachstehenden Abbildungen für jeweils zwei Winter (Abb. 22), als auch für zwei Sommerdekaden (Abb. 23) die Oberflächentemperaturen als Stundenwerte dargestellt.

Winterfall. (2.1.09-22.1.09)

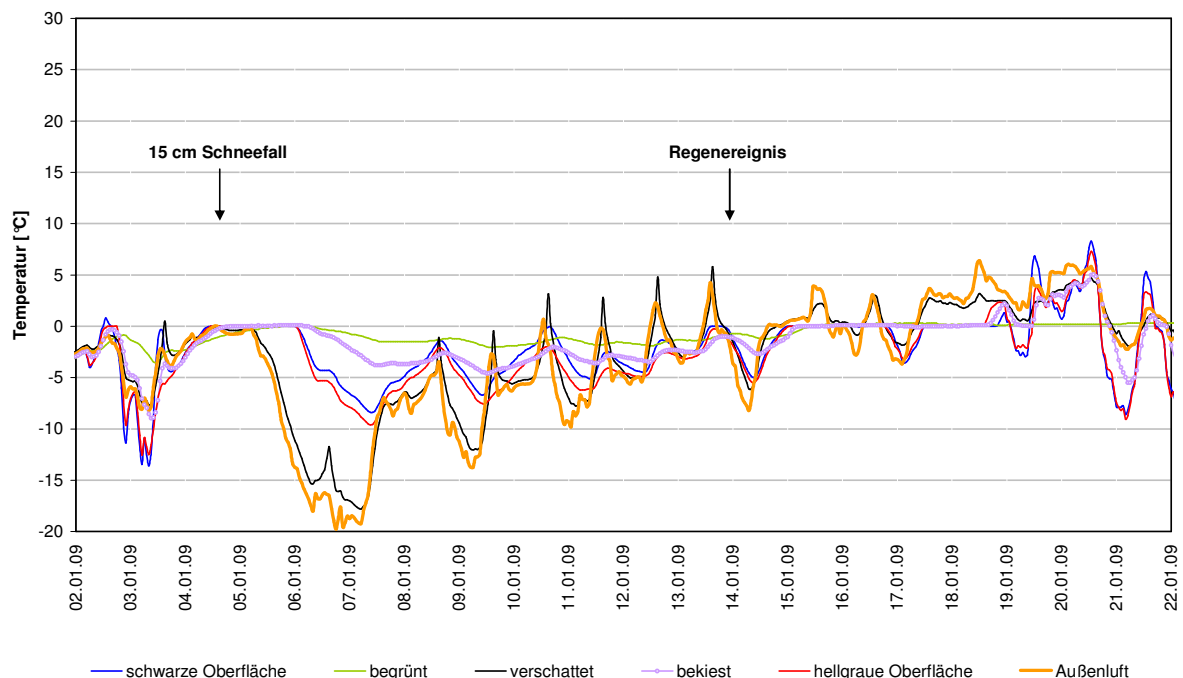


Abb. 22 Gemessene Stundenwerte der Oberflächentemperatur unter der Dachabdichtung für die untersuchten Deckschichten sowie Außenlufttemperatur (Winterfall)

Auffällig in den Winterdekaden stellt sich vor allem die Oberflächentemperatur unterhalb des Gründachaufbaus dar. Trotz starker Schwankungen der Außenlufttemperatur in den Stundenwerten (- 20°C bis 5°C) blieb das Gründach am „wärmsten“ und sank kaum unter 0°C ab, was die Ergebnisse aus [13] bestätigt.

Infolge der wasserspeichernden Wirkung der Substratschicht kam es bei Frostperioden, wie z.B. ab dem 06.01.2009, zur Eisbildung im Substrat. Diese Eis-Substratschicht wirkte als Latentwärmespeicher und führte trotz starker Schwankungen der Außenlufttemperatur zu annähernd konstanten Oberflächentemperaturen. Ein ähnliches Verhalten in weniger ausgeprägter zeitlicher Form zeigte die Kiesdeckschicht (15.01 bis 18.01.2009), da hier ebenfalls durch auftretenden Schneeregen Eisbildung einsetzte.

Aber auch bei den Varianten mit Schwarzer (oder heller) Bahn kam es zu wärmeisolierenden Effekten durch die Verbindung von Niederschlag und Frost: in diesem Fall bildete sich ab 5.1.09 eine Schneedecke auf dem Dach, die ein zur Außenlufttemperatur äquivalentes Absinken der Oberflächentemperatur unter der Abdichtung verhinderte. Ausnahme bildete hier die verschattete Fläche, da der Schnee in dieser Untersuchungsvariante auf der stationären Verschattung lag. Auffällig stellen sich ebenfalls die nächtlichen Unterkühlungen der Dachoberfläche unterhalb der Außenlufttemperatur dar (03.01.2009 und 21.01.2009). Bei klarem und wolkenlosen Himmel wird die langwellige Ausstrahlung der Bauteiloberfläche durch die atmosphärische Gegenstrahlung nur teilweise kompensiert und führt zum Abfall der Oberflächentemperatur unter die Lufttemperatur.

Sommerfall. (23.5.08-13.6.08)

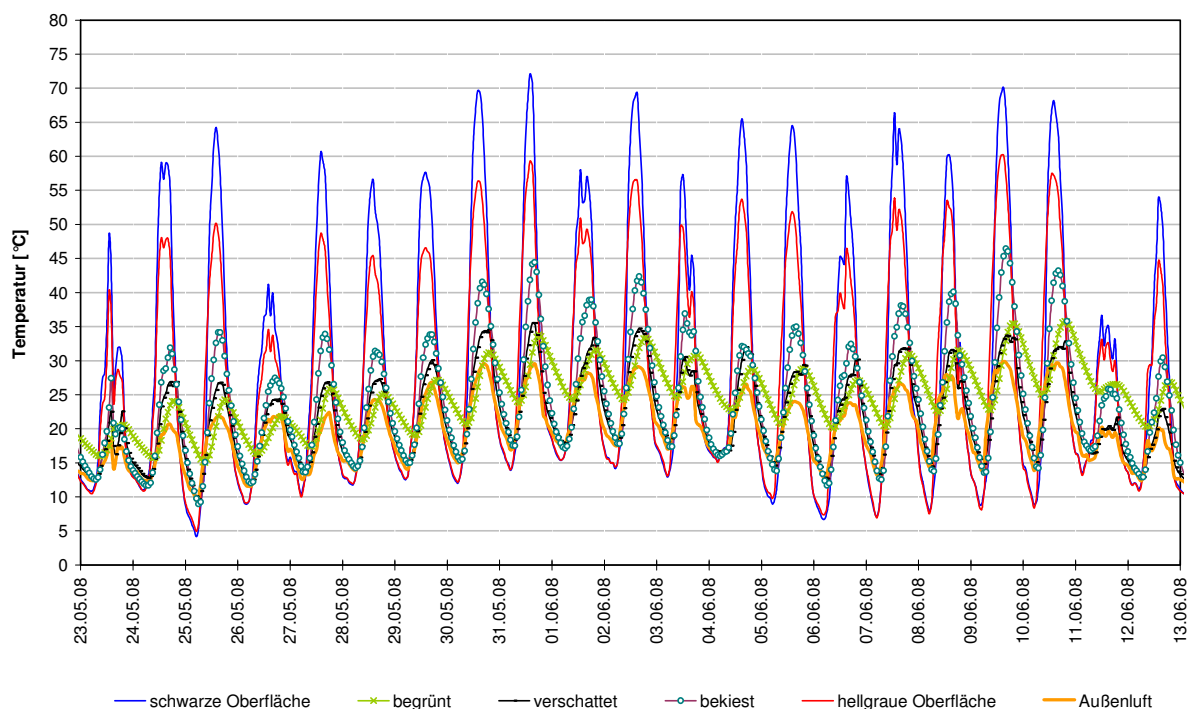


Abb. 23 Gemessene Stundenwerte der Oberflächentemperatur unter der Dachabdichtung für die untersuchten Deckschichten sowie Außenlufttemperatur (Sommerfall)

Aus den Stundenmittelwerten der Sommerdekaden wird ebenfalls der Strahlungseinfluss deutlich sichtbar - trotz Außenlufttemperaturen von maximal 30°C waren Oberflächentemperaturen der schwarzen Dachbahn von über 70°C zu verzeichnen. Ebenfalls zeigte sich bei den nicht abgedeckten Bahnen infolge der nächtlichen Abstrahlung eine Unterkühlung der Oberflächentemperatur im Vergleich zur Außenluft von bis zu 5°C. Der Gründachaufbau zeigte erwartungsgemäß in Bezug auf die Schwankungen der Temperaturen die kleinste Amplitude, im Mittel lagen hier die Temperaturen ca. 5-7°C über der Außenlufttemperatur. Gleichzeitig wies dieser Aufbau infolge der zusätzlichen

Speichermasse des Substrates eine Phasenverschiebung der Temperaturmaxima von ca. 3-4 Stunden auf.

Verschattung und Kiesabdeckung führten in den Sommerdekaden zu Nachttemperaturen, die der Außenluft entsprachen. Im Tagesmaximum wies der Aufbau mit Kiesauflage höhere Oberflächentemperaturen an der Abdichtungsbahn als die Verschattung auf. Durch die Kiesauflage war gleichzeitig eine Phasenverschiebung des Temperaturmaximums von ca. einer Stunde zu verzeichnen.

Die höheren Tages-Oberflächentemperaturen der verschatteten Fläche im Vergleich zur Außenlufttemperatur kann auf zusätzlichen Strahlungsaustausch zwischen der durch die solare Strahlung erwärmten Holzwerkstoffplatte, die als Verschattung diente, und der Dachoberfläche selbst zurückgeführt werden. Ersichtlich wird aus dieser Darstellung, dass besonders zusätzliche Deckschichten wie Kiesauflage oder ein Gründachaufbau, sowie Verschattungen die Oberflächentemperatur im Vergleich zu unbedeckten Dachbahnen deutlich absenken können. Die Auswirkung auf die sommerliche Rückdiffusion und das damit verbundenen Austrocknungsverhalten der einzelnen Konstruktionsaufbauten wird in den nachfolgenden Abschnitten aufgezeigt.

3.1.2 Varianten Schwarze Bahn

Oberflächentemperatur unter Schwarzer Bahn.

Erwartungsgemäß verliefen die Oberflächentemperaturen unter der Schwarzen Bahn für alle vier Varianten 1.1 bis 2.2 annähernd identisch. Sie folgten im Wesentlichen der Außenlufttemperatur. Sichtbar sind die besonders sonnenstrahlungsreichen Tage zu Anfang Mai 2008 und Ende Juli 2008, in denen die Differenz zwischen Luft- und Oberflächentemperatur besonders hoch war. Im Winter hingegen verliefen Außenluft- und Oberflächentemperaturen fast gleich (Abb. 24)..

Die Oberflächentemperatur unter der Schwarzen Bahn stellt eine gute Validierungsmöglichkeit für die hygrothermische Simulation dar: Bei der Simulation mit allen Klimaparametern Temperatur, Luftfeuchte, kurzwellige Strahlung, langwellige Strahlung und Regen kann es leicht zu thermischen Fehlern kommen, welche mithilfe der gemessenen Oberflächentemperatur überprüft werden können. Dies ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auch geschehen.

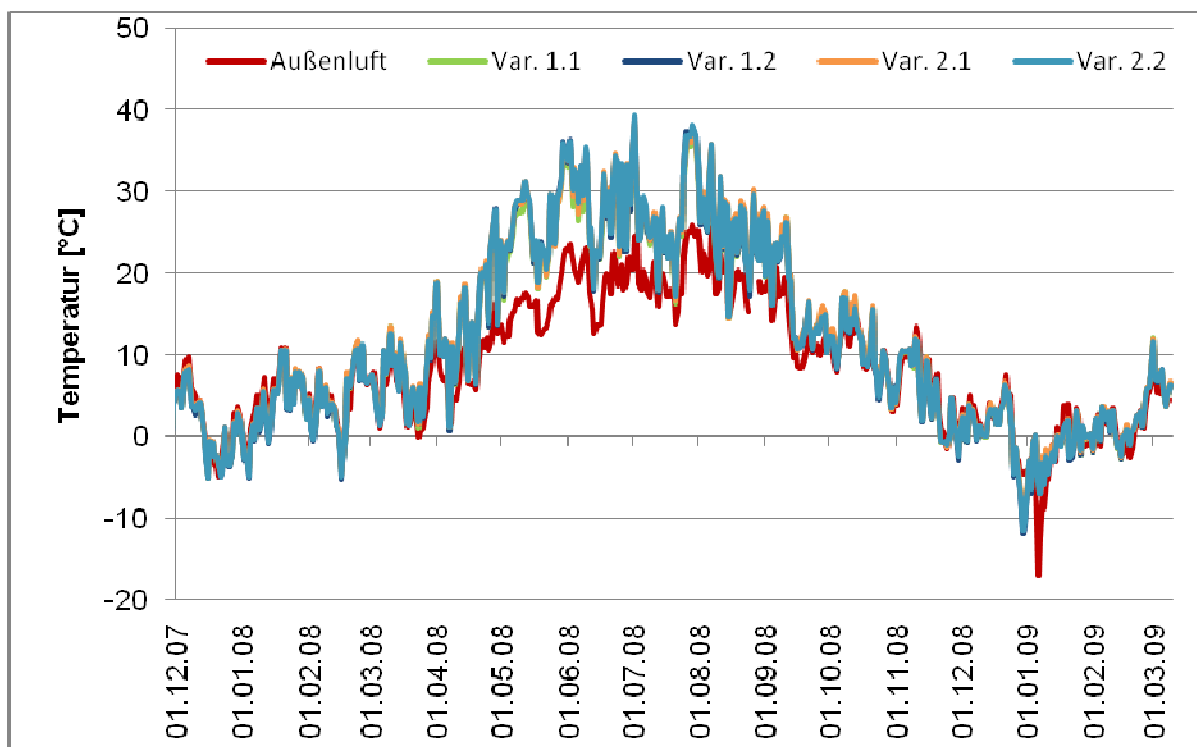


Abb. 24 Tagesmittelwerte der Oberflächentemperatur unter Schwarzer Bahn für Varianten 1.1 bis 2.2 sowie Außenlufttemperatur

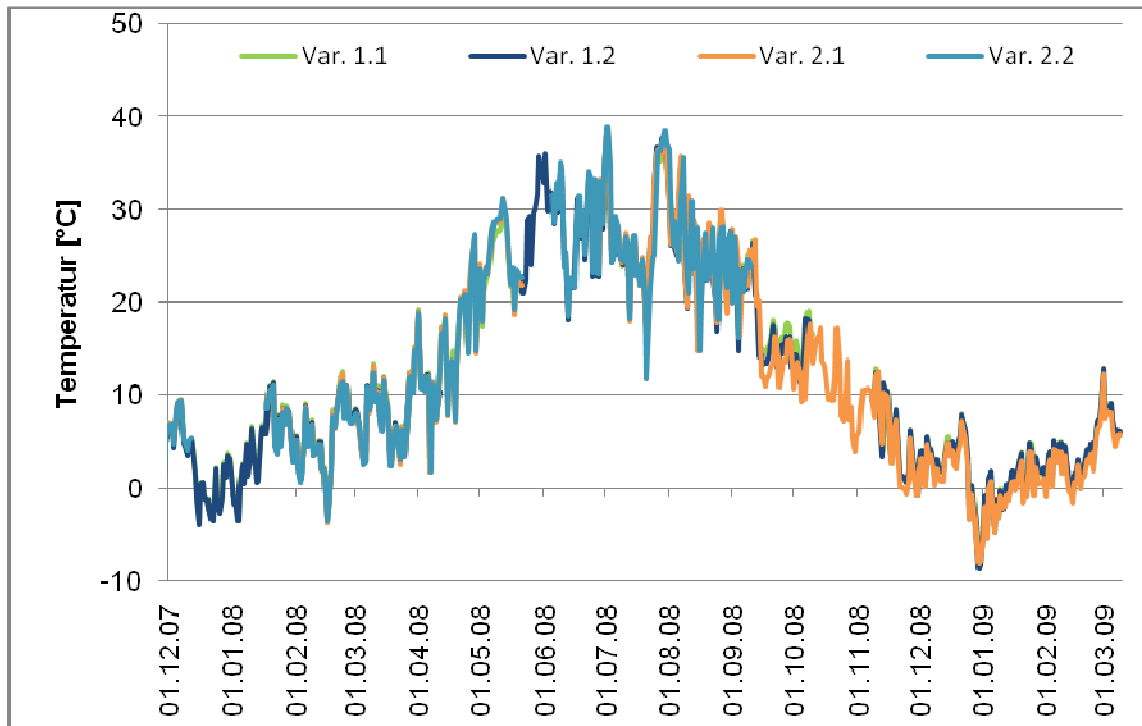
Temperatur und Relative Luftfeuchte zwischen Dämmung und oberseitiger OSB.

Abb. 25 Tagesmittelwerte der Temperatur in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB) für Varianten 1.1 bis 2.2

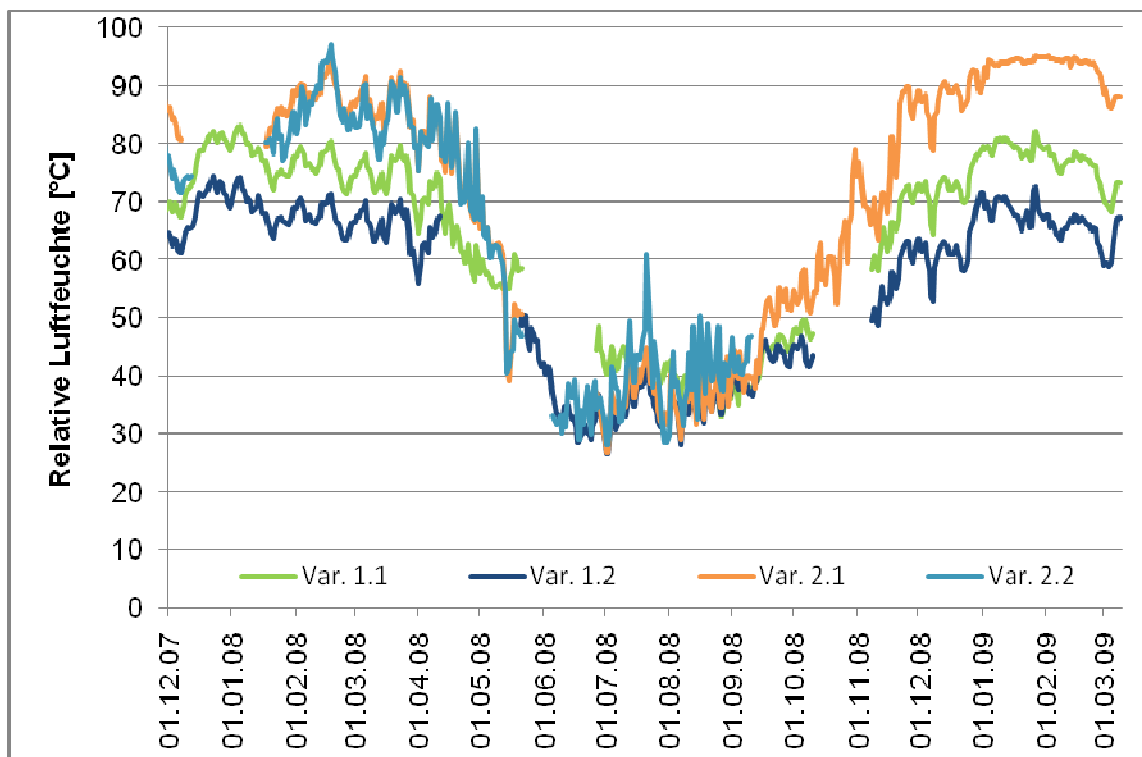


Abb. 26 Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB) für Varianten 1.1 bis 2.2

Eines der wichtigsten Ergebnisse des Projekts bildete die Ermittlung der Relativen Luftfeuchte in der kritischen Ebene, zwischen Dämmung und oberseitiger OSB (Abb. 26). Während die dazugehörige Temperatur (Abb. 25) für alle vier Varianten unter schwarzer Bahn erwartungsgemäß sehr ähnlich verlief, traten bei der relativen Luftfeuchte starke Unterschiede auf:

Für die Variante 2.2 erfolgte die Darstellung der Messwerte nur bis Mitte September 2008. Ein aufgetretener konstruktiver Mangel infolge einer Revision führte hier zu einer Verfälschung der Messergebnisse, was jedoch erst nach Öffnung dieses Gefachs, im März 2009, festgestellt werden konnte. Die Beurteilung dieser Ausführungsvariante erfolgt demzufolge auf Basis der validierten hygrothermischen Simulation (Abschnitt 3.2 und 3.3).

Ein Vergleich der beiden Dämmstoffvarianten Zellulose und Mineralwolle zeigt eindeutig, dass beide Varianten mit Zellulose (Var. 1.1 und 1.2) zu deutlich trockeneren Bedingungen in der kritischen Ebene führten. Bei den raumseitig diffusionshemmenden Schichten/Abdeckungen wies die feuchtevariable Dampfbremse klare Vorteile gegenüber der OSB-Platte auf, was auf den variableren Diffusionswiderstand zurückzuführen ist (vgl. Abb. 7). So ist die Variante 1.2 (Zellulose - Feuchtevariable Dampfbremse) die feuchtetechnisch unkritischste und die Variante 2.1 (Mineralwolle - OSB) die feuchtetechnisch kritischste.

Die Varianten mit Zellosedämmung wiesen im Vergleich zwischen beiden Winterperioden in der zweiten Winterperiode (2008/2009) geringere Feuchten auf, obwohl die aufgetretenen Randbedingungen als „strenger“ anzusehen sind - sodass insgesamt von einer Austrocknung auszugehen ist. Diese beiden Varianten sind hinsichtlich ihres hygrothermischen Verhaltens, mit Relativen Luftfeuchten unterhalb des Wertes von 80 %, als unkritisch zu bewerten.

Die Variante 2.1 ist hingegen in den Wintermonaten mit einer auftretenden Relativen Luftfeuchte über mehrere Wochen von 95 % als kritisch einzuschätzen. Eine Zuordnung zur Nutzungsklasse 3 [18] wäre dementsprechend gerechtfertigt, was im Regelfall Holzfeuchten über 20 M-% nach sich zieht (vgl. [29] – hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka- Fichte). Infolge des Verlaufs der Relativen Luftfeuchte der Vormonate sind für die Var. 2.2 im Winter 2008/2009 Werte zu erwarten, die zwischen Var. 1.1 und Var. 2.1 verlaufen. Kritische Feuchtezustände für die Relative Luftfeuchte lassen sich nicht ausschließen.

Während der Sommermonate ließ sich für alle Aufbauten eine deutlich reduzierte Relative Luftfeuchte von 30 - 35 % in der kritischen Ebene feststellen, was auf die hohen Oberflächentemperaturen zurückzuführen ist.

In Bezug auf die vorgefundenen Feuchtezustände muss angemerkt werden, dass diese maßgeblich auf die extremen Innenraumbedingungen in den Wintermonaten, mit Relativen Luftfeuchten von > 50 % zurück geführt werden können. Bei üblicher Nutzung als Wohnraum sind diese Feuchtezustände des Innenraumes, besonders bei den tiefen Außentemperaturen des Winters 2008/2009 real nur selten zu erwarten. Eine spezifische Aussage zu kritischen Feuchtezuständen der Var. 2.1 und 2.2 lässt sich somit erst auf Grundlage weiterführender hygrothermischer Simulationsrechnungen/Parameterstudien ableiten (vgl. Abschnitt 3.3).

Holzfeuchten und Feuchten der Holzwerkstoffplatten.

Messtechnisch erfasst wurden ebenfalls die Materialfeuchten der OSB-Platte in der Mitte und am Rand des Gefachs sowie die Holzfeuchte des Sparrens.

Als kritische Stelle der Konstruktion muss die „kalte“ Ecke des Sparrens bzw. die benachbarte Stelle in der OSB-Platte angesehen werden, weil der Sparrenquerschnitt eine konstruktive Wärmebrücke darstellt (vgl. [8]). Andererseits hat der Sparren ein relativ hohes Feuchte-Speicher-Vermögen und trägt zur Entspannung der hygrischen Situation bei.

Die Unterschiede in den Materialfeuchten der OSB-Platte sind insgesamt relativ gering, wie folgende Abb. 27 beispielhaft für Variante 1.2 zeigt:

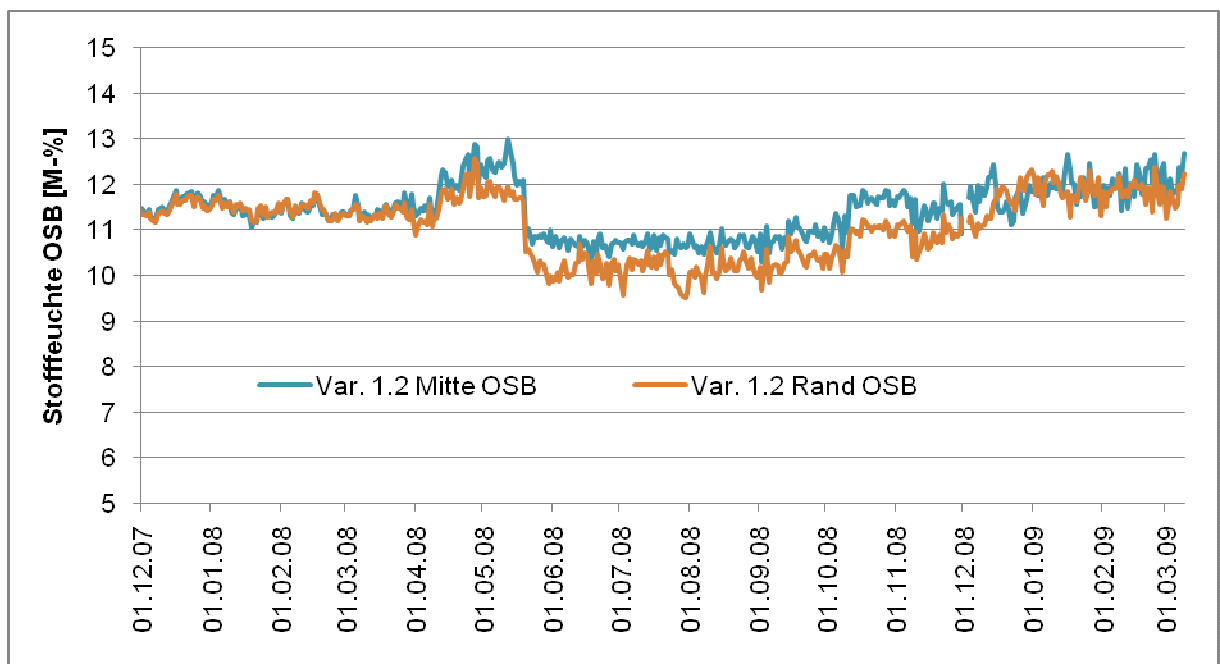


Abb. 27 Tagesmittelwerte der Stofffeuchte der OSB-Platte für Variante 1.2, Vergleich zwischen Mitte und Rand des Gefachs

Entgegen den Erwartungen der Autoren war die OSB-Platten-Feuchte am Gefachrand niedriger als in Gefachmitte. Dies ist sicherlich auf die Sorptionsfähigkeit des Sparrens zurückzuführen.

Abb. 29 und Abb. 30 zeigen die Stofffeuchten von OSB-Platten und Sparren für alle vier Varianten unter Schwarzer Bahn im Vergleich:

Entsprechend den Messungen der relativen Luftfeuchte zwischen OSB-Platte und Dämmung verlaufen die Stofffeuchten bei den Varianten 1.1 und 1.2 (Zellulose-Dämmung) unkritisch. Selbst während der sehr kalten Tage zu Anfang Januar 2009 gab es hier (Var.1.1 und 1.2) in der OSB-Platte keinen nennenswerten Anstieg der Stofffeuchte.

Hingegen stieg die Feuchte in den OSB-Platten (am Gefachrand) für die Variante 2.1 stark an und erreichte kritische Werte von über 26 M-% (Var. 2.1). Zurückführen ließ sich dieses Phänomen auf Oberflächenkondensat an der OSB-Platte, welches die Deckschicht des Plattenmaterials auffeuchtete. Einzelmessungen der Holzfeuchte nach Öffnung des Gefachbereichs (09.03.2009) bestätigten dies. Schimmelpilzbefall wurde bei der optischen Begutachtung in den Gefachen der Variante 2.1 und 2.2 jedoch nicht verzeichnet.



Abb. 28 Oberflächenkondensat an der OSB-Platte, Var. 2.1

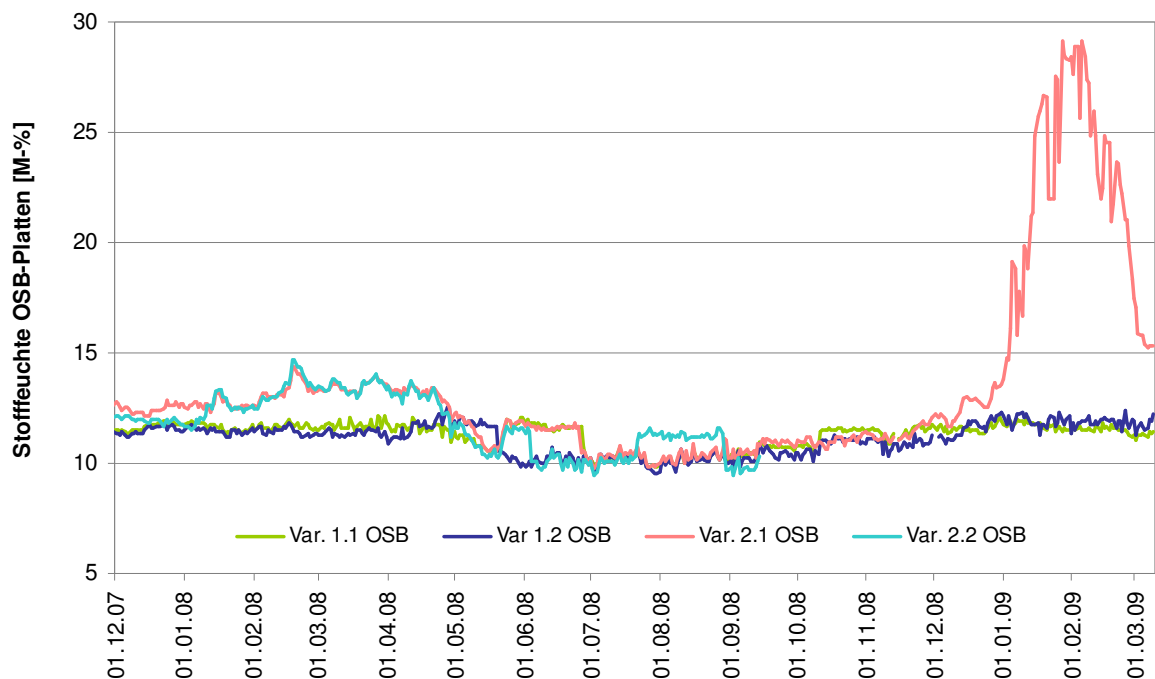


Abb. 29 Tagesmittelwerte der Materialfeuchte der OSB-Platten, Gefachrand

Für die Holzfeuchten in den Sparren (Abb. 30) ist der Jahresgang mit Maximum zu Ende des Winters und Minimum im Sommer ebenfalls gut ablesbar. Erwartungsgemäß verhielten sich auch hier die Varianten mit Zellulose-Dämmung deutlich trockener als die Varianten mit Mineralwolle-Dämmung. Die maximal auftretenden Holzfeuchten lagen mit 16,9 M-% (Var. 1.1) bzw. 15,5 M-% (Var. 1.2), dies jeweils nur kurzzeitig, im unkritischen Bereich. Die feuchtevariable Dampfbremse sorgte auch hier für niedrigere Holzfeuchten.

Bei den Varianten mit Mineralwolle-Dämmung traten deutlich höhere Holzfeuchten auf: max. 18,2 M-% (Var. 2.1).

Die Holzfeuchten im Sparren sind jedoch insgesamt, für alle Varianten, unproblematischer als die Stofffeuchten der OSB-Platten und können als unkritisch eingestuft werden.

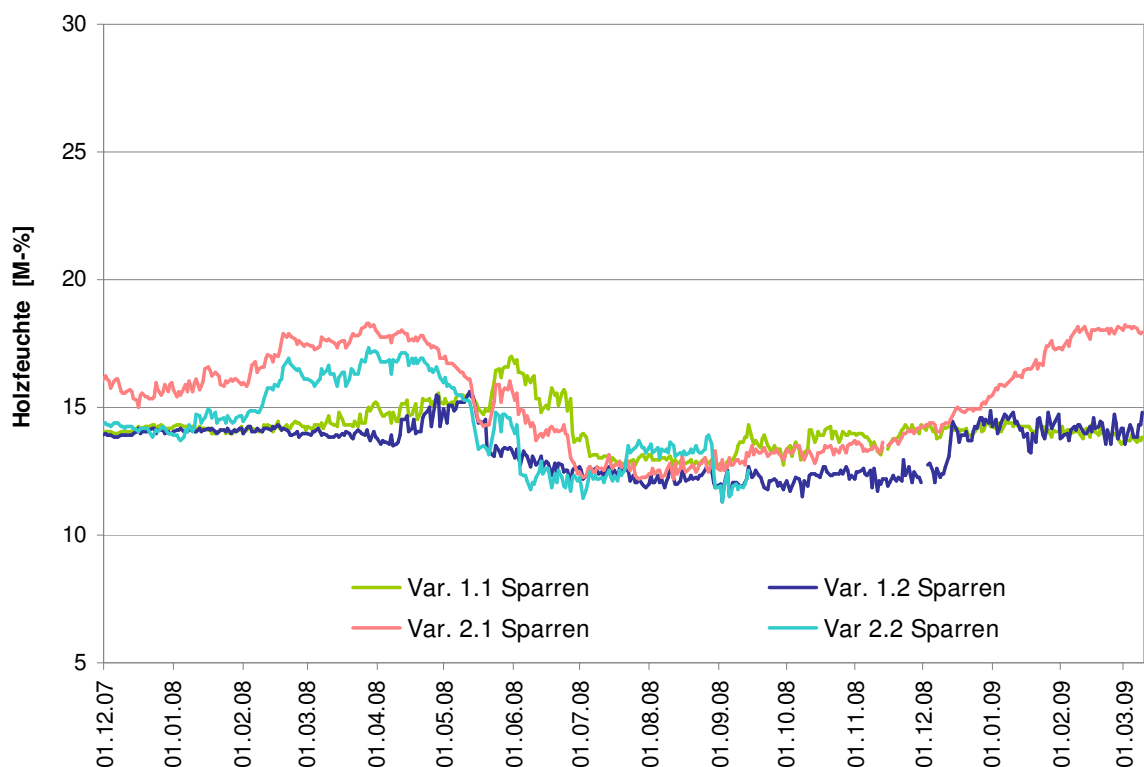


Abb. 30 Tagesmittelwerte der Holzfeuchten in den Sparren

3.1.3 Varianten Gründach

Oberflächentemperatur unter Schwarzer Bahn und Substrat.

Bei der Oberflächentemperatur unter der PVC-Bahn wird die thermische Puffer-Wirkung des Gründachaufbaus sichtbar. Im Winter sind die Amplituden weitaus geringer - dann wirkt das Gründach als thermische Dämmschicht. Besonders effektiv ist dies in den sehr kalten Tagen zu Anfang Januar 2009, wenn das vereiste Substrat dafür sorgt, dass die Oberflächentemperatur unter der Abdichtung nicht wesentlich unter 0 °C fällt.

Im Sommer sind die Effekte der solaren Einstrahlung nur an besonders strahlungsreichen Tagen, wie etwa Ende Mai 2008, zu verzeichnen.

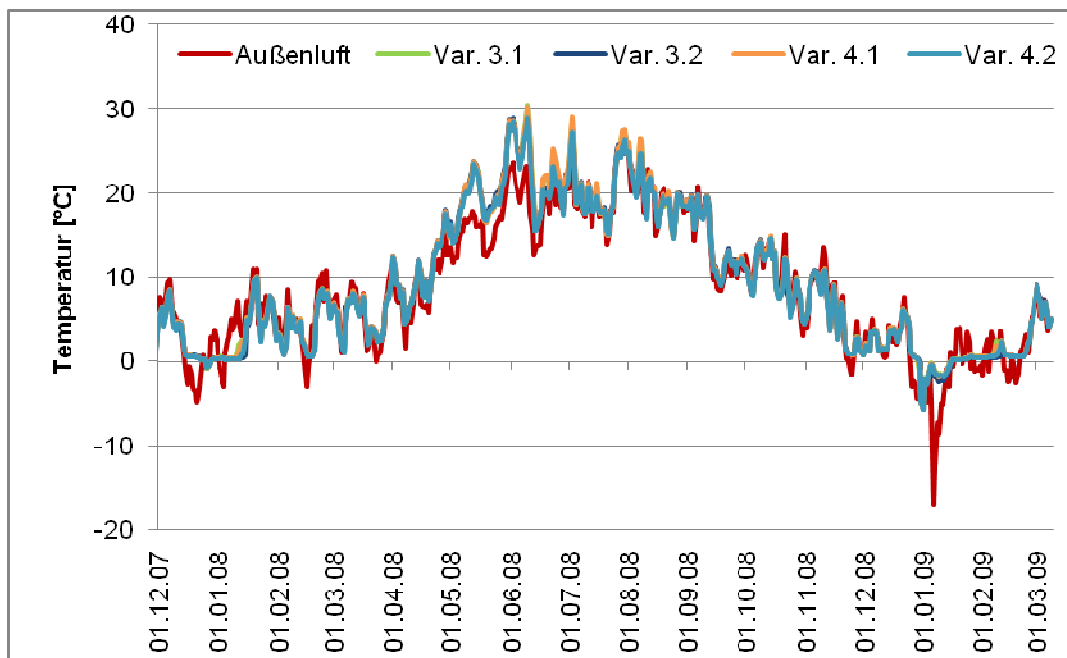


Abb. 31 Tagesmittelwerte der Oberflächentemperatur unter PVC-Bahn für Varianten 3.1 bis 4.2 sowie Außenlufttemperatur

Temperatur und Relative Luftfeuchte zwischen Dämmung und oberseitiger OSB.

Auch die Jahresgang-Amplituden der Temperaturen in der kritischen Ebene (Abb. 32) sind deutlich geringer als bei den Varianten ohne Gründachaufbau. Während dort, ohne Gründach, Maximalwerte von 39 °C und Minimalwerte von -8,5 °C erreicht wurden, schwankte die Temperatur in der kritischen Ebene bei den Gründachvarianten nur zwischen 30 °C im Sommer und -4 °C im Winter, bezogen auf Tagesmittelwerte - bei einer Betrachtung der Stundenwerte wären größere Unterschiede der Amplituden ersichtlich.

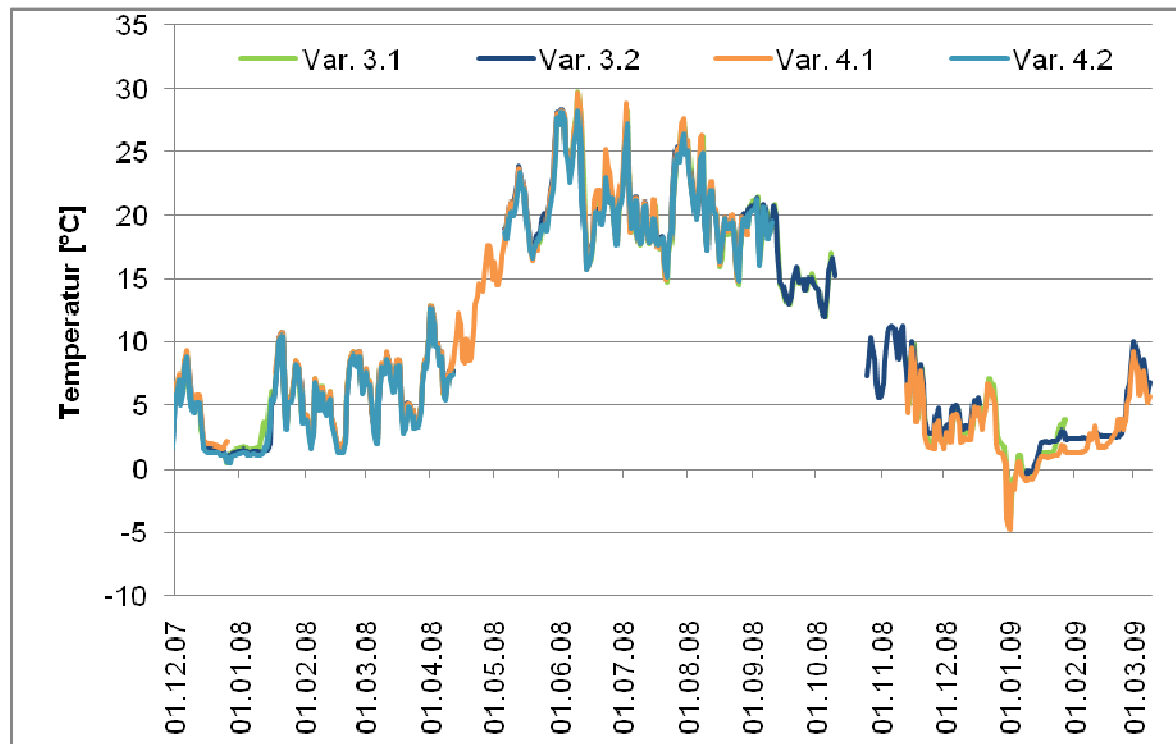


Abb. 32 Tagesmittelwerte der Temperatur in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB) für Varianten 3.1 bis 4.2

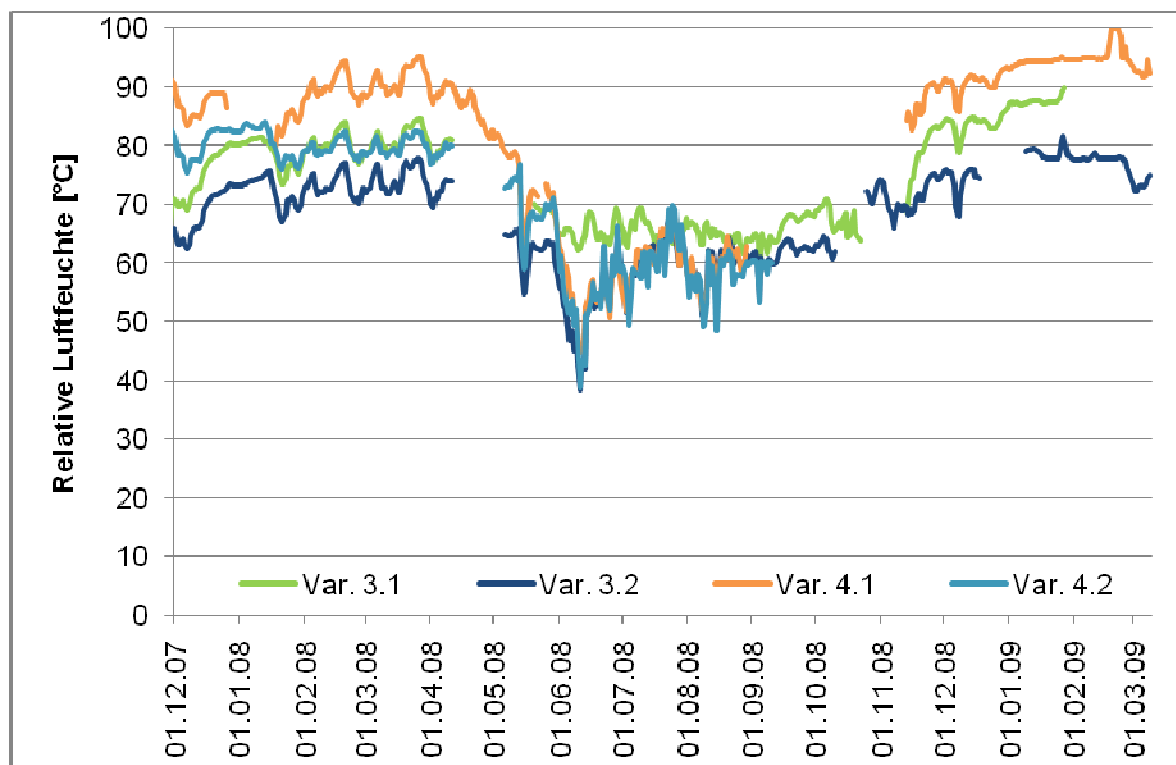


Abb. 33 Tagesmittelwerte der Relativen Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB) für Varianten 3.1 bis 4.2

Bei den Tagesmittelwerten der Relativen Luftfeuchte in der kritischen Ebene (Abb. 33) verhielten sich die vier Varianten in qualitativem Verlauf und Reihung wie bei den Varianten unter Schwarzer Bahn. Über den Jahresverlauf lagen die vergleichbaren Messwerte jedoch um 5 – 15 % oberhalb der unbedeckten Bereiche. Zugleich waren jedoch deutlich geringere Schwankungen des Feuchteverlaufs zu verzeichnen, was auf die geringeren Oberflächentemperaturen in den Sommermonaten zurückzuführen ist.

Am günstigsten und völlig unkritisch verhielt sich die Variante 3.2 (Zellulose-Dämmung und feuchtevariable Dampfbremse). Bei Variante 3.1 (Zellulose-Dämmung und OSB-Platte innen) kam es hingegen im zweiten, kälteren Winter zu Relativen Luftfeuchten von über 85 %. Für die Varianten mit Mineralwolle lag die Relative Luftfeuchte über 90% (Var. 4.2) bzw. über 95 % (Var. 4.1).

Holzfeuchten und Feuchten der Holzwerkstoffplatten.

Die Materialfeuchten der OSB-Platten (Abb. 35) bewegen sich alle im unkritischen Bereich, selbst im Winter 2008/2009, als die Außenlufttemperatur stark absank. Die thermische Schutzwirkung des Gründachaufbaus minimierte hier die Temperaturdifferenzen und die Auffeuchtung. Bemerkenswert ist, dass ab Dezember 2008 die Var. 2.1 eine höhere Stofffeuchte aufwies als bei Variante 4.1.

Der qualitative Verlauf der Holzfeuchten (Abb. 35) entspricht im Wesentlichen den Materialfeuchten der OSB-Platten. Auffällig stellt sich erneut der starke Anstieg der Holzfeuchte für Variante 4.2 ab Dezember 2008 dar. Hier konnte nach Öffnung des entsprechenden Gefachs Oberflächenkondensat an Stellen festgestellt werden, an denen Luftspalte zwischen Dämmung und oberseitiger OSB-Platte vorlagen. Partiiell wurden dabei Holzfeuchten von über 25 M-% gemessen. Ebenfalls wurde in dieser Ausführungsvariante Schimmelbefall verzeichnet.



Abb. 34 Oberflächenkondensat und Schimmelbefall im Gefach, Variante 4.2

Der aufgetretene Schimmel wurde als baupraktisch üblicher Schimmelpilz der Gattungen *Cladosporium species* und *Penicillium species* durch ein mykologisches Gutachten bestimmt.

In der Variante 4.1 wurde weder Oberflächenkondensat noch Schimmelpilzbefall festgestellt.

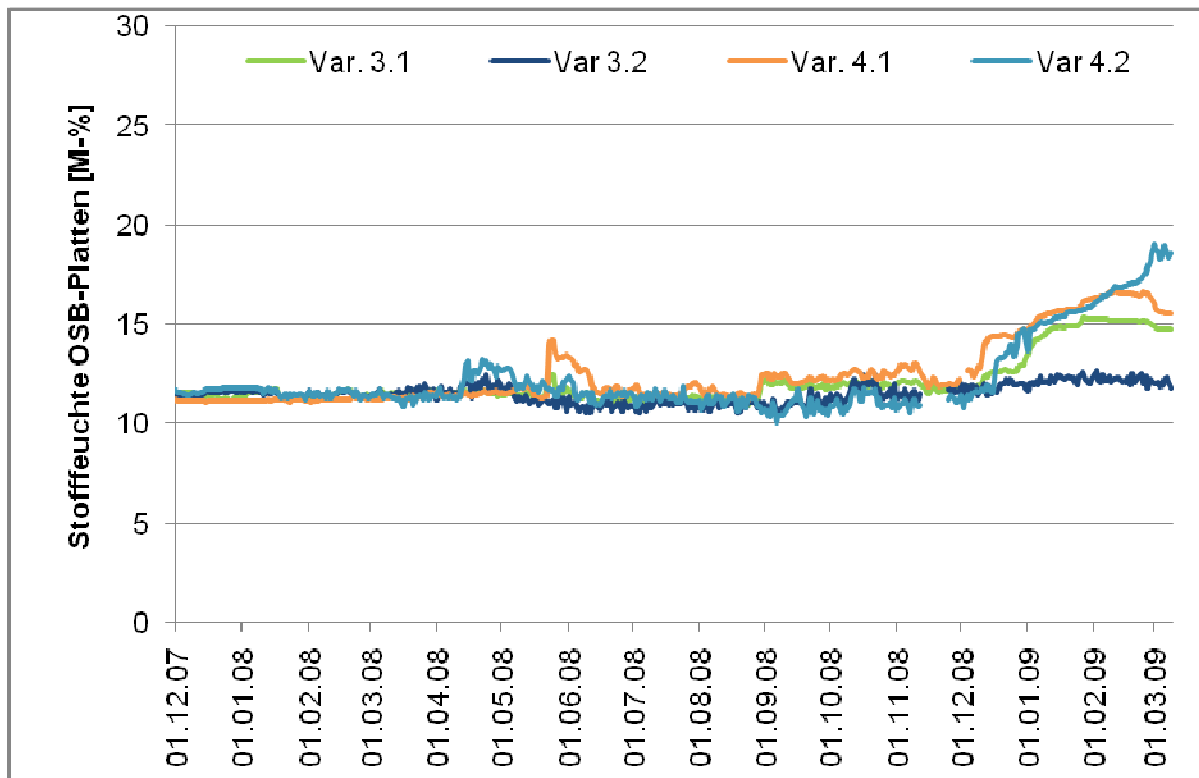


Abb. 35 Tagesmittelwerte der Materialfeuchte in den OSB-Platten

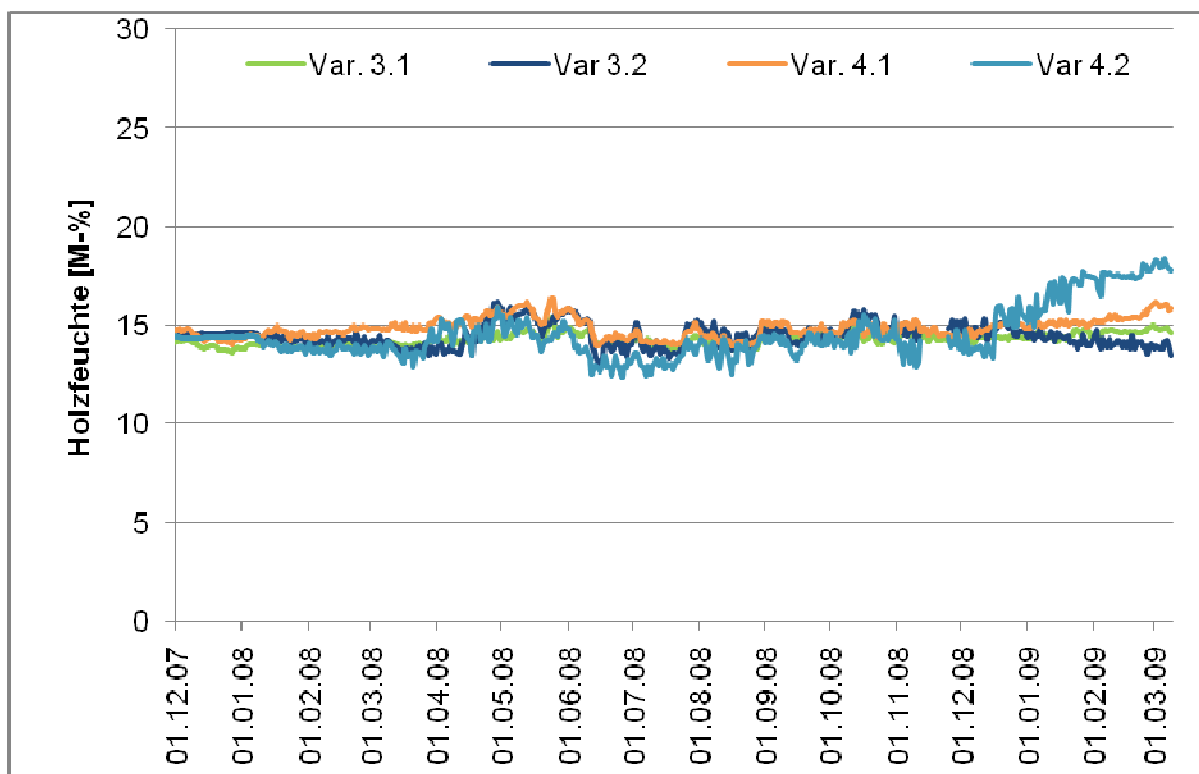


Abb. 36 Tagesmittelwerte der Holzfeuchte in den Sparren

3.2 Hygrothermische Simulation - Versuchsgebäude

Neben der Erfassung der klimatischen Verhältnisse im Versuchsstand bilden die hygrothermischen Simulationen den zweiten Schwerpunkt des Forschungsvorhabens.

Dabei lag ein besonderes Augenmerk auf der Validierung des Simulationsprogrammes mit den verwendeten Materialparametern, um eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und gewonnenen Messdaten zu erzielen.

Ein Problempunkt bei hygrothermischen Simulationen ist immer die Frage der korrekten Materialeigenschaften. Oftmals stehen gerade die wichtigen feuchtetechnischen Parameter (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme, Flüssigtransportkenngrößen) nicht oder nur unzureichend zur Verfügung. Ziel und Ergebnis der hygrothermischen Simulationen muss deshalb die Bereitstellung validierter Material-Datensätze sein.

Die im Kap. 2.2.1 dargestellten Eigenschaften wurden anhand des Vergleichs Rechnung-Messung validiert und so in allen Simulationsrechnungen verwendet.

Alle zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts vorliegenden Simulationsrechnungen beginnen am 15.01.08 und enden am 08.03.09.

3.2.1 Varianten Schwarze Bahn

Nachfolgend werden für alle Varianten mit Schwarzer Bahn (Var. 1.1 - 2.2) die Ergebnisse der hygrothermischen Simulation mit WUFI gezeigt. Dargestellt sind Temperatur und Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB-Platte). Für alle vier Varianten trifft gleichermaßen zu, dass die Übereinstimmung der Temperatur sehr gut ist. Kleinere Abweichungen ergeben sich an strahlungsreichen Tagen im Sommer. Diese sind auf die Modellierung der Klimarandbedingungen bzw. die Qualität der Klimaparameter zurückzuführen: Die Abweichungen sind schon bei einem Vergleich von Messung und Rechnung für die Oberflächentemperatur (unter PVC-Bahn) sichtbar. Sie sind aber für das hygrische Verhalten der Dachkonstruktionen nicht relevant, wie die Autoren überprüft haben.

Weiterhin tritt bei allen vier Varianten auf, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung bei der Relativen Luftfeuchte im Winter sehr gut ist. Im Sommer ergeben sich jedoch Abweichungen von bis zu 20 %. Die Austrocknung wird somit vom Simulationsprogramm deutlich unterschätzt. Damit liegt die Rechnung zwar „auf der sicheren Seite“, die mangelnde Übereinstimmung wird von den Autoren jedoch teilweise als verbesserungswürdig eingeschätzt. Insbesondere bei den Varianten mit Mineralwolle-Dämmung muss zukünftig eine bessere Übereinstimmung erzielt werden. Ein Grund könnte darin liegen, dass die Gleichungen für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport im Simulationsprogramm für poröse Materialien gelten - was Mineralwolle nicht ist. Die niedrig angesetzte Sorptionsisotherme stellt offensichtlich nur einen Ansatz zur Lösung dar.

Beim Vergleich von Rechen- und Messergebnissen der Materialfeuchte der OSB-Platten ist zu beachten, dass die Messdaten aufgrund der Messtechnik (elektrische Widerstandsmessung) immer den maximalen Wert über den erfassten Querschnitt (Elektrodenlänge) wiedergeben, während die gezeigten Ergebnisse der Simulation einen mittleren Wert der Stofffeuchte des gefachseitigen Drittels der OSB-Platte darstellen. Damit wird der Effekt, dass die OSB-Platte in der Nähe zur kritischen Ebene in den Wintertagen eine höhere Stofffeuchte aufweist als in ihren äußeren Teilen, im Ansatz beachtet. Eine Darstellung dazu findet sich in Abschnitt 3.3 dieses Berichts.

Bei Var. 2.1 weichen Messung und Rechnung der OSB-Platten-Feuchte im Winter 2008/2009 besonders stark voneinander ab. Die hohe gemessene OSB-Platten-Feuchte ist auf Oberflächenkondensat zurückzuführen, da der Diffusionswiderstand in den Randbereichen der Platten aufgrund der verdichteten Deckschichten mit höherem Leimanteil deutlich größer ist. Dies ist ein Effekt, der vom Simulationsprogramm nicht erfasst wird. Bei Var. 2.2 kam es zum schon in Abschnitt 3.1 genannten Messwertausfall, der auf einen konstruktiven Mangel infolge einer Revision Mitte September 2008 zurückzuführen ist. Die gezeigten Ergebnisse der Simulation legen den Schluss nahe, dass sich diese Variante feuchtetechnisch unkritisch verhält. Eine endgültige Wertung kann jedoch erst im weiteren Verlauf dieser Arbeit erfolgen.

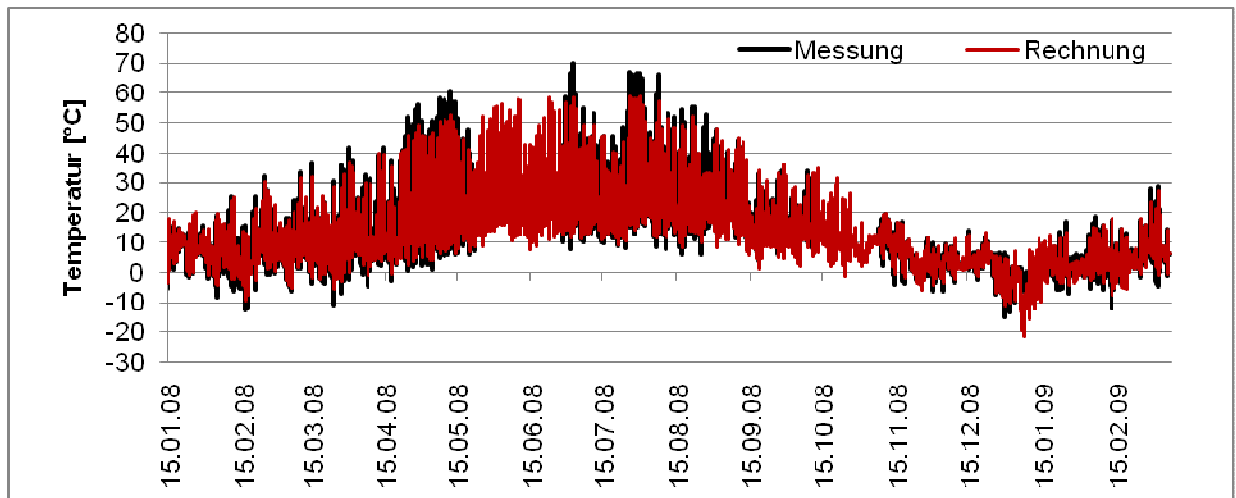
Variante 1.1 (Schwarze Bahn - OSB - Zellulose-Dämmung - OSB)

Abb. 37 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 1.1

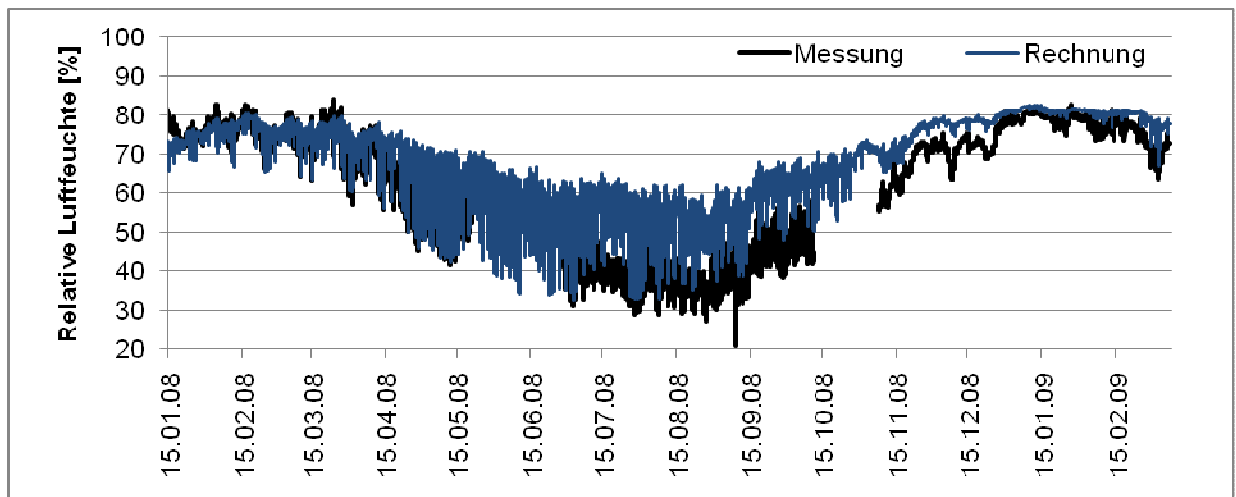


Abb. 38 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 1.1

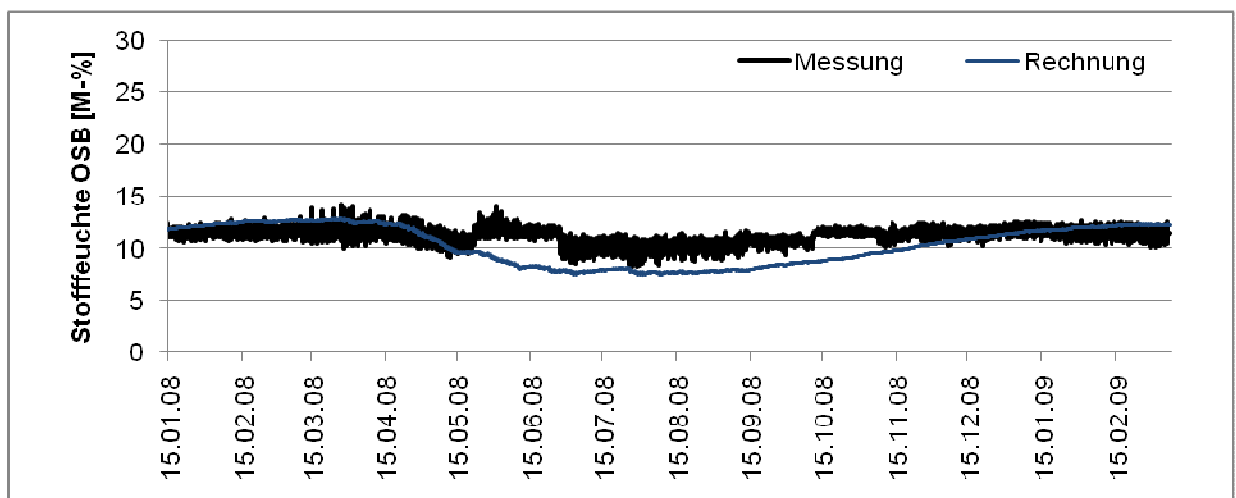


Abb. 39 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 1.1

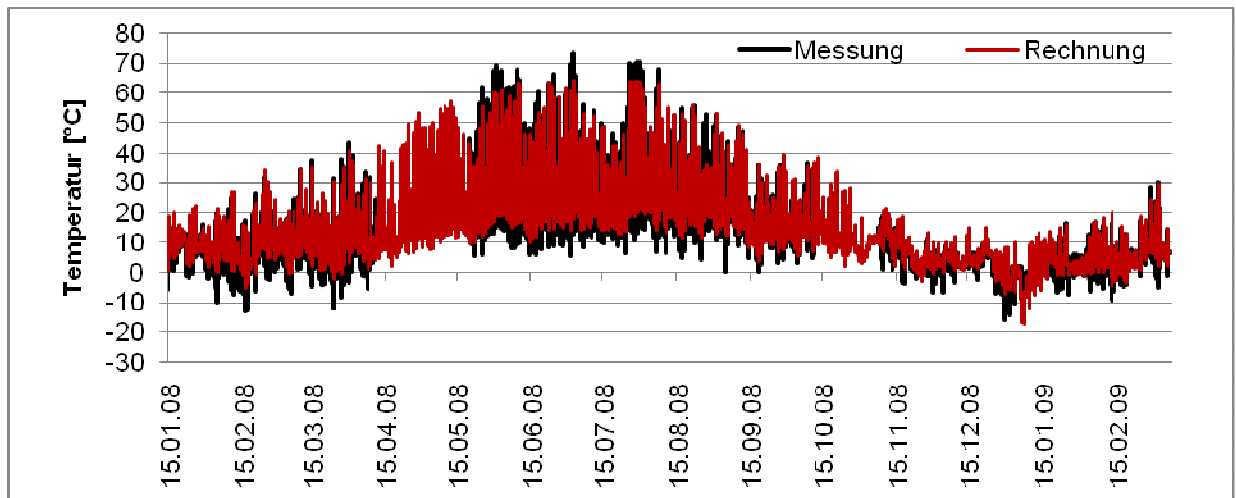
Variante 1.2 (Schwarze Bahn - OSB - Zellulose-Dämmung - feuchtevariable Dampfbremse)

Abb. 40 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 1.2

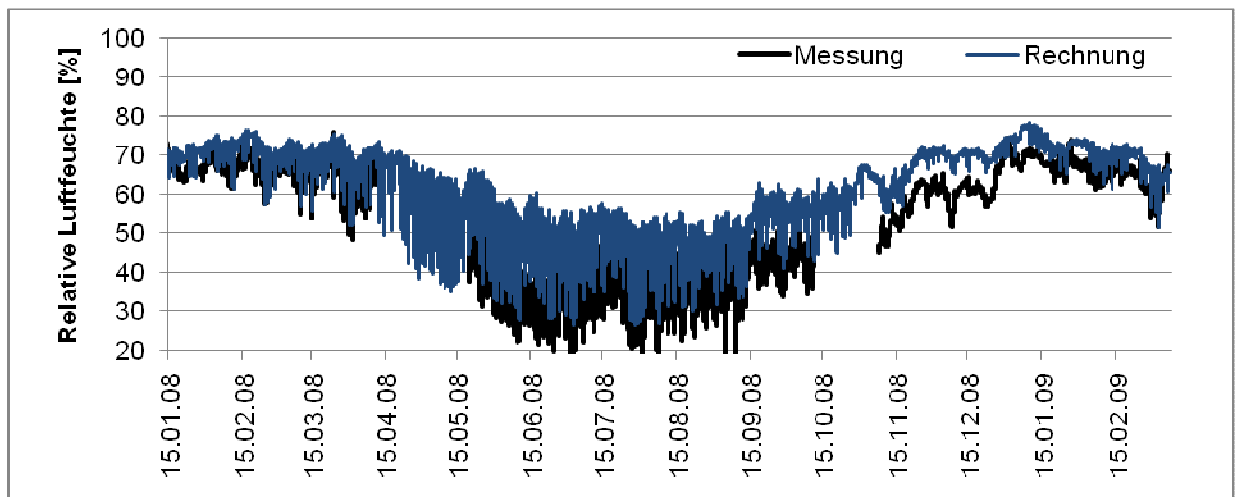


Abb. 41 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 1.2

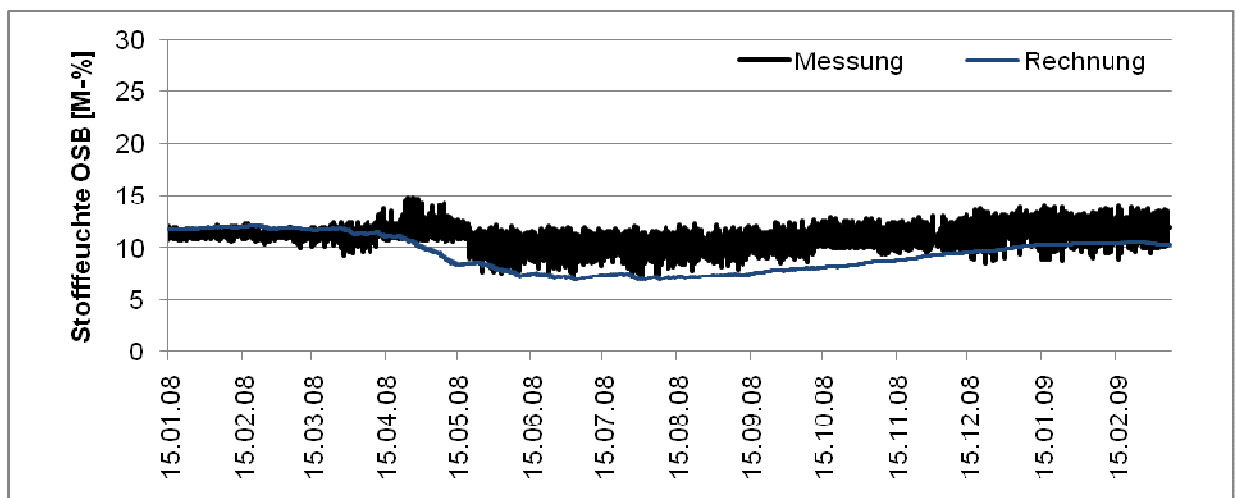


Abb. 42 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 1.2

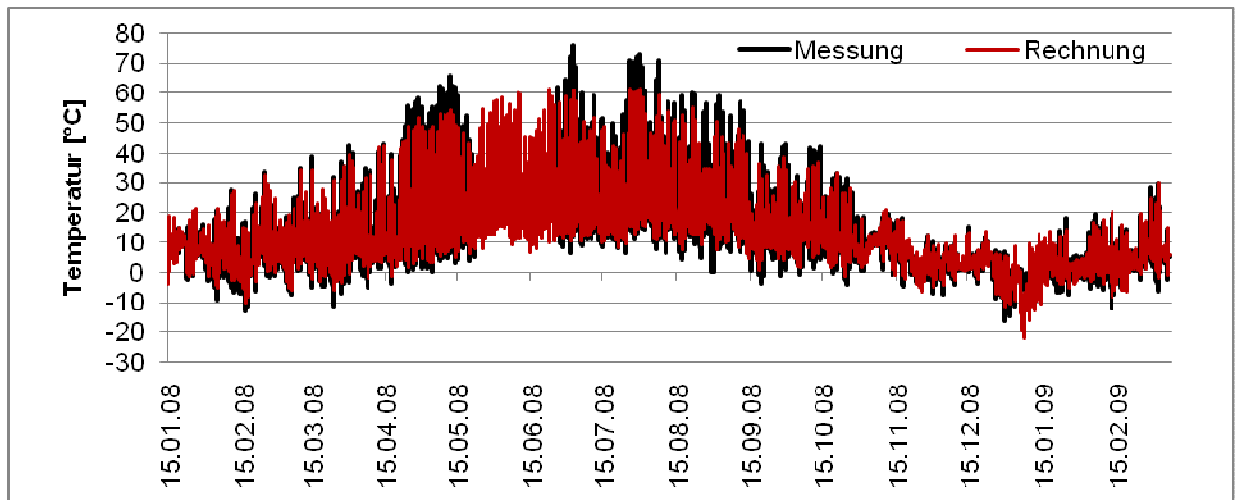
Variante 2.1 (Schwarze Bahn - OSB - Mineralwolle-Dämmung - OSB)

Abb. 43 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 2.1

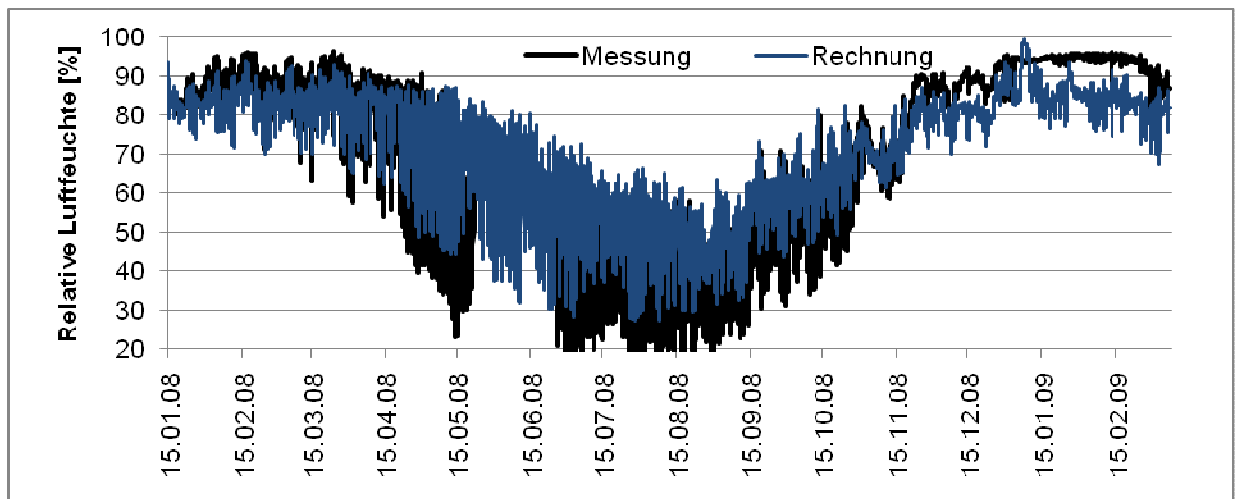


Abb. 44 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 2.1

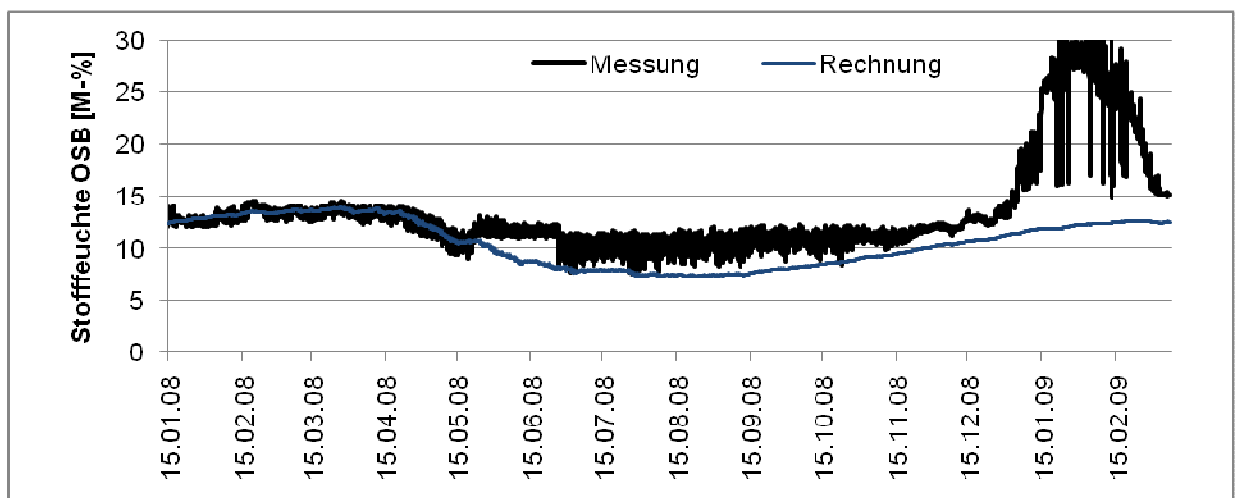


Abb. 45 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 2.1

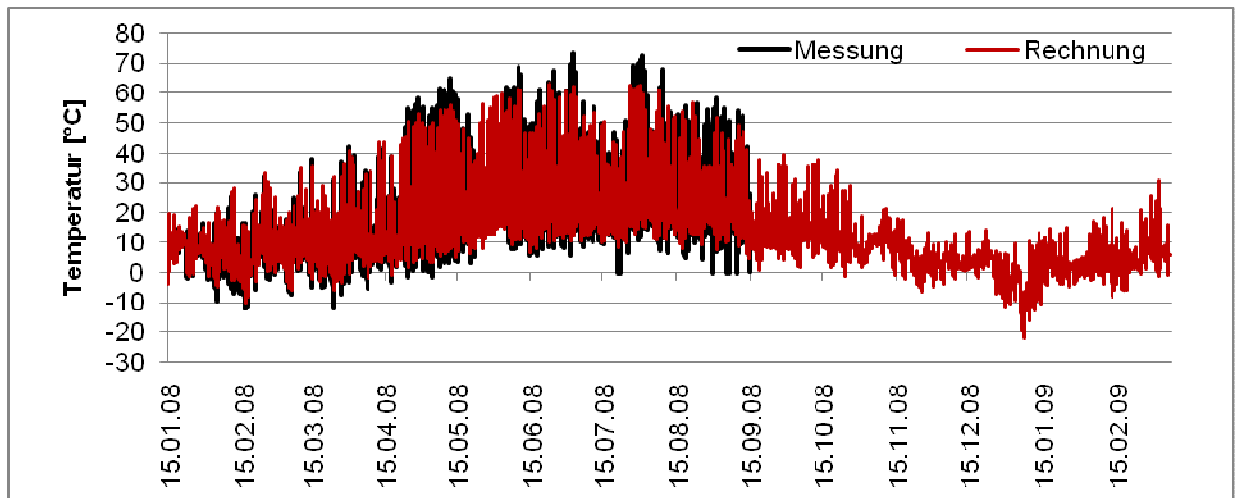
Variante 2.2 (Schwarze Bahn - OSB - Mineralwolle-Dämmung - feuchtevar. Dampfbremse)

Abb. 46 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 2.2

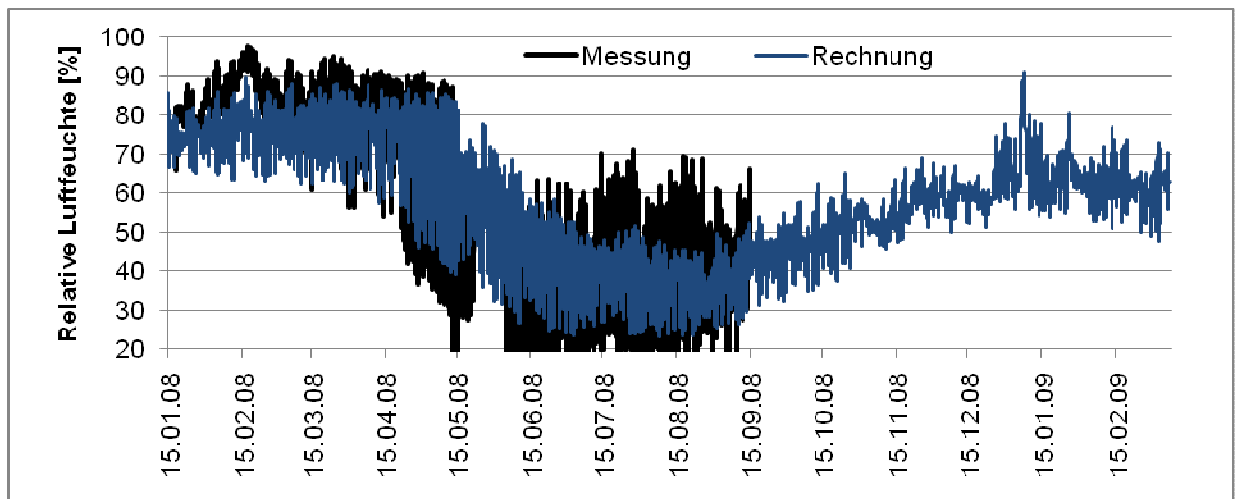


Abb. 47 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 2.2

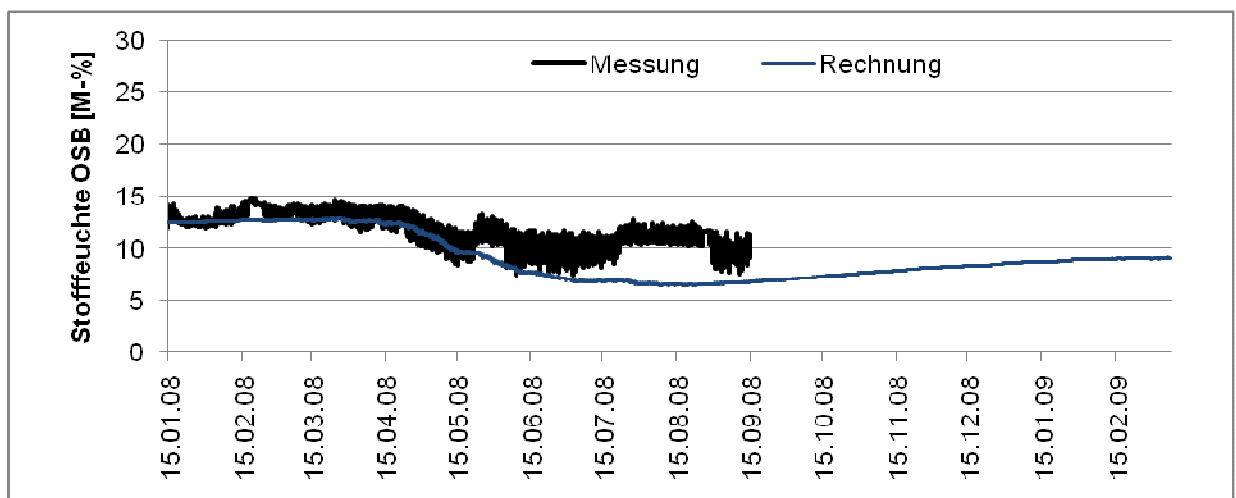


Abb. 48 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 2.2

3.2.2 Varianten Gründach

Auch bei den Gründachvarianten (Var. 3.1 - 4.2) ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung für die Temperatur in der kritischen Ebene (zwischen Dämmung und oberseitiger OSB) sehr gut. Für das Substrat wurde ein Datensatz genutzt, welcher vom Fraunhofer IBP entwickelt wurde. Der Datensatz wurde leicht an die im Versuchsgebäude herrschenden Bedingungen durch Validierung der Oberflächentemperatur unter der Abdichtung angepasst.

Bei allen 4 Varianten kommt es im Januar 2009 zu einer starken Abweichung zwischen Messung und Rechnung, was auf die Vereisung im Substrat zurückzuführen ist, die im Simulationsprogramm nicht berücksichtigt wird.

Die Relative Luftfeuchte stimmt im Winter gut überein, im Sommer jedoch unterschätzt die Rechnung mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI die Austrocknung. Insgesamt ist die Übereinstimmung bei den Varianten mit Zellulose-Dämmung deutlich besser als die Varianten mit Mineralwolle-Dämmung. Die Berechnungen liegen damit „auf der sicheren Seite“.

Bei Var. 4.2 kommt es im Winter 2008/2009 zu kritischen Werten der Relativen Luftfeuchte und der OSB-Platten-Feuchte. Sie überschreitet den Grenzwert von 18 M-%, womit dieser Dachaufbau unter den gegebenen Randbedingungen nicht empfohlen werden kann. Durch die Simulation wird dies nur ansatzweise wiedergegeben, da der gezeigte Wert ein Mittelwert des gefachseitigen Drittels des OSB-Querschnitts ist und die gemessene Stofffeuchte nahe an der Oberfläche auftritt.

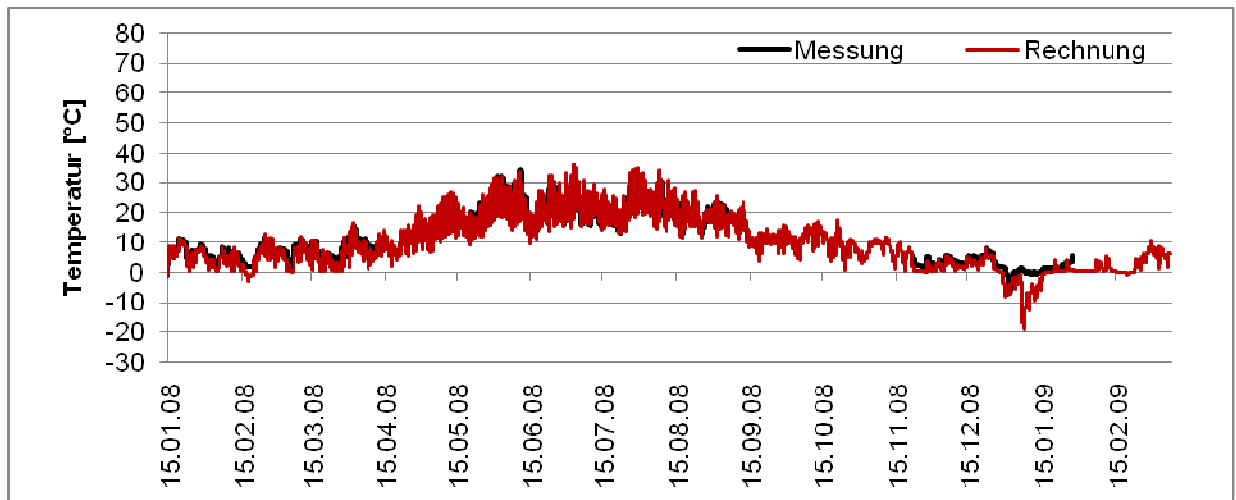
Variante 3.1 (Gründach - OSB - Zellulose-Dämmung - OSB)

Abb. 49 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 3.1

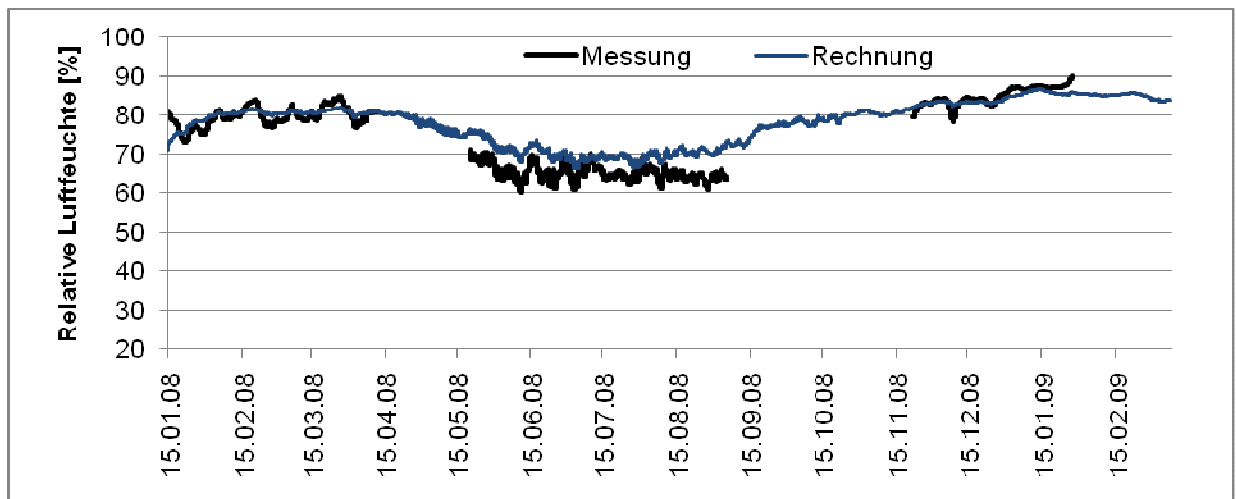


Abb. 50 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 3.1

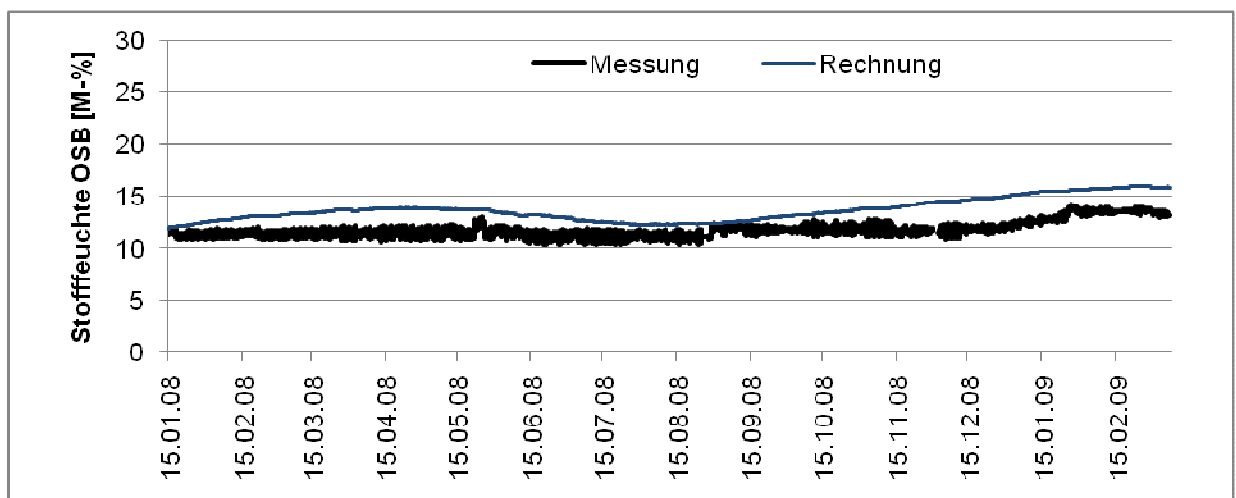


Abb. 51 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 3.1

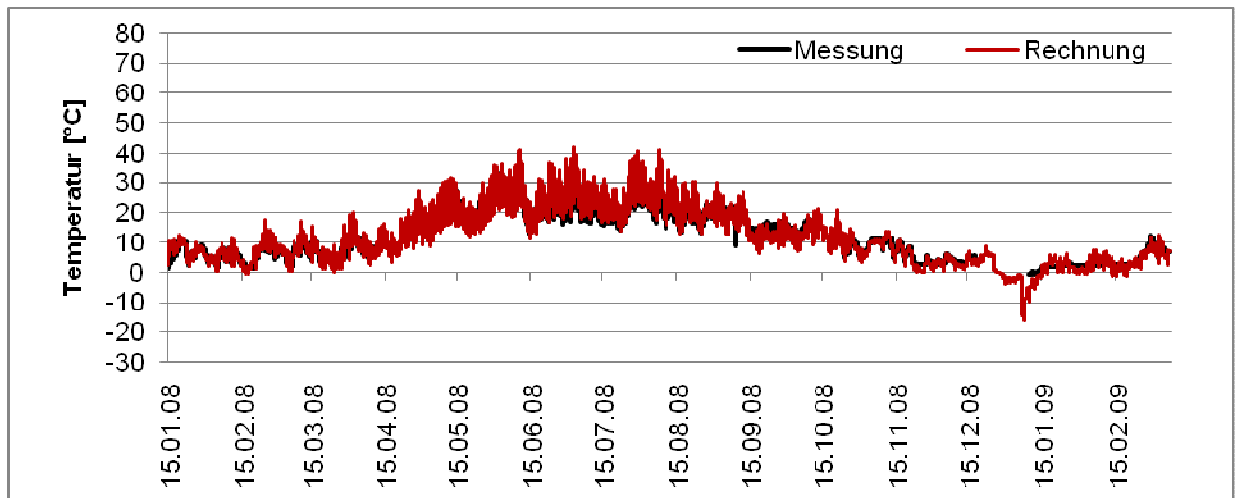
Variante 3.2 (Gründach - OSB - Zellulose-Dämmung - feuchtevariable Dampfbremse)

Abb. 52: Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 3.2

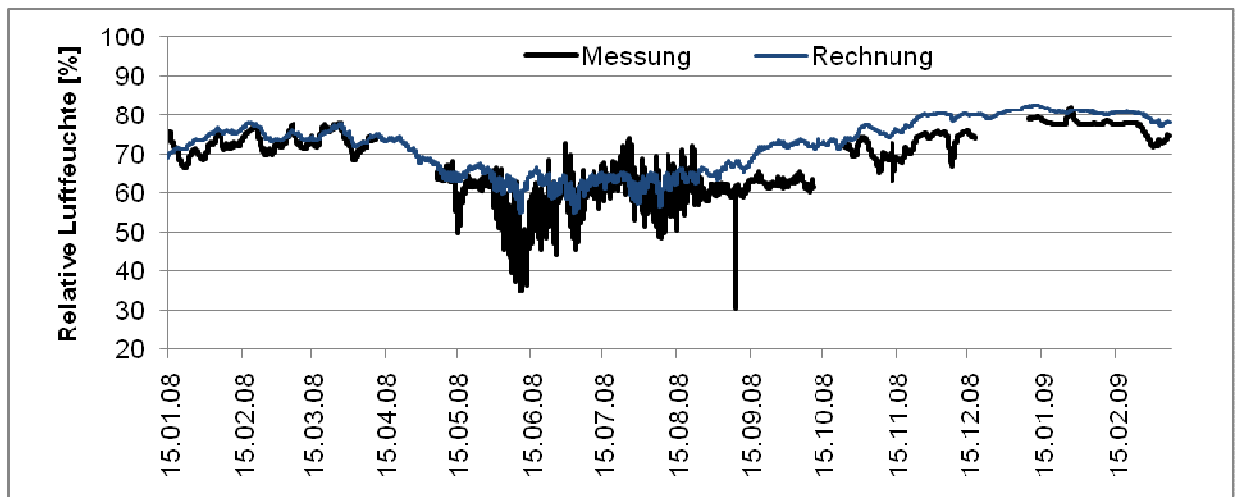


Abb. 53: Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 3.2

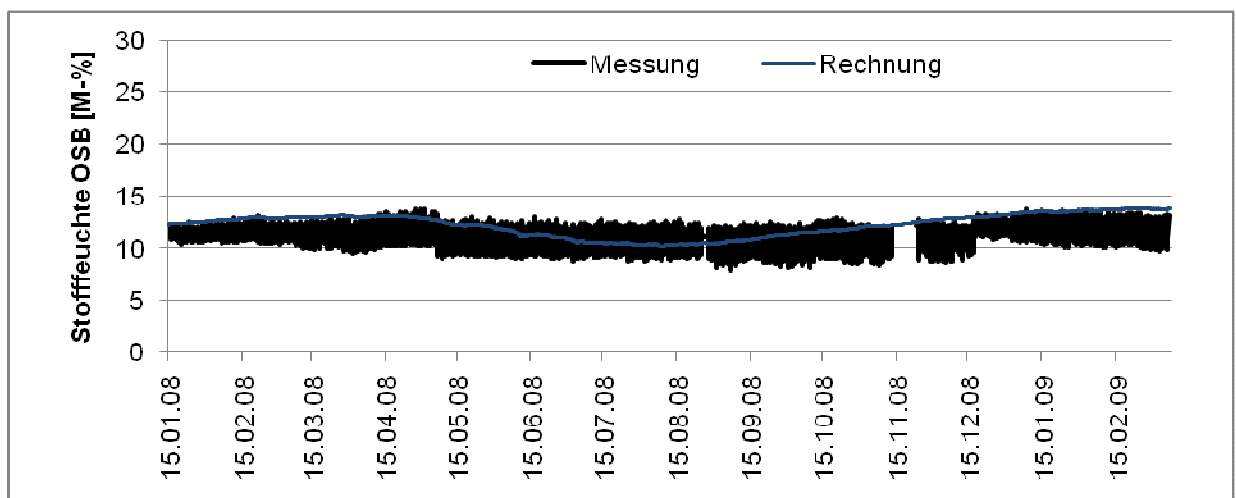


Abb. 54 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 3.2

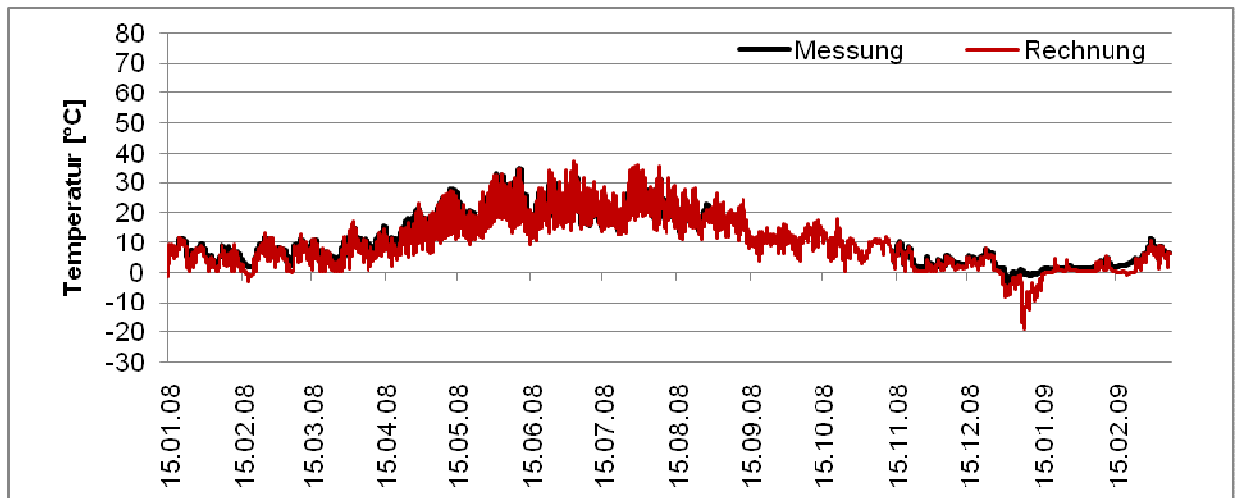
Variante 4.1 (Gründach - OSB - Mineralwolle-Dämmung - OSB)

Abb. 55 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 4.1

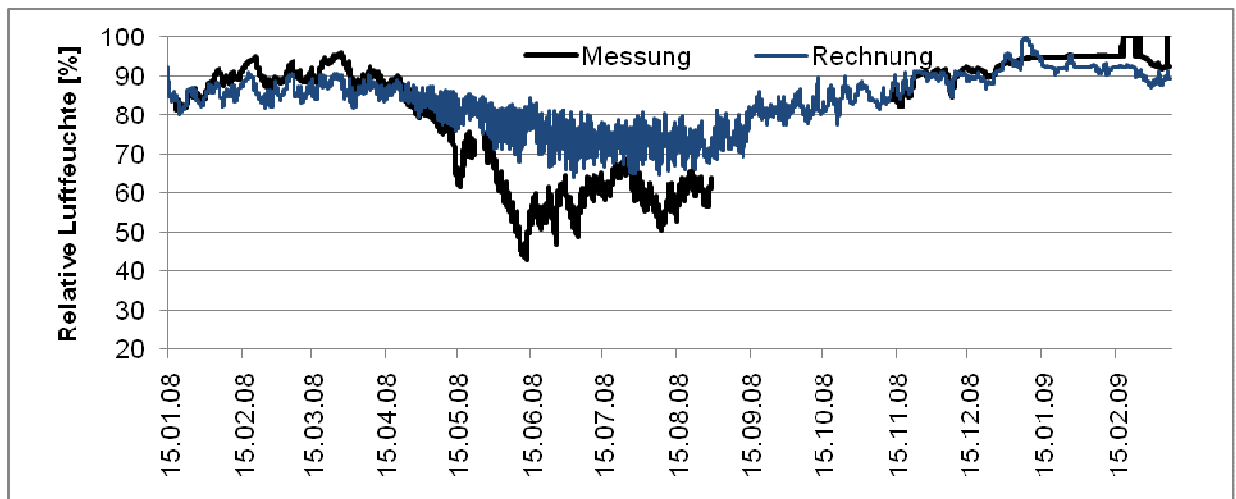


Abb. 56 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 4.1

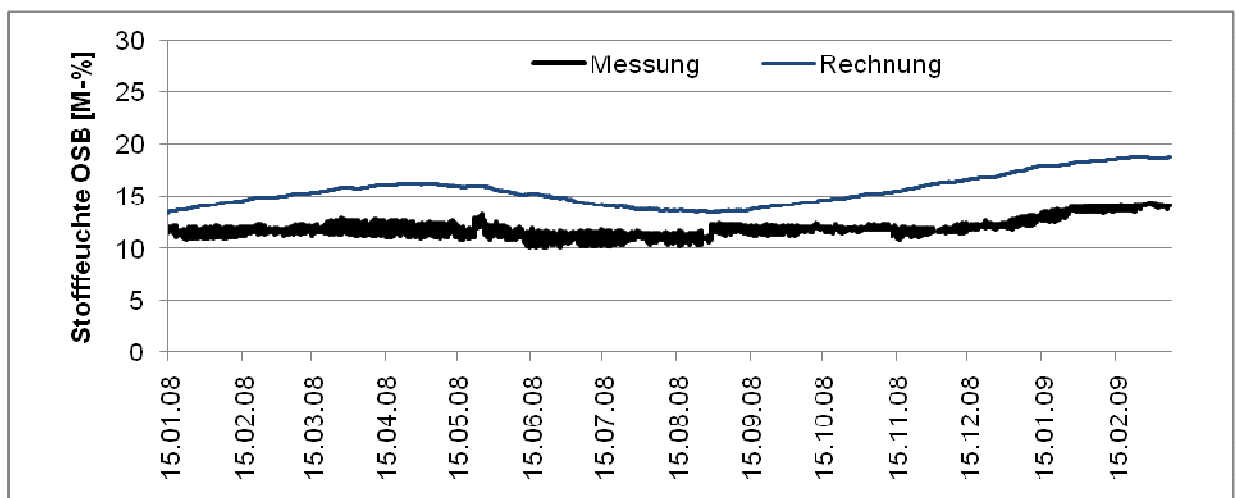


Abb. 57 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 4.1

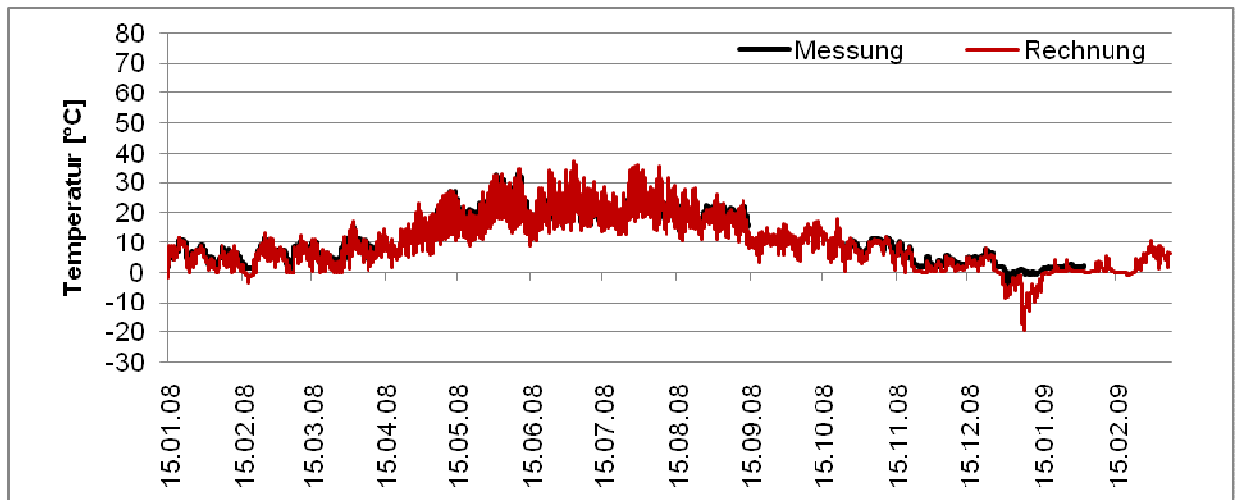
Variante 4.2 (Gründach - OSB - Mineralwolle-Dämmung - feuchtevariable Dampfbremse)

Abb. 58 Temperatur in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 4.2

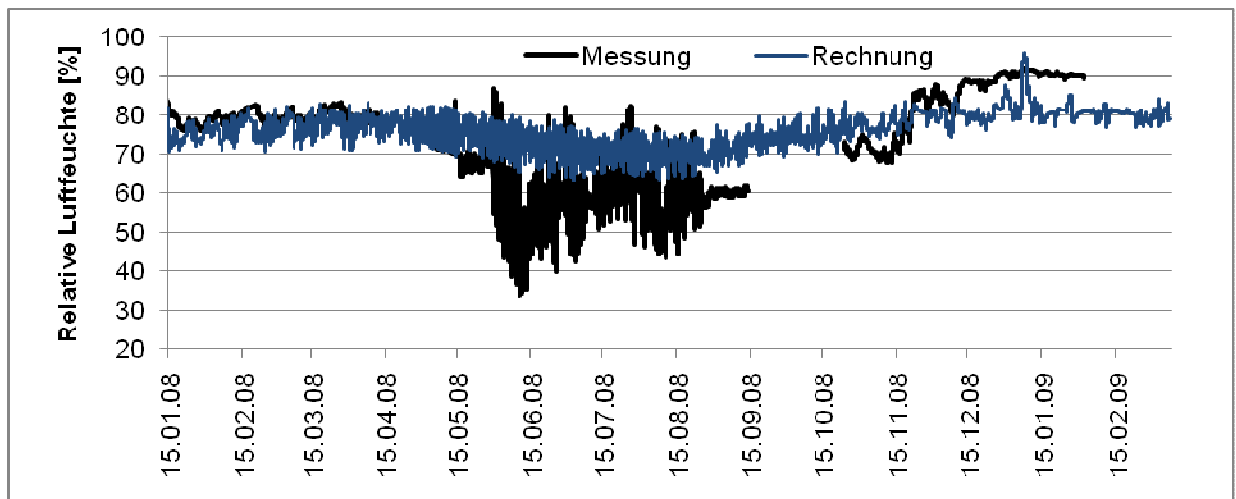


Abb. 59 Rel. Luftfeuchte in der kritischen Ebene (zw. Dämmung und oberer OSB) bei Var. 4.2

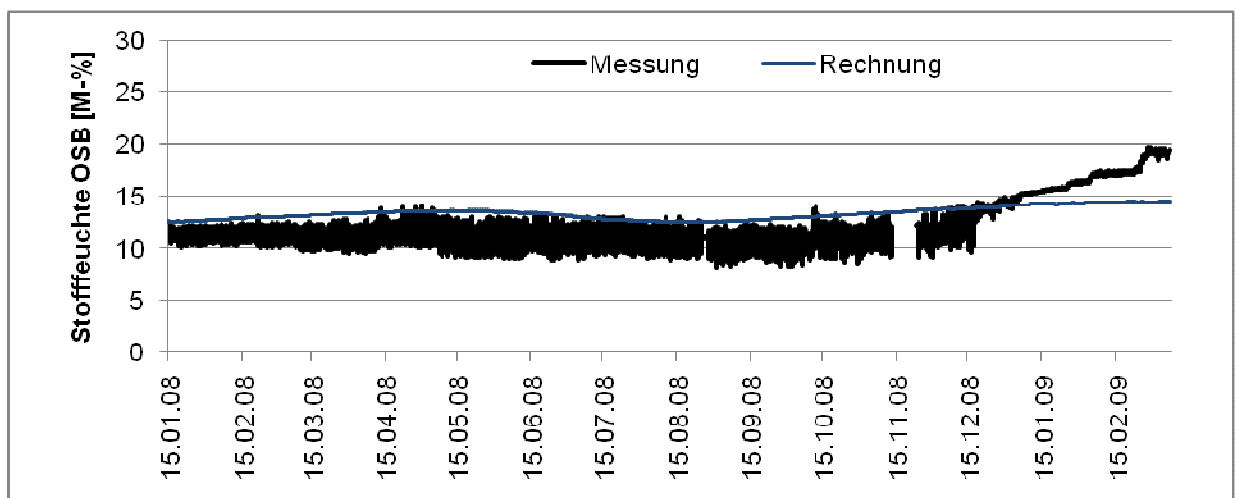


Abb. 60 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei Var. 4.2

3.3 Hygrothermische Simulation - Parameterstudien

3.3.1 Grundsätzliches

Die Parameterstudien bilden einen weiteren Schwerpunkt des Forschungsvorhabens. Sie sind für die Bewertung der einzelnen Dachaufbauten von großer Bedeutung, da sie die Grenzen der Konstruktionen aufzeigen. Es wurden für jede Parameterstudie zwei Varianten ausgewählt, um Einflüsse und Tendenzen zu zeigen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden für die jeweils zwei Varianten gleiche Startfeuchten angenommen.

Außenklima.

Für die Parameterstudien wurde das mit der Wetterstation in Leipzig aufgezeichnete Außenklima verwendet. Dazu wurde ein Referenzjahr „Leipzig 2008/2009“ erstellt, das aus den Monaten Januar - Februar 2009 sowie März - Dezember 2008 besteht. Dieser so erstellte Klimadatensatz wurde bei allen Parameterstudien als Außenklima verwendet.

Er stellt wegen der niedrigen Temperaturen im Januar (gemessen im Januar 2009) für die Region Leipzig eine vergleichsweise hohe Belastung dar - allerdings liegt er immer noch unterhalb des Klimadatensatzes „Holzkirchen 1991“ aus dem Berechnungsprogramm WUFI des Fraunhofer IBP, wie in Abschnitt 3.3.2.2 noch gezeigt wird.

Innenklima.

Das Versuchsgebäude wurde während der Untersuchungsperiode klimatisiert. Als Zielgrößen wurden Temperatur und Relative Luftfeuchte des „Innenklimas, hohe Feuchtelast“ aus dem WTA-Merkblatt für hygrothermische Simulationen [42] gewählt. Allgemein wird hier in 3 Klimata unterschieden:

Tab. 20 Sinusförmige Raumklimabedingungen bei hygrothermischen Simulationen, aus [42]

	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]		
		niedrig	normal	hoch
Mittelwert	21	45	50	55
Amplitude	1	15	10	5
Minimum	20	30	40	50
Maximum	22	60	60	60
Zeitpunkt des Maximums	Juni	August	August	August

Das im Versuchsgebäude eingeregelter Innenklima mit 55 ± 5 % r.F. stellte für die Dachaufbauten zeitweise eine hohe Belastung dar, insbesondere in Verbindung mit den im Januar 2009 aufgetretenen extrem niedrigen Außenlufttemperaturen.

Dabei muss allerdings hinterfragt werden, inwieweit bei solchen Außenklimabedingungen die erzeugten Innenraumfeuchten im Winter real auftreten. Entsprechende Untersuchungen weisen bei üblicher Wohnnutzung auf die Abhängigkeit des Innenklimas vom Außenklima hin. Für übliche Wohn- und Büronutzung wird sich bei vorgefundenen

Außenklimabedingungen eher ein „Innenklima, normale Feuchtelast“ einstellen. Deshalb wurde für die Parameterstudien dieses Innenklima mit $\phi = 50 \pm 10 \text{ \% r.F.}$ gewählt.

Zum Beurteilungskriterium Holzfeuchte / Stofffeuchte OSB-Platte.

Bei einem Nachweis der Funktionsfähigkeit und hygrischen Unbedenklichkeit einer Konstruktion wird das Kriterium der Überschreitung einer maximalen Holzfeuchte von 20 M-% bzw. Überschreitung von 18 M-% bei OSB-Platten angewandt, wie in Abschnitt 2.1.1 erläutert wurde.

Meist wird dazu die mittlere Feuchte des betreffenden Holzbauteils oder Holzwerkstoffs verwendet, so wie sie vom Programm WUFI ausgegeben wird.

Die Feuchte ist jedoch im Querschnitt (im vorliegenden Fall) der OSB-Platte nicht gleich verteilt. Die Grenzwerte der Stofffeuchte können lokal überschritten sein, ohne dass der mittlere Wert der OSB-Platten-Feuchte den Grenzwert von 18 M-% erreicht. Kritische Zustände in Teilquerschnitten können so übersehen werden (Abb. 61) und zum Schaden führen. Zudem entstehen an diesen nur sehr dünnen feuchten Schichten von Holzbauteilen oder OSB-Platten Wachstums Voraussetzungen für Schimmelpilz.

Die Autoren halten es somit für sinnvoll, bei der Bewertung einer Konstruktion immer auch die Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene zu betrachten und/oder die Stofffeuchte im anliegenden Teilquerschnitt des betreffenden Holz-/Holzwerkstoffbauteils zu untersuchen.

Im vorliegenden Fall wurde deshalb bei den Simulationen sowohl zu den Aufbauten im Versuchsgebäude als auch bei den Parameterstudien die betreffende OSB-Platte ($d = 22 \text{ mm}$) in drei Abschnitte unterteilt - ausgegeben und bewertet wird immer der an der kritischen Ebene (zur Dämmung hin) anliegende Drittelquerschnitt ($d = 7 \text{ mm}$).

Folgende Abbildung verdeutlicht beispielhaft für Var. 1.1 diesen Zusammenhang anhand des Vergleichs zwischen mittlerer Stofffeuchte des (der kritischen Ebene) abgewandten Zweidrittelquerschnitts ($d = 15 \text{ mm}$) und dem an der kritischen Ebene anliegenden Teilquerschnitt von 7 mm:

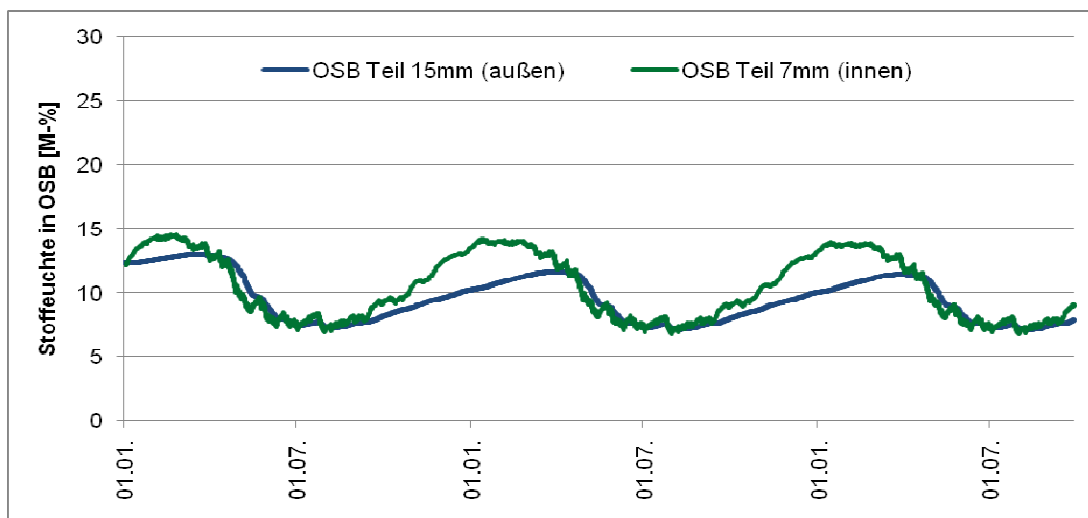


Abb. 61 Var. 1.1, Stofffeuchte in zwei Teilbereichen der OSB-Platte, Berechnung über 3 Jahre

3.3.2 Parameterstudien zu Varianten Schwarze Bahn

3.3.2.1 Grundversion - Berechnung für 5 Jahre

Zunächst wurde für alle 4 Varianten mit Schwarzer Bahn eine Grundversion berechnet. Als Randbedingungen wurden die o.g. Klimata verwendet. Als Stofffeuchte der OSB-Platte ist die Feuchte des gefachseitigen 7 mm dicken Teilquerschnitts dargestellt (s.o.).

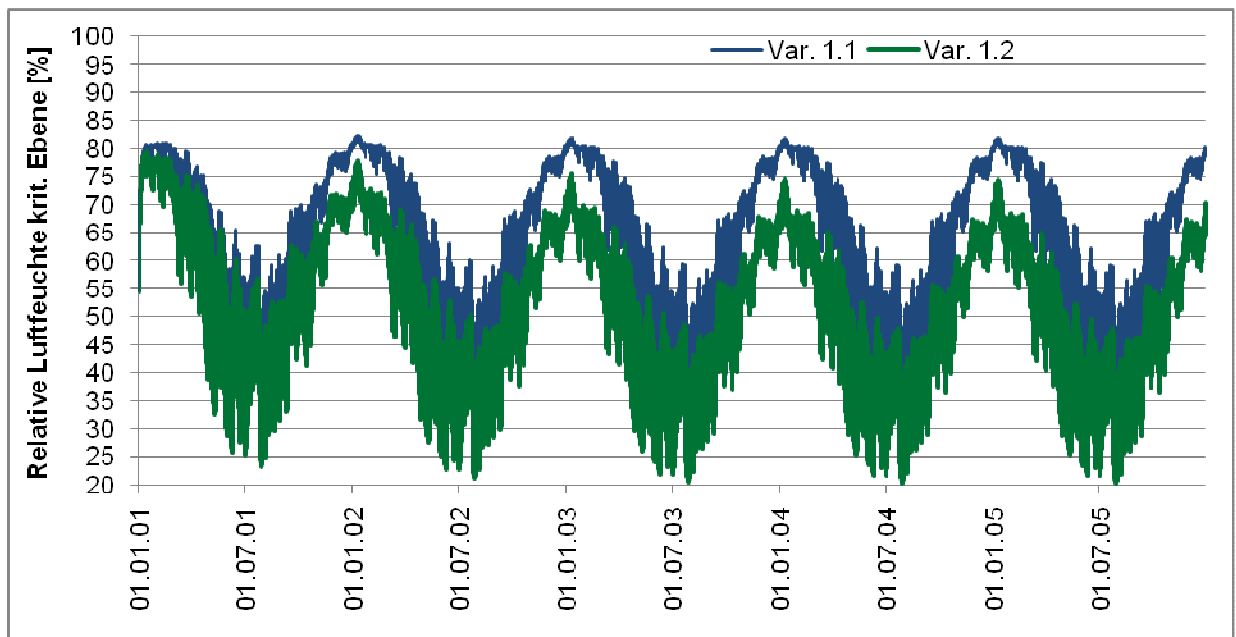


Abb. 62 Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene für Var. 1.1 und 1.2 (Zellulosedämmung)

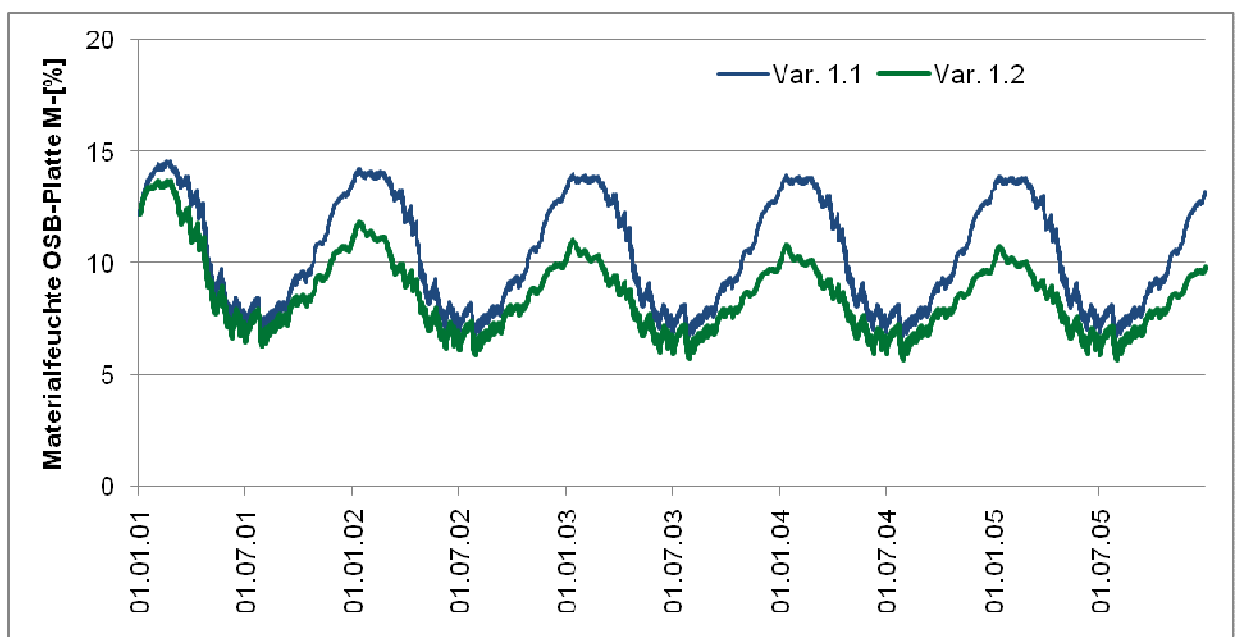


Abb. 63 Stofffeuchte in der OSB-Platte für Var. 1.1 und 1.2 (Zellulosedämmung)

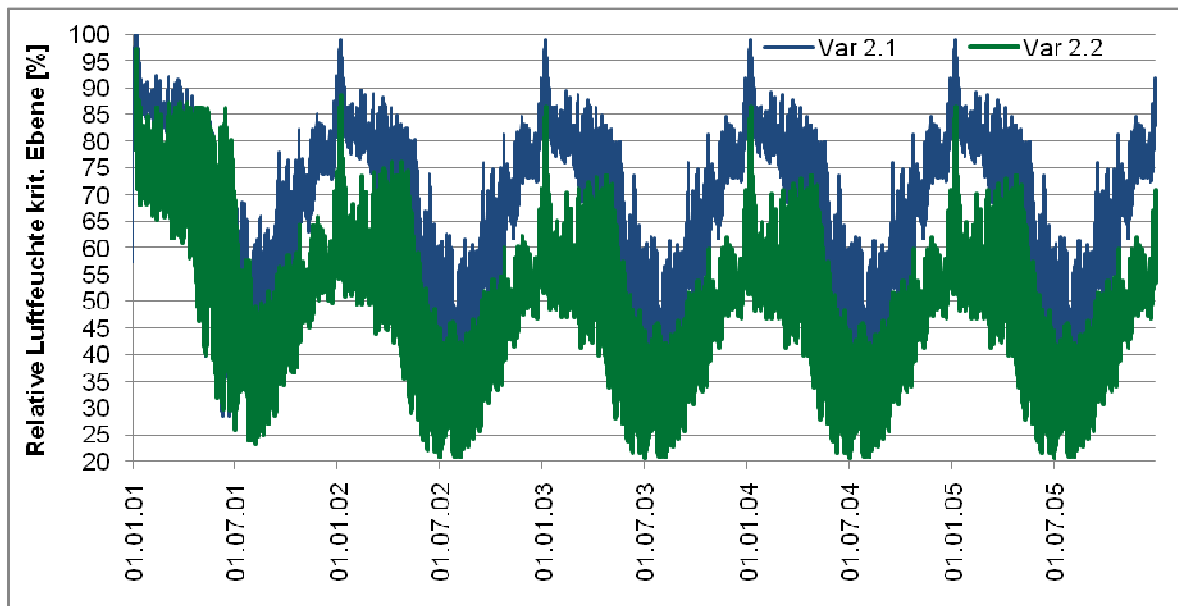


Abb. 64 Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene für Var. 2.1 und 2.2 (Mineralwolldämmung)

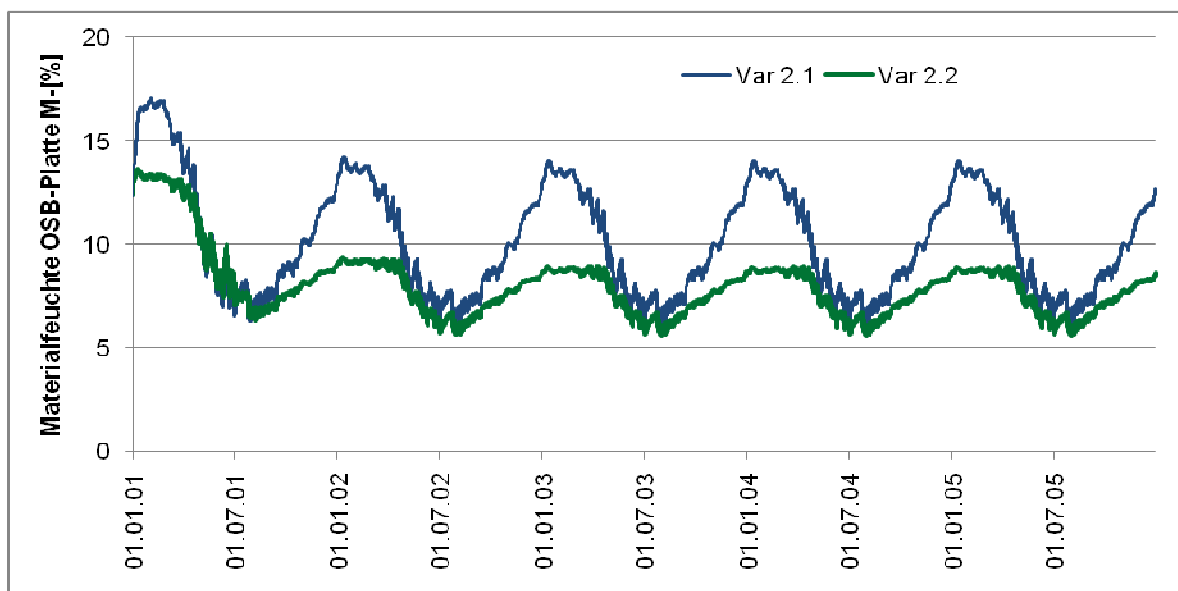


Abb. 65 Stofffeuchte in der OSB-Platte für Var. 2.1 und 2.2 (Mineralwolldämmung)

Die Berechnungen über einen Zeitraum von 5 Jahren sind wichtig, um Auffeuchtungen auszuschließen. Wie man an Relativen Luftfeuchten und OSB-Feuchten bei allen 4 Varianten sieht, kommt es nicht zu Feuchteakkumulation in den Dachaufbauten.

Die Varianten mit Zellulose-Dämmung verhalten sich unkritisch. Hingegen ist zumindest bei Var. 2.1 (OSB-Mineralwolle) der für Schimmelpilzwachstum kritische Wert von 80 % r.F. über einen Zeitraum > 6 Wochen überschritten. Die OSB-Platten-Feuchte bleibt jedoch deutlich unter dem Grenzwert von 18 M-%. Aufgrund des „milderen“ Innenklimas gegenüber dem realen Versuch ist die Relative Luftfeuchte und auch die OSB-Platten-Feuchte deutlich geringer. Bei dieser Variante ist im Einzelfall eine detaillierte Betrachtung notwendig.

3.3.2.2 Variation Außenklima

Da die Region Leipzig ein vergleichsweise mildes Klima aufweist, wurde für 2 Varianten eine Simulation mit dem Außenklima „Holzkirchen 1991“, abgelegt als Klimadatensatz im Programm WUFI, durchgeführt.

Ein Vergleich der beiden Klimadatensätze anhand der Lufttemperaturen zeigt beträchtliche Unterschiede - nicht im Minimalwert, aufgrund des extrem kalten Januars in Leipzig, aber doch eindeutig im Jahresmittel:

Tab. 21 Lufttemperaturwerte für „Leipzig 2008/2009“ und „Holzkirchen 1991“

	Leipzig 2008/2009	Holzkirchen 1991
mittlere Temperatur	10,0 °C	6,4 °C
minimale Temperatur	-19,8 °C	-21,2 °C
maximale Temperatur	33,9 °C	30,8 °C

Relative Luftfeuchten und Niederschlagsmengen unterscheiden sich auch beträchtlich, sind jedoch bei den vorliegenden Flachdachaufbauten keine entscheidenden Einflussgrößen.

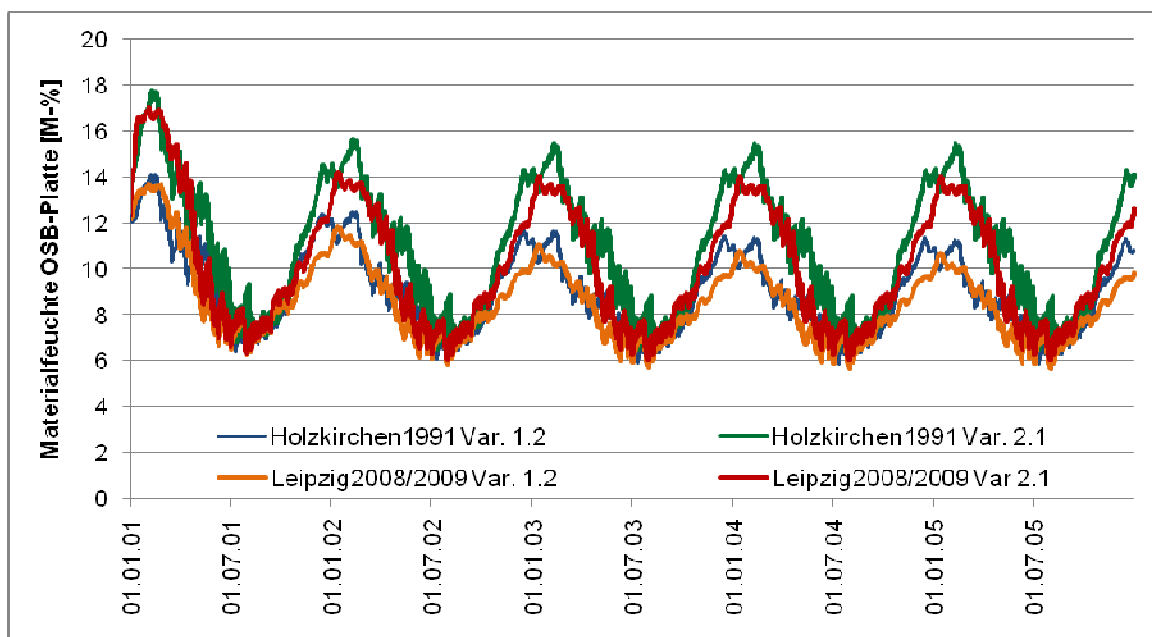


Abb. 66 Stofffeuchte in der OSB-Platte für Var. 1.2 und Var. 2.1

Bei beiden Varianten führt die Simulation mit dem Außenklima „Holzkirchen 1991“ zu einer höheren OSB-Platten-Feuchte als bei der Simulation mit dem Leipziger Klima.

Es kommt jedoch auch hier nicht zu einer Feuchteakkumulation in den Konstruktionen.

Beim Nachweis eines einzelnen Objekts ist die Wahl des Außenklimas am Standort des entsprechenden Gebäudes zu empfehlen - wie sie beispielsweise durch die Klimadatensätze „Testreferenzjahre für Deutschland“ [39], herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst, zur Verfügung stehen. Dort wird die Bundesrepublik Deutschland in 15 Klimaregionen unterteilt.

3.3.2.3 Variation Innenklima

Bei dieser Parameterstudie wurde der Einbau eines Estrichs simuliert. Beginnend ab 1.10., wurde dafür die Raumluftfeuchte auf 80% erhöht (bei 21 °C Raumlufttemperatur), danach ein konstantes Innenraumklima mit $T = 21\text{ °C}$ und $\phi = 55\%$ angenommen.

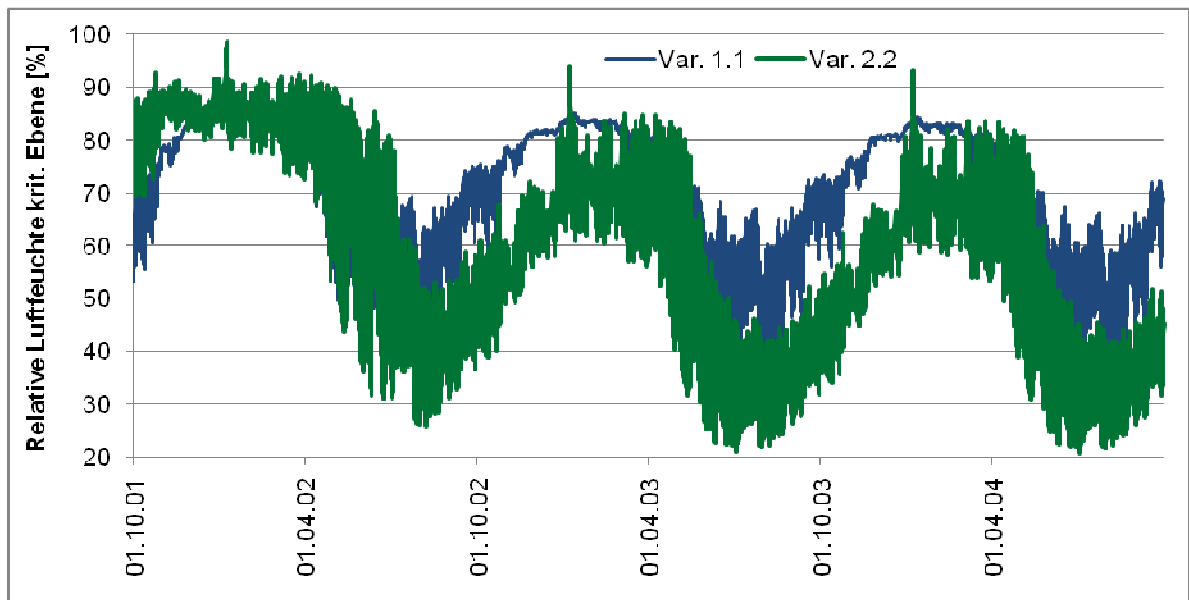


Abb. 67 Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene, bei Simulation Estrich-Einbau über 6 Wochen, für Var. 1.1 und Var. 2.2

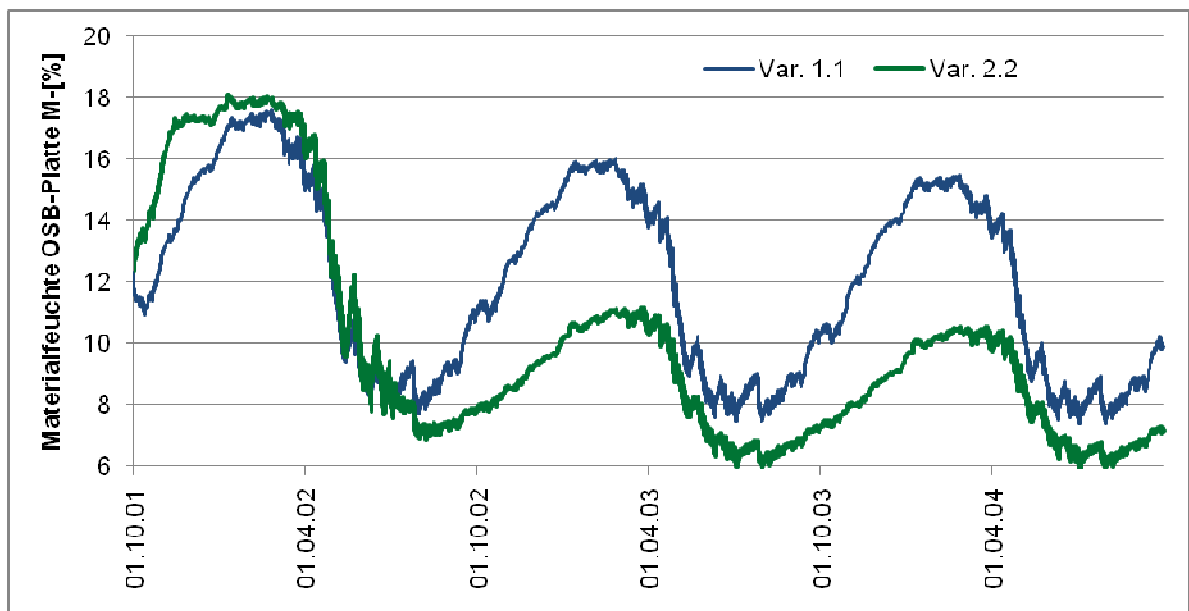


Abb. 68 Stofffeuchte in der OSB-Platte, bei Simulation Estrich-Einbau über 6 Wochen, für Var. 1.1 und Var. 2.2

Sowohl Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene als auch Stofffeuchte in der OSB zeigen, dass sich die erhöhte Innenraumfeuchte im 1. Winter nicht kritisch auswirkt und der Ausgleichszustand bei beiden Varianten bereits im 2. Winter erreicht ist.

3.3.2.4 Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag

Ähnlich wie bei mechanischen Berechnungen ist man auch beim bauphysikalischen Nachweis einer Konstruktion um einen Sicherheitszuschlag bemüht. Im vorliegenden Fall der Flachdächer ist es sinnvoll, einen möglichen konvektiven Feuchteeintrag in die Konstruktion durch Undichtigkeiten in der Luftdichtheitsebene zu berücksichtigen. Aktuell werden seitens der Fachwelt ein Wert von $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Winter})$ angegeben. Nach Meinung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe muss dieser Feuchteeintrag jedoch als zu hoch eingestuft werden - da er eher amerikanischen Verhältnissen von Luftdichtheit entspricht. Bei korrekter, fachmännischer Ausführung ist davon auszugehen, dass die erreichte Luftdichtigkeit so gut ist, dass der einzurechnende konvektive Feuchteeintrag geringer gewählt werden kann. Im vorliegenden Fall wurde deshalb die Parameterstudie für drei verschiedene Größen des konvektiven Feuchteeintrags - 250, 150 und $50 \text{ g}/\text{m}^2$ durchgeführt.

Dafür wurde der jeweils genannte Feuchteeintrag gleichmäßig auf die 7 Wintermonate (1.10. bis 30.04.) verteilt - was bei z.B. bei $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Winter})$ einer Feuchtequelle von $1,36 \cdot 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ entspricht.

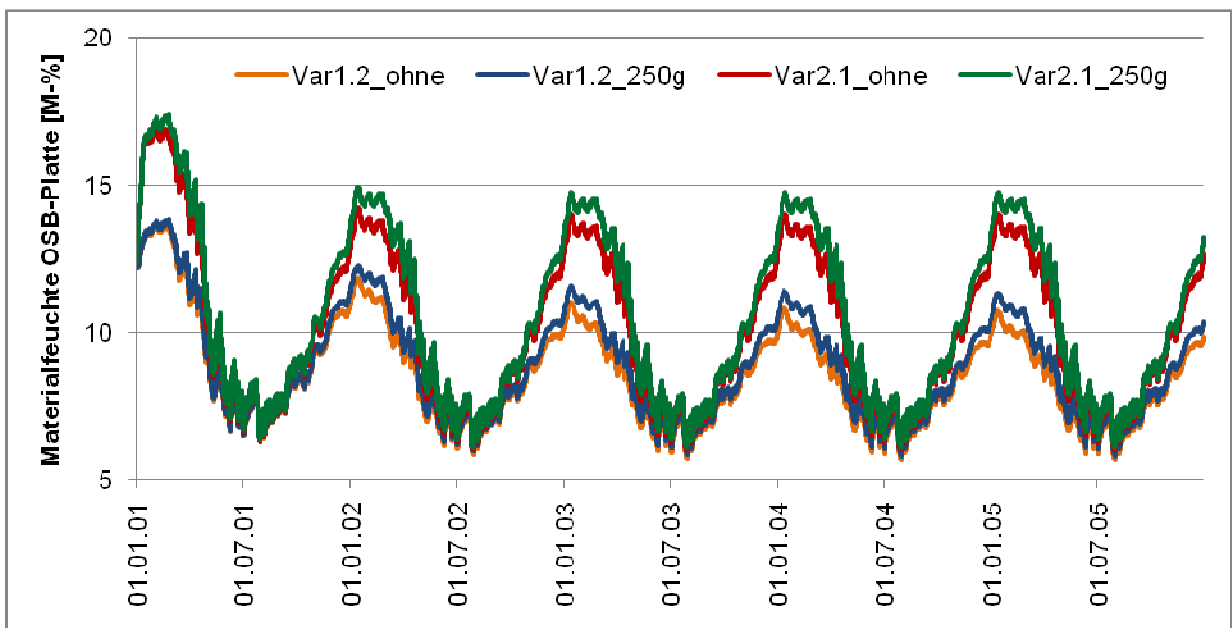


Abb. 69 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei konvektivem Feuchteeintrag von $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Winter})$, für Var. 1.2 und Var. 2.1

Abb. 69 zeigt zunächst das Verhalten von 2 Varianten im Vergleich zwischen Rechnung mit und ohne konvektiven Feuchteeintrag von $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Winter})$. Im 1. Winter führt der konvektive Feuchteeintrag nur unmerklich zu einer Erhöhung der OSB-Platten-Feuchte, weil in beiden Varianten eine relativ hohe Startfeuchte angenommen wurde. In den weiteren Wintern macht sich der zusätzliche Feuchteeintrag bemerkbar, wobei bei Var. 1.2 (Zellulose-feuchtevariable Dampfbremse) die Unterschiede geringer sind. Insgesamt führt

aber der Feuchteeintrag weder zu kritischen Zuständen im Vergleich zur Normalvariante, noch kommt es zu Feuchteakkumulationen. Folgende Abb. 70 und Abb. 71 zeigen die Spitzen der OSB-Platten-Feuchten im Vergleich für die verschiedenen Mengen des Feuchteeintrags:

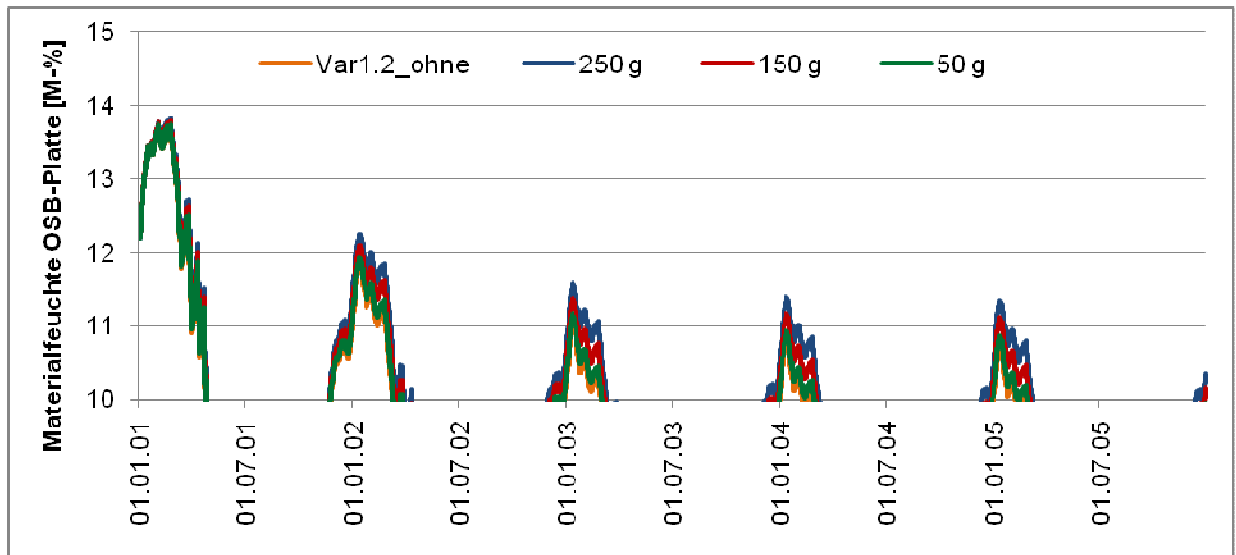


Abb. 70 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei konvektivem Feuchteeintrag von 250, 150 und 50 g/(m²-Winter), für Var. 1.2

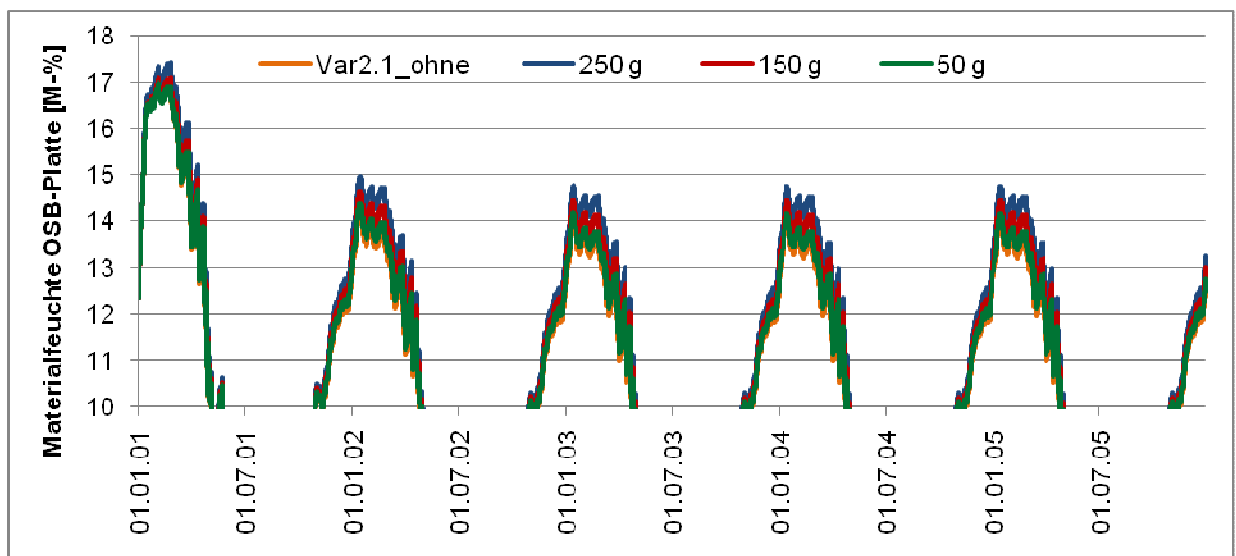


Abb. 71 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei konvektivem Feuchteeintrag von 250, 150 und 50 g/(m²-Winter), für Var. 2.1

Die Spitzen der OSB-Platten-Feuchten verhalten sich erwartungsgemäß entsprechend den Mengen des Feuchteeintrags.

3.3.2.5 Variation der Deckschicht

Helle Bahn.

Eine der zusätzlichen Varianten bei den Dachaufbauten ist die Verwendung einer hellen Bahn.

Für diese Variante kam ebenfalls eine PVC-Bahn mit einem s_d -Wert von ca. 19 m zum Einsatz. Das hygrothermische Verhalten wurde nicht vollständig erfasst, jedoch wurde die Oberflächentemperatur unter der Bahn gemessen. Mit diesen Werten der Oberflächentemperatur als Randbedingung wurde die Parameterstudie durchgeführt.

Im Vergleich zur Schwarzen PVC-Bahn kann die helle PVC-Bahn die kurzwellige solare Strahlung schlechter absorbieren (Absorptionsgrad von ca. 0,55 vs. 0,95) - was sich nachteilig auf das hygrothermische Verhalten im Dach auswirkt.

Folgende Abb. 72 zeigt die sich infolge der unterschiedlichen Absorption von kurzweiliger solarer Strahlung einstellende Stofffeuchte in der oberen OSB-Platte:

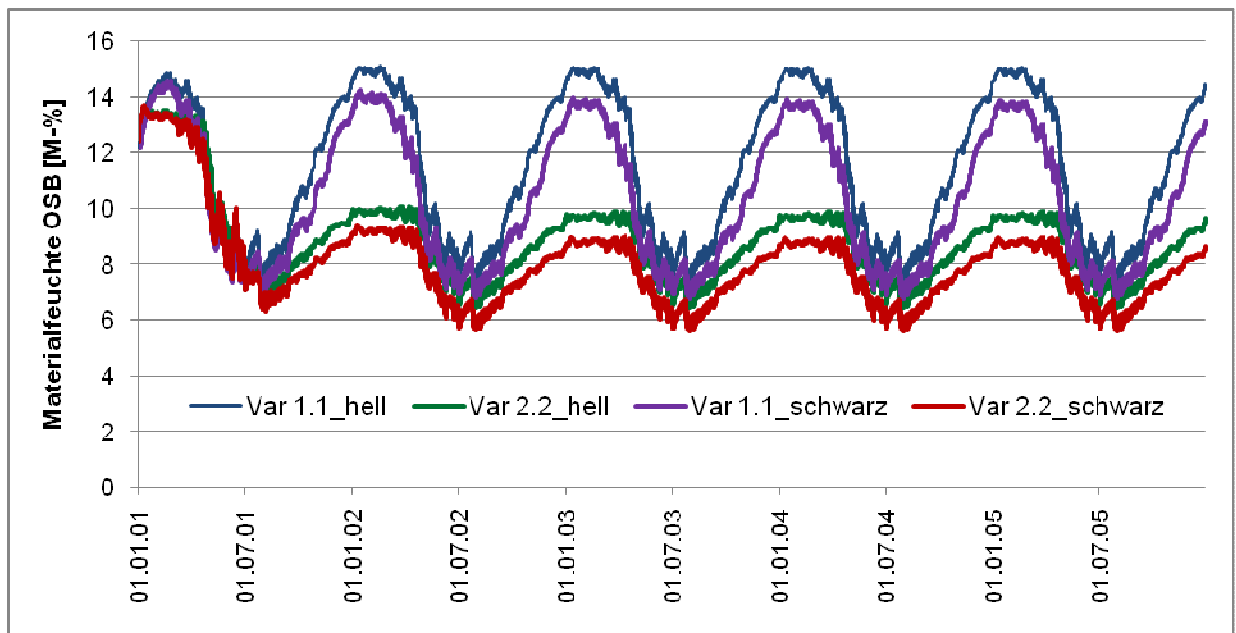


Abb. 72 Stofffeuchten in der OSB-Platte für Var. 1.1 und Var. 2.2, jeweils im Vergleich für helle und schwarze Bahn

Es ist ein Unterschied zwischen Dachaufbau mit schwarzer und heller PVC-Bahn festzustellen - bei Var. 1.1 ergibt sich eine Differenz in der OSB-Plattenfeuchte von bis zu 1 M-% im Winter. Aus Sicht der Autoren ist deshalb beim unbelüfteten Flachdach mit nackter Bahn immer eine schwarze Bahn der hellen Bahn vorzuziehen.

Bitumen-Bahn.

Im Versuchsgebäude kam als Dachabdichtung eine Schwarze PVC-Bahn zum Einsatz, welche mit $s_d=19$ m eine im Vergleich zu anderen Dachabdichtungsbahnen hohe Wasserdampfdurchlässigkeit besitzt. Dies ist im Fall des unbelüfteten Flachdachs als vorteilhaft anzusehen, da so ein Teil der Feuchte aus der Konstruktion über die Dachabdichtung abgeführt werden kann. Um den Einfluss des Diffusionsvermögens der PVC-Bahn zu quantifizieren, wurde zum Vergleich eine Berechnung mit einer Bitumen-Dachbahn ($s_d = 300$ m) durchgeführt:

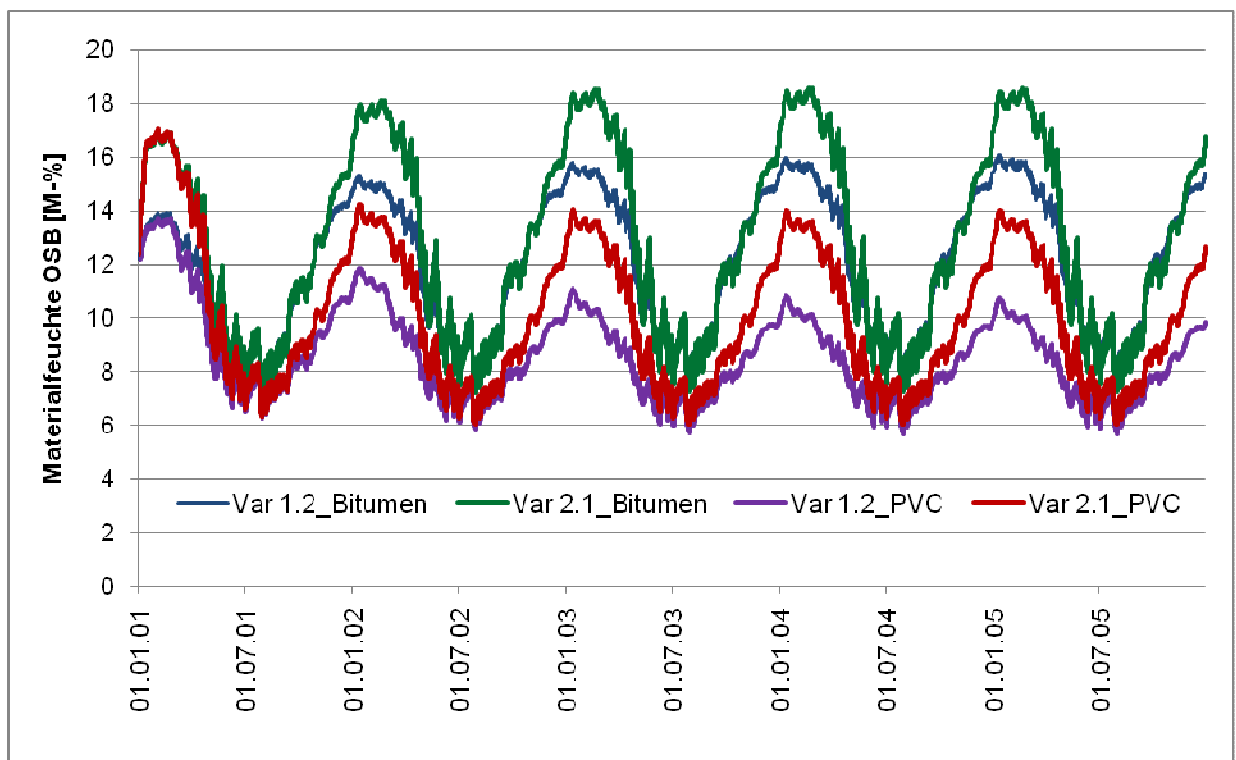


Abb. 73 Stofffeuchte in der OSB-Platte im Vergleich für Aufbau mit Bitumen-Dachabdichtung ($s_d = 300$ m) und Schwarzer PVC-Bahn ($s_d = 19$ m), für Var. 1.2 und Var. 2.1

Der Unterschied zwischen den Aufbauten mit Bitumen-Dachabdichtung und Schwarzer PVC-Bahn ist als erheblich einzustufen - in beiden Varianten steigt die OSB-Platten-Feuchte stark an. Bei Var. 2.1 ist sogar eindeutig der Grenzwert von 18 M-% erreicht, wonach dieser Aufbau nicht zu empfehlen ist. Aber auch bei Var. 1.2 kommt es im Verlauf der berechneten 5 Jahre zu einer Auffeuchtung. Inwieweit der sich einstellende Ausgleichsfeuchtegehalt kritisch ist, kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht geklärt werden.

In jedem Fall ist von der Verwendung einer diffusionsdichten Dachabdichtung wie einer Bitumen-Bahn mit dem genannten s_d -Wert von 300 m für die im Forschungsvorhaben untersuchten Dachaufbauten eindeutig abzuraten. Dies gilt selbstverständlich ebenso für andere sehr dichte Dachabdichtungen wie PIB (Polyisobutylen) oder ECB (Ethylen-Copolymerisat-Bitumen).

3.3.2.6 Berücksichtigung eines Überbaus, z.B. durch PV-Module

Die vier untersuchten Varianten mit Schwarzer Bahn waren im Versuchsgebäude freistehend und quasi unverschattet, was in Bezug auf das hygrothermische Verhalten als ideal anzusehen ist. In der Realität wird es jedoch in einigen Fällen zu Verschattung durch Nachbargebäude oder -direkt- durch Dachaufbauten wie z.B. Solarthermie-Anlagen oder Photovoltaik-Module kommen.

Deshalb wurde ebenfalls eine Parameterstudie durchgeführt, bei der die vollständige Verschattung des Dachs simuliert wurde. Als Klimarandbedingung konnte dafür die im Versuchsgebäude gemessene Oberflächentemperatur unter der Abdichtung vom mit OSB-Platte verschatteten Aufbau (vgl. Tab. 10) verwendet werden. Dadurch werden alle Effekte berücksichtigt: verhinderte Absorption von kurzwelliger solarer Strahlung, verminderte langwellige Abstrahlung der Dachoberfläche und verhinderte Absorption langwelliger atmosphärischer (Gegen-) Strahlung, langwellige „Rück“-Strahlung des verschattenden Aufbaus zur Dachoberfläche.

Sicherlich weist das Verhalten einer OSB-Platte als Verschattungselement einige Unterschiede bezüglich des thermischen Einflusses auf ein Dach im Vergleich z.B. zu einer Photovoltaik-Anlage auf. Für die weitere Betrachtung wird dies jedoch in erster Näherung als äquivalent hingewiesen:

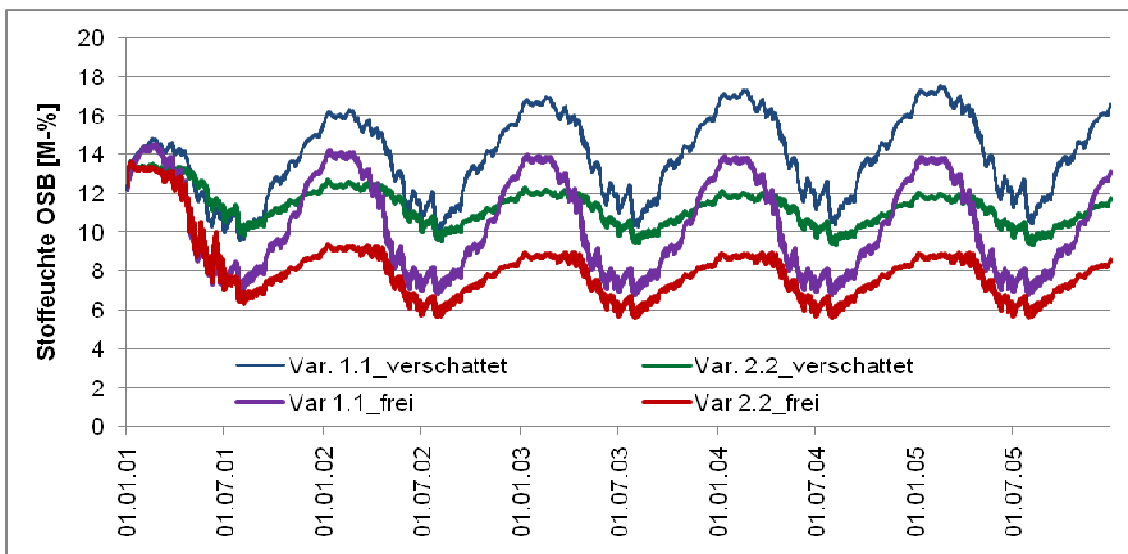


Abb. 74 Stofffeuchte in der OSB-Platte im Vergleich für verschatteten und unverschatteten Aufbau, für Var 1.1 und Var. 2.2

Für beide Varianten ergeben sich signifikante Unterschiede aufgrund der Verschattung. Während jedoch bei Var. 1.1 (Zellulose-OSB) eine Feuchteakkumulation zu verzeichnen ist, kann bei Variante 2.2 (Mineralwolle-feuchtevariable Dampfbremse) die Konstruktion gegenüber der Startfeuchte noch geringfügig austrocknen.

Ein Überbau eines unbelüfteten Flachdachs bedarf also in jedem Fall einer detaillierten Betrachtung.

3.3.3 Parameterstudien zu Varianten Gründach

Bei den Parameterstudien für die Varianten mit Gründach wurde sich auf die Dachaufbauten mit Zellulose-Dämmung beschränkt, da die beiden anderen Varianten als kritisch einzustufen sind, wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde.

Gezeigt werden soll wieder der Einfluss von konvektivem Feuchteeintrag sowie - als Grenzwertbetrachtung - eine vollständige Verschattung durch umstehende Gebäude.

3.3.3.1 Grundversion - Berechnung für 5 Jahre

Zunächst wurde wieder - wie bei den Varianten mit Schwarzer Bahn - eine Grundversion berechnet: mit dem Außenklima „Leipzig 2008/2009“ und dem „Innenklima, normale Feuchtelast“ (vgl. Abb. 20).

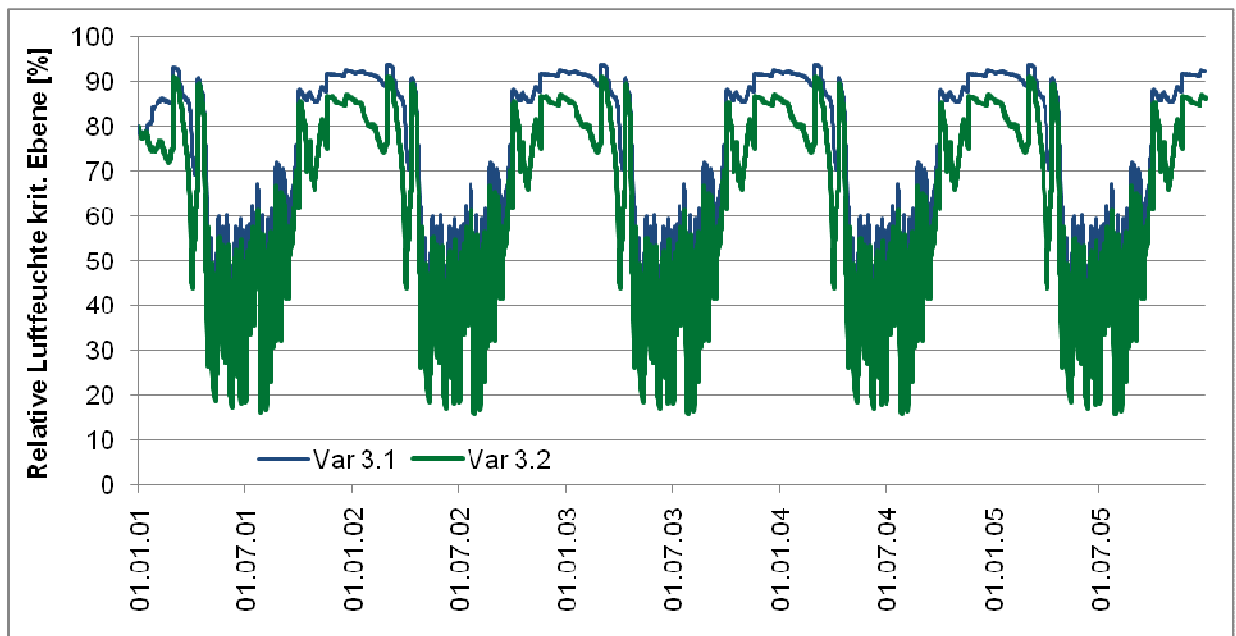


Abb. 75 Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene für Var. 3.1 und Var. 3.2

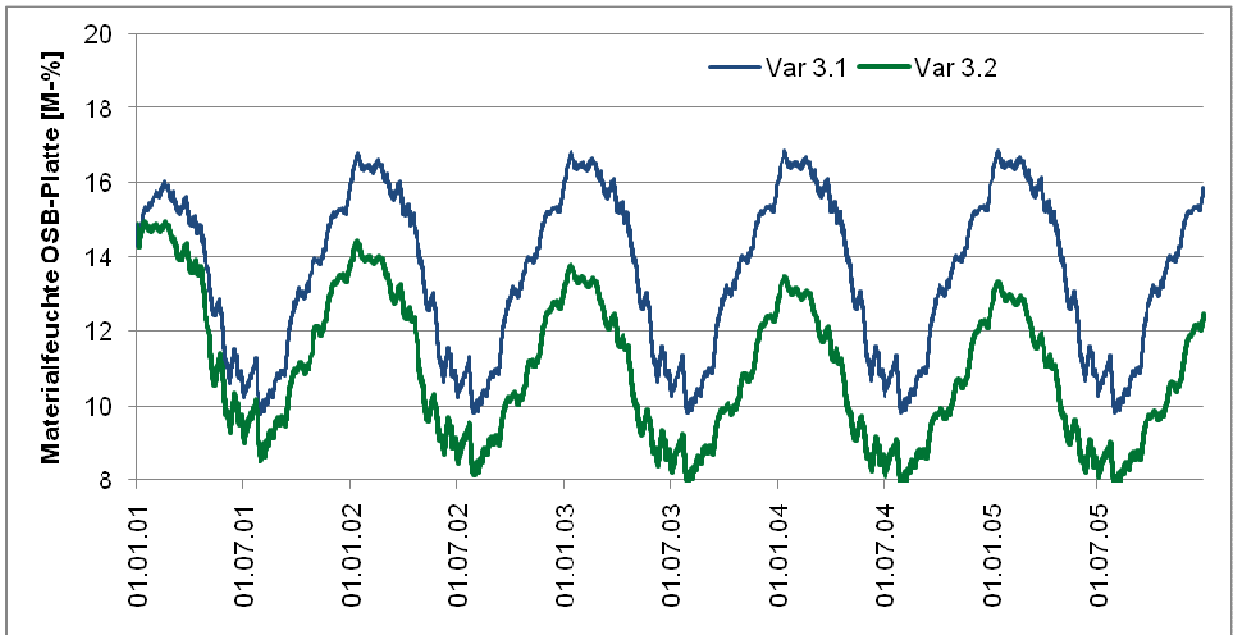


Abb. 76 Stofffeuchte in der OSB-Platte für Var. 3.1 und Var. 3.2

Beim Gründach sind zwischen der Variante mit OSB-Platte als innere diffusionshemmende Schicht (Var. 3.1) und der Variante mit feuchtevariabler Dampfbremse (Var. 3.2) signifikante Unterschiede festzustellen:

Bei Var. 3.1 überschreitet die Relative Luftfeuchte in der kritischen Ebene über mehrere Wochen im Winter den Wert von 90 % und erreicht Stofffeuchten in der OSB von fast 17 M-%. Bedenkt man die Abweichungen zwischen Simulation und Messung sowie die wechselnden Randbedingungen (z.B. kurzzeitig höhere Innenraumlast), kann diese Konstruktion in Verbindung mit einem Gründachaufbau nicht empfohlen werden.

Hingegen bleibt die Relative Luftfeuchte bei Var. 3.2 (Zellulose-Dämmung-feuchtevariable Dampfbremse) bis auf wenige Wochen im Winter unter dem Grenzwert von 85 %. Auch die sich einstellende Stofffeuchte in der OSB bleibt mit max. 13,5 M-% in großem Abstand zum Grenzwert von 18 M-%.

3.3.3.2 Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag

Auch für die 2 Gründachvarianten wurde eine Berechnung mit konvektivem Feuchteeintrag durchgeführt - die Angaben dazu finden sich in Abschnitt 3.3.2.4.

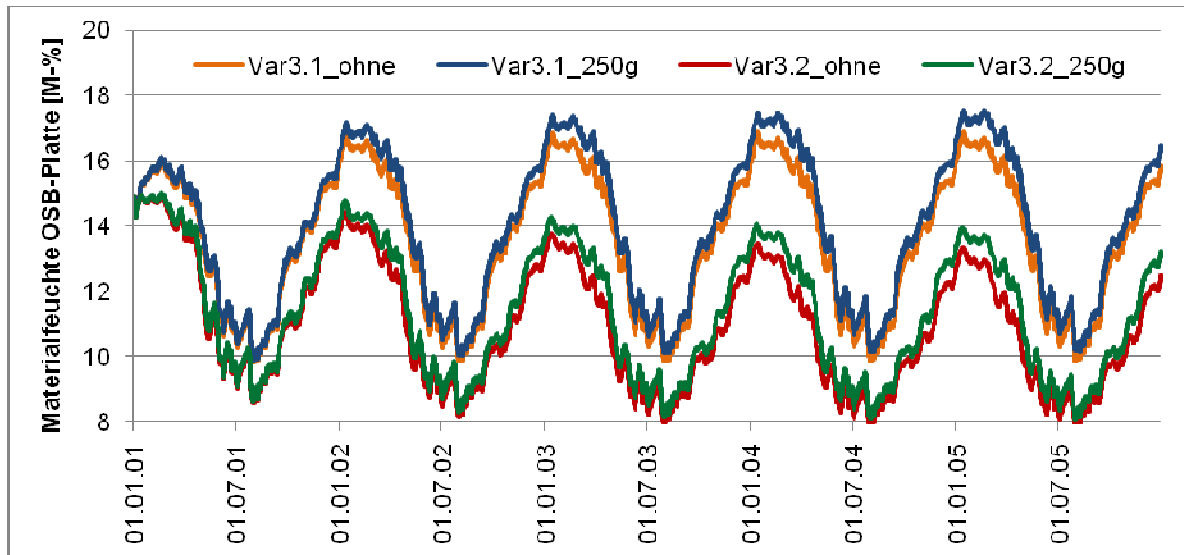


Abb. 77 Stofffeuchte in der OSB bei konv. Feuchteeintrag von 250 g/(m²-Winter), für Var. 3.1 und Var. 3.2

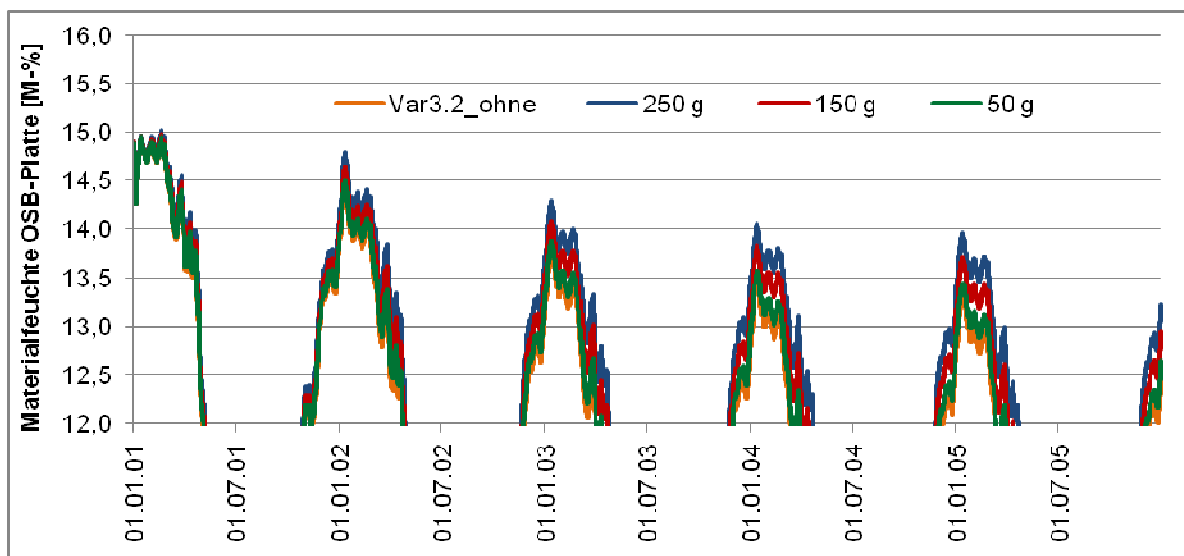


Abb. 78 Stofffeuchte in der OSB bei konvektivem Feuchteeintrag von 250, 150 und 50 g/(m²-Winter), für Var. 3.2

Var. 3.1 wurde hinsichtlich ihres hygrischen Verhaltens schon im Abschnitt 3.3.2.1 für kritisch befunden. Dies wird durch die Simulation eines konvektiven Feuchteeintrags bestätigt (vgl. Abb. 77) - man beachte den mit jedem Winter steigenden Abstand zwischen Berechnung mit und ohne Feuchteeintrag. Var. 3.2 (Zellulose-Dämmung-feuchtevariable Dampfbremse) bleibt hingegen unkritisch.

3.3.3.3 Simulation von Verschattung

Für das hygrothermische Verhalten eines unbelüfteten Flachdachs ist der Eintrag von kurzweiliger solarer Strahlung von entscheidender Bedeutung - für die Varianten mit Schwarzer Bahn wurde dies bereits im Abschnitt 3.3.2.6 gezeigt.

Für die Varianten mit Gründach soll in der Parameterstudie eine Verschattung durch umstehende Gebäude simuliert werden. Als Grenzwertbetrachtung wird dabei die direkte solare Strahlung vollständig ausgeschaltet, der Wärmeeintrag findet nur noch über diffuse solare Strahlung statt. Dies stellt einen Extremfall dar, dem in Realität hohe Nachbarbebauung in Ost-, Süd- und Westrichtung entsprechen würde.

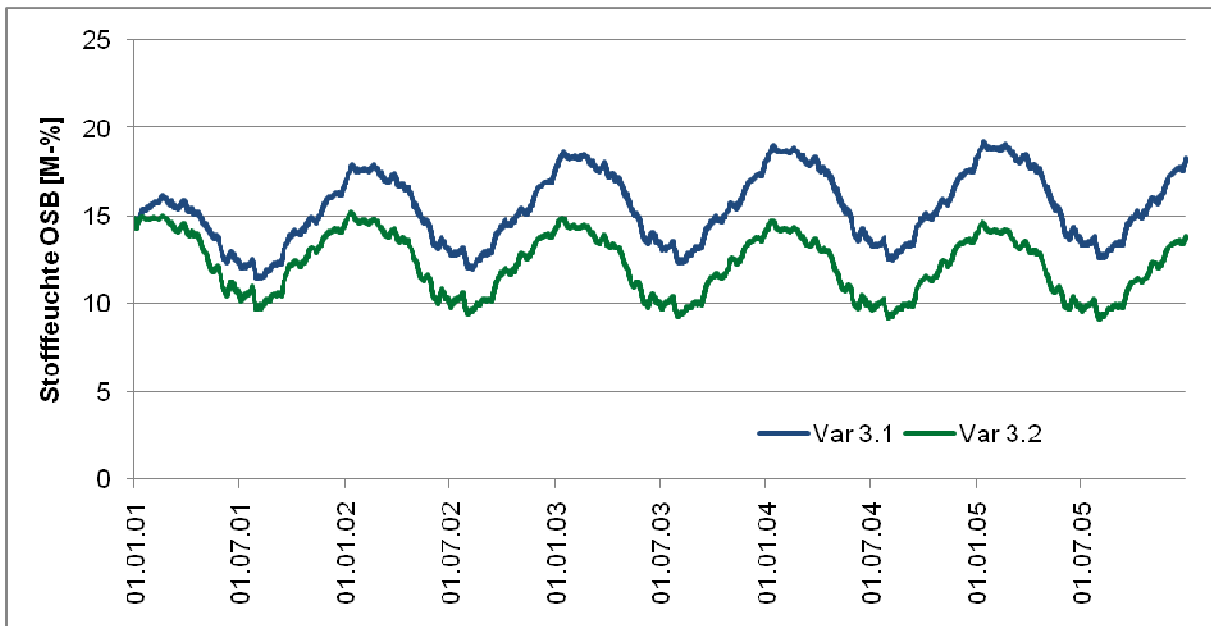


Abb. 79 Stofffeuchte in der OSB-Platte bei vollständiger Verschattung (Reduzierung der solaren Strahlung auf ihren diffusen Anteil), für Var. 3.1 und Var. 3.2

Passend zu den anderen gezeigten Parameterstudien wird auch hier gezeigt, dass Var. 3.1 (Zellulose-Dämmung - OSB-Platte) in ihrem hygrischen Verhalten kritisch ist: Es findet eine Feuchteakkumulation in der OSB-Platte statt und der Grenzwert von 18 M-% ist schon im 3. Winter erreicht.

Hingegen bleibt Var. 3.2 unkritisch. Offensichtlich schafft es die feuchtevariable Dampfbremse trotz höherem Dampfdruckgefälle im Winter (Feuchteeintrag) und niedrigerem Dampfdruckgefälle im Sommer (Austrocknung), die Konstruktion trocken zu halten.

4 Bestehende Objekte

Zusätzlich zu den Versuchen im Freilandbewitterungsstand in Leipzig wurden weiterführende Untersuchungen an bestehenden Flachdachkonstruktionen mit einschaligem Aufbau und raumseitig angeordneter feuchtevariabler diffusionshemmender Schicht durchgeführt. Sämtliche Objekte wurden optisch sowie an ausgewählten Stellen auch messtechnisch begutachtet und auf Schadensfälle hin untersucht. Über diese Maßnahme sollen zusätzliche Aussagen zur Dauerhaftigkeit solcher Konstruktionen gewonnen werden.

Dabei liegt neben Konstruktionen mit reiner Dachabdichtung das besondere Augenmerk auf Grün- und Kiesdachaufbauten.

Für die untersuchten Objekte werden nachfolgend die vorgefundenen konstruktiven Randbedingungen mit Aufbau der Flachdachkonstruktion beschrieben und über zugehörige Fotodokumentationen und Zeichnungen verdeutlicht.

Objekt: I: Bürogebäude Stuttgart VaihingenBeschreibung:

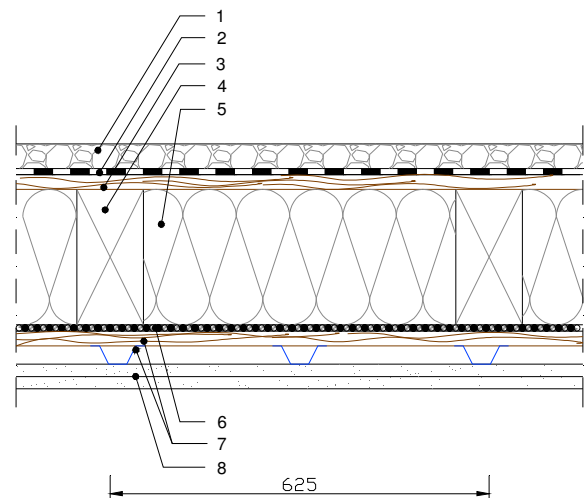
- Bürogebäude in Massivbauweise mit Flachdach in Holzbauweise, Grobkiesauflage
- obere Etage als Wohnraum und Büro genutzt (20 °C / 50% rel. LF)
- Baujahr 1995
- Umliegende Bebauung mit gleicher Höhe, keine Verschattung

Konstruktive Randbedingungen:

Grundfläche:	130 m ²
Dachneigung::	keine planmäßige Dachneigung
Lage:	umliegende Bebauung mit gleicher Höhe, keine Verschattung

Aufbau Dach:

- 1 40 mm Grobkiesauflage 16/32
- 2 Dachabdichtung mit Schutzvlies
- 3 24 mm Schalungsbretter
- 4 Deckenbalken KVH 110/220 mm
- 5 220 mm Zellulosedämmung isofloc L+
- 6 feuchtevariable Dampfbremse (DB⁺)
- 7 Unterkonstruktion (Lattung 24/48 und Federschiene)
- 8 2 x 20 mm Gipskartonfeuerschutzplatte

U-Wert:

Dachaufbau ohne Bekiesung und raumseitigen Ausbau

$U_m = 0,230 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 15\% \text{ Holzanteil}$

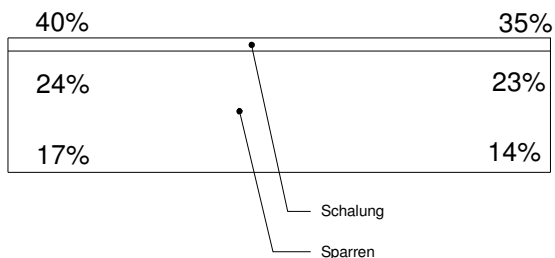
Infolge einer Umnutzung und Erweiterung wurde der Dachaufbau eines ca. 7 m langen und 1,5 m breiten Verbindungsganges von der Raumseite geöffnet und Folgendes festgestellt:

- Im südöstlichen Bereich wurde ein Feuchteschaden über eine Breite von ca. 5 Gefachen festgestellt, nach Westen hin ließ dieser nach. Im westlichen Bereich war kein Schaden zu verzeichnen.

- Im Bereich der Stöße waren keine Fehlverklebungen an der Dampfbremse/Luftdichtung festzustellen. Ebenfalls war der Anschlussbereich zur Wand auf der Nordseite ohne Fehlstellen.
- Auf der Süd-Ost-Seite im Bereich des zu erkennenden Schadens war die Dampfbremse im Wandbereich zerstört, infolge von Salz und Wassereinwirkung. In diesem Bereich war an mehreren Stellen eine Versprödung infolge Auskristallisierung in der Dampfbremspappe zu erkennen.
- Im Bereich des Schadens war der Zellulosegefachdämmstoff um ca. 4 cm komprimiert und auf der Oberseite verkrustet. Im Westbereich war der Gefachdämmstoff unverändert zum Einbringen (ohne Hohlraum zur Schalung sowie Verkrustung der Oberfläche).
- Die Holzfeuchte von Schalung und Sparren betragen:

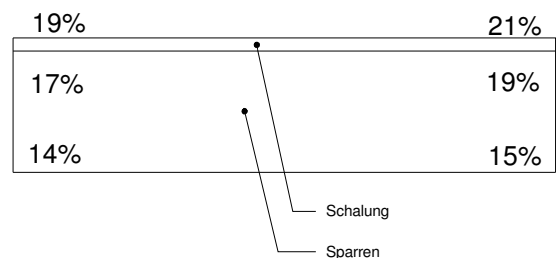
Südostbereich

Messpunkte in der Schalung, im oberen und unteren Bereich des Deckenbalkens (Länge 1,2 m)



Westbereich

Messpunkte in der Schalung, im oberen und unteren Bereich des Deckenbalkens (Länge 1,2 m)



- Einige Teile der Schalung wiesen erste Fäulnis auf, in den direkt mit Zellulosedämmung umgebenen Bereichen war kein biologischer Befall zu erkennen.

Nach weiterer Öffnung der Gefache ließ sich der Feuchteschaden auf eine Leckage im Bereich der Dachabdichtung des angrenzenden Treppenhauses zurückführen, die zu Schäden in der Konstruktion führte. Auf dem ohne Gefälle ausgeführten Dach ließen sich Wassersackbildungen beobachten.

Alle Gefache auf der Westseite, in denen keine Probleme der Dachabdichtung vorlagen, wiesen einen feuchtetechnisch unkritischen Zustand auf (vgl. Abb. 80 sowie ermittelte Holzfeuchten).



Fehlstelle infolge Feuchteschaden



Grad der Zerstörung der Dampfbremse als Folge einer Abdichtungs-Leckage



Wassersackbildung



schadhafter Bereich, komprimierte Dämmung



Schadensfreier Bereich (Westseite)



Schadensfreier Bereich

Abb. 80 Abbildungsserie zum Feldversuch – Objekt I – Stuttgart Vaihingen

Objekt: II: Bürogebäude LauterbachBeschreibung:

- eingeschossiger Anbau in Holzrahmenbauweise mit begrüntem Flachdach
- Nutzung als Büroraum, ab Januar 2007
- Umliegende Bebauung mit gleicher Höhe

Konstruktive Randbedingungen:

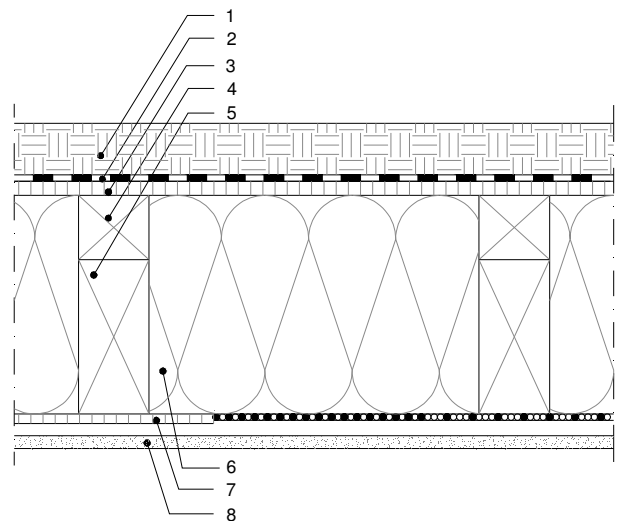
Grundfläche: 30 m²

Dachneigung: ~ 2°

Lage: Südwestseitiger, eingeschossiger Anbau an ein zweigeschossiges Gebäude, Verschattung bis zum Vormittag

Aufbau Dach:

- 1 80 mm Substrat (Vulkanasche)
- 2 Dachabdichtung
- 3 22 mm OSB/3 Platte
- 4 Aufpopplung 100-240 mm
- 5 Deckenbalken KVH 120/240 mm
- 6 - > 240 mm Zellulosedämmung isofloc L
- 7 - > 240 mm Mineralfaser (Steinwolle)
- 8 - 15 mm OSB/3 Platte
- Baupappe (proclima DB⁺)
- feuchtevariable Dampfbremse (Intello)
- 8 Lattung 24/48 mit
- 12,5 mm Gipskartonfeuerschutzplatte

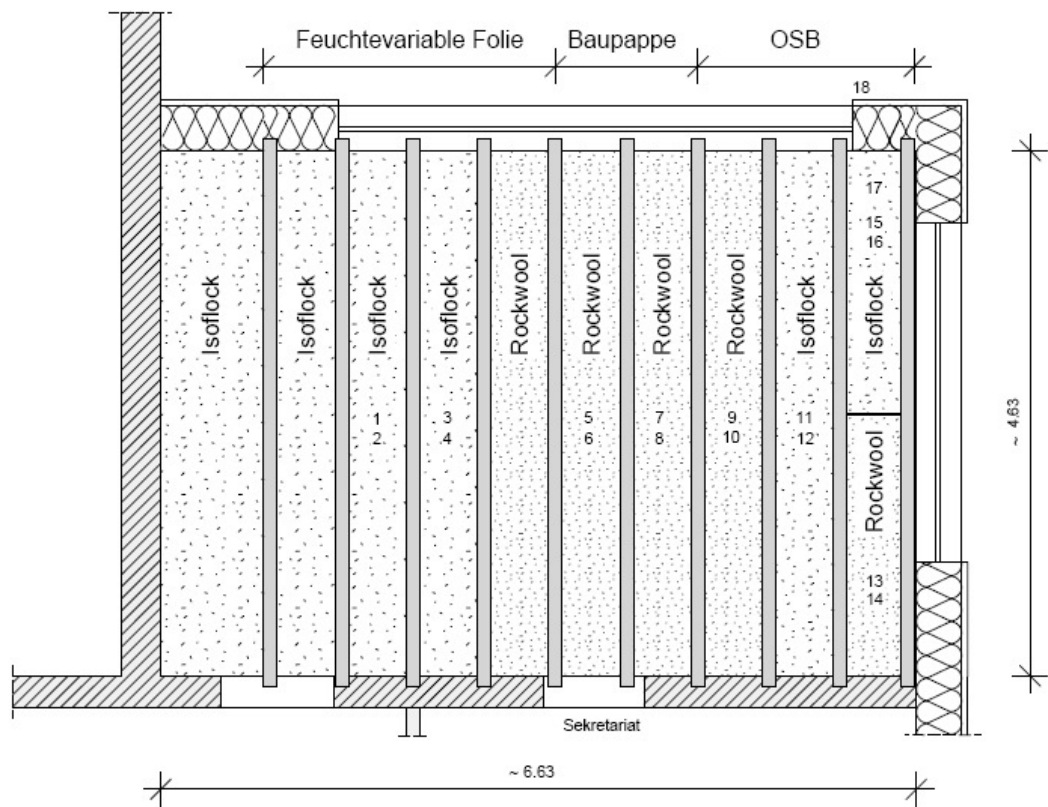
U-Wert:

ohne Gründachsubstrat und raumseitigen Ausbau

$U_m = 0,150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 15\% \text{ Holzanteil}$

Im Grundriss werden die einzelnen Variationen separat aufgeführt

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurden seitens des Bauherren und Nutzers keine Schäden festgestellt. Im Objekt wurden zusätzlich die hygrothermischen Verhältnisse der einzelnen Aufbauten erfasst.



Grundriss



Draufsicht auf Büroanbau



Ausbauzustand Innenseite mit Messtechnik

Abb. 81 Abbildungsserie zum Feldversuch – Objekt II - Lauterbach

Objekt: III: Schulgebäude Erding-AufkirchenBeschreibung:

- Schulgebäude mit Flachdach in Holzbauweise.
- Baujahr 2004/2005
- erste Passivhausschule Deutschlands

Konstruktive Randbedingungen:

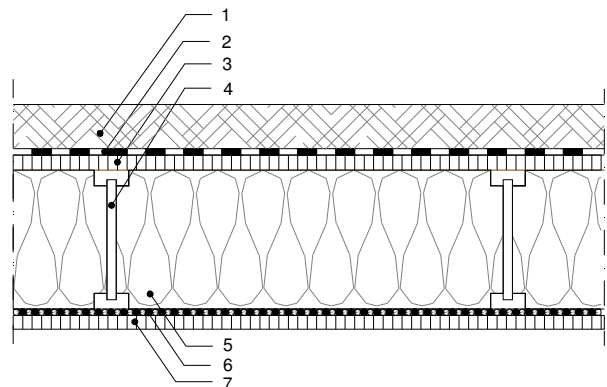
Grundfläche: 2500 m²

Dachneigung: 0° - 25°

Lage: Freistehendes Gebäude ohne Verschattung durch Bäume oder Nachbarbebauung

Aufbau Bodenplatte:

- 1 100 mm Substrat
 - 2 EPDM Dachabdichtung
 - 3 25 mm OSB/3 Platte
 - 4 Dachtragwerk TJI pro 550/ 406 mm
 - 5 406 mm Zellulosedämmung WLG 040
 - 6 feuchtevariable Dampfbremse (Difunorm)
 - 7 25 mm OSB/3 Platte
- raumseitige Akustikdecke

U-Wert:

ohne Gründachsubstrat und raumseitigen

Akustik Ausbau

$U_m = 0,105 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 5\% \text{ Holzanteil}$

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurden seitens des Bauherren und Nutzers keine Schäden festgestellt.

Objekt: IV: Wohngebäude Reutlingen**Beschreibung:**

- zweigeschossiges Einfamilienwohnhaus in Holzrahmenbauweise mit Flachdach
- Bebauung in Hanglage
- Baujahr 2002



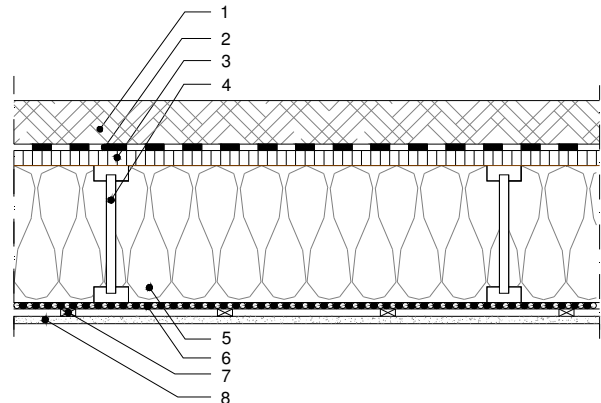
www.Journalfoto.de

Konstruktive Randbedingungen:

Grundfläche:	100 m ²
Dachneigung:	0°
Lage:	freistehendes Gebäude mit sehr wenig Verschattung durch Bäume

Aufbau Dach:

- 1 40 mm Substrat
- 2 Sarnafil Flachdachabdichtung
- 3 22 mm OSB/3 Platte
- 4 Dachtragwerk TJI pro 350/ 406 mm
- 5 406 mm Zellulosedämmung
- 6 feuchtevariable Dampfbremse
- 7 Unterkonstruktion mit 12,5 mm Gipskartonplatte

**U-Wert:**

ohne Gründachsubstrat und raumseitige
Bekleidung

$U_m = 0,107 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 5\% \text{ Holzanteil}$

Infolge eines Ausführungsfehlers bei der Dachabdichtung kam es zu Beginn der Nutzung zu einem lokalen Wassereinbruch, der sich raumseitig abzeichnete. Nach Sanierung des Schadens, mit Herstellung der Funktionalität der Dachabdichtung und dem Austausch des lokal durchfeuchteten Dämmstoffes traten bis zum heutigen Zeitpunkt keine weiteren Feuchteschäden auf.

Objekt: V: Wohngebäude Hitzacker**Beschreibung:**

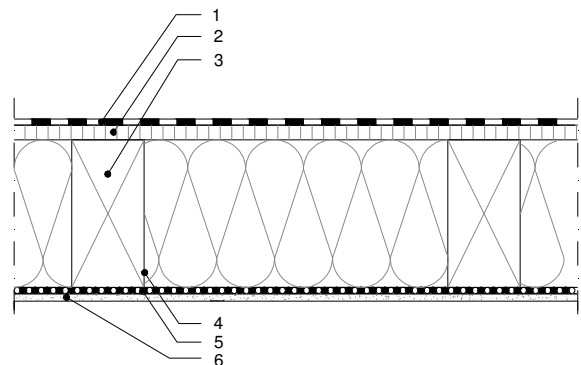
- Wintergarten eines Einfamilienhauses
- Nutzungsbeginn Januar 2007

**Konstruktive Randbedingungen:**

Grundfläche:	25 m ²
Dachneigung::	-
Lage:	freistehende, Verschattung durch Hauptgebäude und Bäume möglich

Aufbau Dach:

- 1 Bitumendachbahn
- 2 25 mm OSB Platte
- 3 Deckenbalken KVH 120/240 mm
- 4 240 mm Isofloc L Zellulosedämmung
- 5 feuchtevariable Dampfbremse (proclima Intello)
- 6 Unterkonstruktion mit 12,5 mm Gipskartonplatte

**U-Wert:**

ohne Berücksichtigung der raumseitige
Bekleidung

$U_m = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 15\% \text{ Holzanteil}$

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurden seitens des Bauherren und Nutzers keine Schäden festgestellt.

Objekt: VI: Wohngebäude Niedenstein**Beschreibung:**

- Zweigeschossiger Anbau mit Gründach an ein Wohnhaus
- Nutzung Flur, Bad, Wohnen
- Baujahr 2001

**Konstruktive Randbedingungen:**

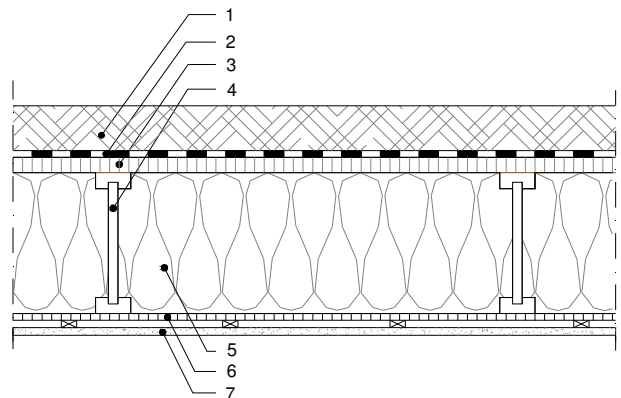
Grundfläche: 40 m²

Dachneigung:: 2°

Lage: freistehendes Gebäude, Teilverschattung durch angrenzendes Satteldach auf der Südseite

Aufbau Dach:

- 1 50 mm Gründachaufbau
- 2 Sarnafil Flachdachabdichtung
- 3 22 mm OSB Platte
- 4 Dachtragwerk TJI pro 350/ 240 mm
- 5 240 mm Zellulosedämmung
- 6 15 mm OSB Platte
- 7 Unterkonstruktion mit 12,5 mm Gipskartonplatte

**U-Wert:**

ohne Gründachsubstrat und raumseitige Bekleidung

$U_m = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \Rightarrow \text{bei } 5\% \text{ Holzanteil}$

In einer ausführlichen Prüfung der Konstruktion Ende 2008 wurden keine Schäden festgestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen im Versuchsgebäude in Leipzig zeigten, dass unbelüftete einschalige Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise unter bestimmten konstruktiven Randbedingungen feuchtetechnisch einwandfrei funktionsfähig sind. Zusätzliche Erkenntnisse zu den Grenzen und Einsatzbedingungen der Dachaufbauten sowie Aussagen zur Dauerhaftigkeit wurden durch die umfangreichen hygrothermischen Simulationen (Parameterstudien) erzielt. Untersuchungen an bestehenden Gebäuden ergänzten die Messungen am Versuchsgebäude und die Parameterstudien.

Die acht am Versuchsstand untersuchten Varianten unterschieden sich in ihrer hygrischen Unbedenklichkeit erheblich. Wichtigste Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind:

Ein sorptiver Dämmstoff wie Zellulose ist in weitaus höherem Maße als z.B. Mineralwolle in der Lage, in der Kondensationsperiode anfallendes Tauwasser, aber auch Baufeuchte, zu speichern und verzögert in der Trocknungsperiode wieder abzugeben - was im Fall eines unbelüfteten Flachdachs relevant wird. Der sorptive Dämmstoff verhindert damit weitgehend die Bildung von (flüssigem) Kondensat in der kritischen Ebene der Konstruktion.

Eine feuchtevariable Dampfbremse bildet mit ihrer größeren Spreizung des Wasserdampfdiffusionswiderstands zwischen Trocken - und Feuchtebereich eine gegenüber der OSB-Platte eindeutig vorzuziehende Variante der inneren diffusionshemmenden Schicht. Die feuchtevariable Dampfbremse sorgt in jedem Fall für eine deutliche Entspannung der hygrischen Situation in der kritischen Ebene (Grenzbereich zwischen Dämmstoff und oberer Beplankung).

Bei den untersuchten Dachaufbauten verhielten sich folgende Aufbauten hygrisch unbedenklich:

- Variante 1.2
Schwarze PVC-Bahn - OSB-Platte - Zellulose - feuchtevariable Dampfbremse
- Variante 1.1
Schwarze PVC-Bahn - OSB-Platte - Zellulose - OSB-Platte
- Variante 3.2
Gründach - OSB-Platte - Zellulose - feuchtevariable Dampfbremse
- Variante 2.2
Schwarze PVC-Bahn - OSB-Platte - Mineralwolle - feuchtevariable Dampfbremse

Aus den Untersuchungen lassen sich für diese Konstruktionsaufbauten unter allen untersuchten Randbedingungen Verhältnisse ableiten, die denen der Nutzungsklasse 2 nach DIN 1052 entsprechen. Die aufgetretenen Holzfeuchten der Deckenbalken unterhalb des 20 %-Niveaus sowie der Holzwerkstoffplatten (OSB/3) unterhalb des 18 %-Niveaus verdeutlichen diese Ergebnisse nochmals und schließen den Befall von holzerstörenden Pilzen aus. Eine Zuordnung zur zukünftigen Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800 wäre möglich.

Einer detaillierten Untersuchung sind im Einzelfall zu unterziehen:

- Variante 2.1
Schwarze PVC-Bahn - OSB-Platte - Mineralwolle - OSB-Platte

Nicht empfohlen werden können folgende Varianten:

- Variante 3.1
Gründach - OSB-Platte - Zellulose - OSB-Platte
- Variante 4.1
Gründach - OSB-Platte - Mineralwolle - OSB-Platte
- Variante 4.2
Gründach - OSB-Platte - Mineralwolle - feuchtevariable Dampfbremse

Bei beiden Deckschichtvarianten, Schwarze PVC-Bahn und Gründach, stellte sich die Kombination aus oberer OSB-Platte, Zellulose-Dämmung und feuchtevariabler Dampfbremse als ideal heraus.

Beim Nachweis von unbelüfteten Flachdächern mittels hygrothermischer Simulationen ist zu beachten, dass solche Berechnungen immer auch Unsicherheiten in sich bergen. Dies liegt vor allem begründet in der teilweise mangelhaften Bereitstellung korrekter Materialkennwerte. Während für Dämmstoffe und Dampfbremsen die Bereitstellung der relevanten thermischen und hygrischen Kennwerte selbstverständlich ist, stehen diese bei OSB-Platten oft nicht zur Verfügung. Bei einer Verwendung von OSB-Platten in unbelüfteten Flachdächern ist daher seitens der OSB-Platten-Industrie auf eine konstante Qualität der Platten auch hinsichtlich der hygrischen Kennwerte zu achten. Im Idealfall werden diese zukünftig ebenso überwacht wie die mechanischen Eigenschaften.

Als Ergebnis der Parameterstudien können folgende Aussagen getroffen werden:

Beim Nachweis eines Einzelobjekts ist immer das Klima am endgültigen Standort heranzuziehen. Dabei sind Regenmengen und Relative Luftfeuchte keine entscheidenden Größen. Den größten Einfluss auf das hygrothermische Verhalten hat die Lufttemperatur in Verbindung mit der solaren Strahlung. Bei Auftreten von Verschattung durch z.B. Nachbargebäude ist diese mit zu berücksichtigen.

Die Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags als „Sicherheitszuschlag“ für mögliche Undichtigkeiten ist in jedem Fall sinnvoll.

Bei unbelüfteten Flachdächern wie im vorliegenden Fall ist immer eine schwarze PVC-Bahn einer grauen PVC-Bahn vorzuziehen. Die erhöhte absorbierte kurzwellige solare Strahlung sorgt für hygrische Entspannung im Dachaufbau mit erhöhtem Rücktrocknungsverhalten.

Einen noch größeren Einfluss hat die Wahl des Materials der Dachabdichtung: gegenüber einer Bitumenabdichtung oder anderen relativ dampfdichten Dachbahnen weist die verhältnismäßig dampfoffene Schwarze PVC-Bahn signifikante Vorteile hinsichtlich der hygrischen Unbedenklichkeit des Dachaufbaus auf.

Bei vorgesehener Überbauung eines unbelüfteten Flachdachs mit Bauteilen zur regenerativen Energienutzung, z.B. Solarthermie oder Photovoltaik, ist immer eine detaillierte Untersuchung notwendig. Die Überbauung hat entscheidenden Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion.

Eine mögliche Verschattung durch etwa Nachbargebäude hat bei einer funktionsfähigen Variante mit Gründach keinen entscheidenden Einfluss auf die hygrische Unbedenklichkeit einer Konstruktion, da das Substrat als thermischer Puffer wirkt.

In jedem Fall ist der Eintritt von Regen in die Dachkonstruktion sowie Leckagen in der Luftdichtungsebene zu verhindern. Keine der gezeigten Vorzugsvarianten ist in der Lage, Schäden in Folge von eintretendem Regenwasser oder mangelnder Luftdichtheit zu verhindern.

Bei den untersuchten Praxisbeispielen war im Fall eines Schadens immer ein unplanmäßiger Eintritt von Regenwasser oder Leckagen in der luftdichten Ebene Grund für den aufgetretenen Schaden. Anhand der Praxisbeispiele, welche teilweise schon fast 15 Jahre bestehen, konnte nachgewiesen werden, dass unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise - wenn korrekt ausgeführt - dauerhaft funktionsfähig sind. Grundvoraussetzung dafür sind vor allem eine Dachneigung zur Anführung von Niederschlagswasser und eine planmäßige luftdichte Ausführung der Konstruktion. Beim Nachweis eines Aufbaus ist die Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags von $250 \text{ g}/(\text{m}^2\text{Winter})$ dennoch sinnvoll.

Trotz dieser Vorgaben wird seitens der Autoren darauf hingewiesen, dass unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise einen hohen Anspruch voraussetzen und von der Planung bis zur Errichtung eine erhöhte Sorgfalt und Qualitätssicherung an den Tag zu legen ist.

Bei korrekter, luftdichter Ausführung, bei Wahl von geeigneten Materialien für Dämmstoff und raumseitiger diffusionshemmender Schicht und bei Beachtung grundsätzlicher einfacher Randbedingungen funktionieren sie jedoch hygrisch unbedenklich und bleiben - neben ihren Vorteilen wie hohe energetische Effizienz und Ästhetik – dauerhaft schadensfrei.

Detaillierte bauphysikalische Analysen sind im Einzelfall jedoch unerlässlich.

Auf der Grundlage der Ergebnisse sollten die bestehenden Simulationswerkzeuge weiterentwickelt und seitens der Hersteller für neue innovative Bauprodukte entsprechende hygrische und thermische Materialkennwerte zur Verfügung gestellt werden, um zukünftig noch genauere und objektspezifische Simulationsrechnungen zu ermöglichen.

Die Ergebnisse werden dem Normenausschuss DIN-NHM zur Neufassung der DIN 68800 zur Verfügung gestellt. Die Regelungen sollten in DIN 68800-2 aufgenommen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schulze H.: Holzbau Handbuch Reihe 3 Teil 5 Folge 2, Baulicher Holzschutz. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der DGfH 1997
- [2] Borsch-Laaks, R.; Köhnke, E.U; Schopach, H.; Wagner, G.; Winter, S.; Schmidt, D.: Flaches Dach, aber sicher! - Flachdach ohne belüftung mit Attika, Beitrag in "die neue quadriga - Fachzeitschrift für den Holzbau", Kastner Verlag, Wolznach 06/2004
- [3] Schmidt, D; Winter, S.: Flachdächer in Holzbauweise – Spezial; Informationsdienst Holz – HOLZABSATZFONDS; 10/2008
- [4] Roßbach, S.: Feuchteberechnung von Flachdächern in Holzbauweise“; Diplomarbeit an der Fachhochschule Biberach, Oktober 2007
- [5] DIN 18531: 2005-09: Dachabdichtung – Abdichtung für nicht genutzte Dächer, Teil 1 Begriffe, Anforderungen, Planungsgrundsätze; Teil 2 Stoffe; Beuth Verlag, Berlin
- [6] DIN 18195-5: 2000-09: Bauwerksabdichtungen: Teil 5: Abdichtungen gegen nichtdrückendes Wasser auf Deckenflächen und in Nassräumen, Bemessung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin
- [7] Borsch-Laaks, R.: Belüften oder lieber doch nicht?, Beitrag in "die neue quadriga - Fachzeitschrift für den Holzbau", Kastner Verlag, Wolznach 05/2004
- [8] Borsch-Laaks, R.: Alles Öko oder was?, Beitrag in "die neue quadriga - Fachzeitschrift für den Holzbau", Kastner Verlag, Wolznach 02/2004
- [9] ZVDH: Regeln des deutschen Dachdeckerhandwerks, Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks, Rudolf Müller Verlag
- [10] Liersch K.W.: Die Belüftung schuppenförmiger Bekleidungen – Einfluss auf die Dauerhaftigkeit, Aachner Bausachverständigentag 1993, Wiesbaden / Berlin 1993
- [11] Künzel, H.M.:Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?; IBP Mitteilung 355; Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart/Holzkirchen 1999
- [12] Künzel, H.M.; Sedlbauer,K :Reflektierende Flachdächer – sommerlicher Wärmeschutz kontra Feuchteschutz; IBP Mitteilung 482; Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart/Holzkirchen 2007
- [13] Künzel, H.M.: Einfluss der Deckschicht auf die Temperaturverhältnisse in Flachdächern; IBP Mitteilung 354; Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart/Holzkirchen 1999

- [14] Künzel, H.M.: Bedeutung von Klimabedingungen und Diffusionseigenschaften für die Feuchtesicherheit voll gedämmter Altbaudächer; Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Gertis. IRB-Verlag, Stuttgart 1998
- [15] Weber, H.; Blaser, Ch.; Fischer, J.; Wiederkehr, R.: Falchdachkonstruktionen im Holzbau, Technische Informationen der Lignum, Lignatec Ausgabe 15/2003, Eigenverlag Lignum, Zürich 2003
- [16] DIN EN 300: 2006-09: Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) – Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen, Beuth Verlag, Berlin
- [17] DIN EN 1995-1-1: 2008-09: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Beuth Verlag, Berlin
- [18] DIN 1052: 2008-12: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, Beuth Verlag, Berlin
- [19] DIN EN 13986: 2005-03: Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen: Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung, Beuth Verlag, Berlin
- [20] DIN EN 335-1: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten, Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall – Teil 1 Allgemeines, Beuth Verlag, Berlin
- [21] DIN EN 335-2: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten, Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall – Teil 2 Anwendung bei Vollholz, Beuth Verlag, Berlin
- [22] DIN EN 335-3: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten, Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall – Teil 3 Anwendung bei Holzwerkstoffen, Beuth Verlag, Berlin
- [23] DIN 68800-2: 2008-10: Holzschutz – Teil 2 vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, NA 042 Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM) NA 042-03-02 AA Arbeitsausschuss Baulicher Holzschutz
- [24] DIN EN 350-2: 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, Beuth Verlag, Berlin
- [25] DIN EN 460: Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Leitfaden für die Anforderung an die Dauerhaftigkeit von Holz und die Anwendung in den Gefährdungsklassen, Beuth Verlag, Berlin
- [26] DIN 4108-3: 2001-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung; Beuth Verlag, Berlin

- [27] DIN 68800-2: 1996-05: Holzschutz – Teil 2 vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Beuth Verlag, Berlin
- [28] DIN EN 15026: 2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Beuth Verlag, Berlin
- [29] Kollmann F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Band 1. Springer Verlag 1955
- [30] Sedlbauer K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Fakultät Bauingenieur und Vermessungswesen Universität Stuttgart 2001
- [31] Produktdatenblatt AGEPAN OSB/3 Verlegetafel Contiface EN 300/EN 13986, Glunz AG Meppen
- [32] Z-23.11-280: allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Isofloc Wärmedämmtechnik GmbH Lohfelden, Deutsches Institut für Bautechnik
- [33] Produktdatenblatt WOLFIN M Dach Dichtungsbahn; Henkel AG & Co. KGaA WOLFIN Bautechnik Deutschland; 05/2008
- [34] Produktdatenblatt INTELLO ® , Moll bauökologische Produkte GmbH, 04/2007
- [35] Produktdatenblatt Integra ZKF 1-040 Zwischensparrendämmung, Saint-Gobain Isover G+H AG
- [36] Produktdatenblatt Optigrün
- [37] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) 2008: WUFI 4.2. Software zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen. <http://www.wufi.de>
- [38] Grunewald J., Nicolai A., Fechner H. 2008: Delphin 4, Delphin 5. Numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport in kapillarporösen Baustoffen. <http://www.bauklimatik-dresden.de>
- [39] Deutscher Wetterdienst 2004: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Eigenverlag DWD. Offenbach am Main. Publikation 100 S. und Daten-CD.
- [40] Finkenstein C., Petzold H., Häupl P. and Bhattacharjee 2006: Solar radiation measurements and modelling at the Humayun's Tomb, New Delhi. Structural analysis of historical constructions Conference, New Delhi
- [41] Finkenstein C., Häupl P. 2007: Atmospheric longwave radiation being a climatic boundary condition in hygrothermal building part simulation. Tagungsband zum 12. Bauklimatischen Symposium März 2007 Dresden. Hrsg.: Institut für Bauklimatik, TU Dresden
- [42] WTA 2006: Merkblatt 6-2-01/D - Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag.

Anhang



Abb. A - 1 sogenannte Sonderkonstruktionen bei Flachdächern (linke Seite: keine planmäßige Dachneigung mit Wassersackbildung; rechte Seite Gründachaufbau mit wasserspeicherndem Substrat)

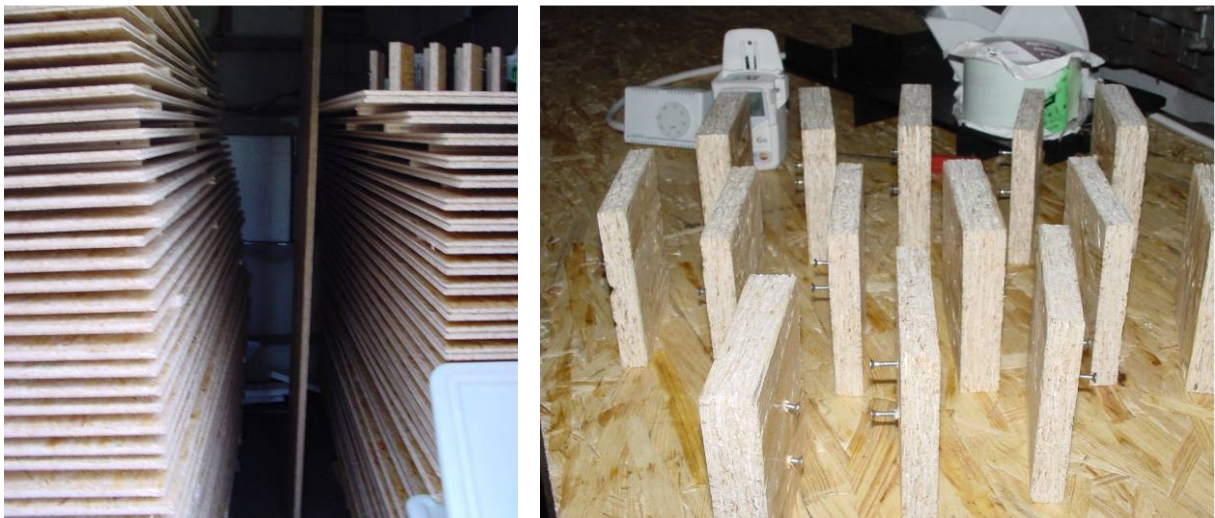


Abb. A - 2 Klimatisierung der eingesetzten OSB-Platten

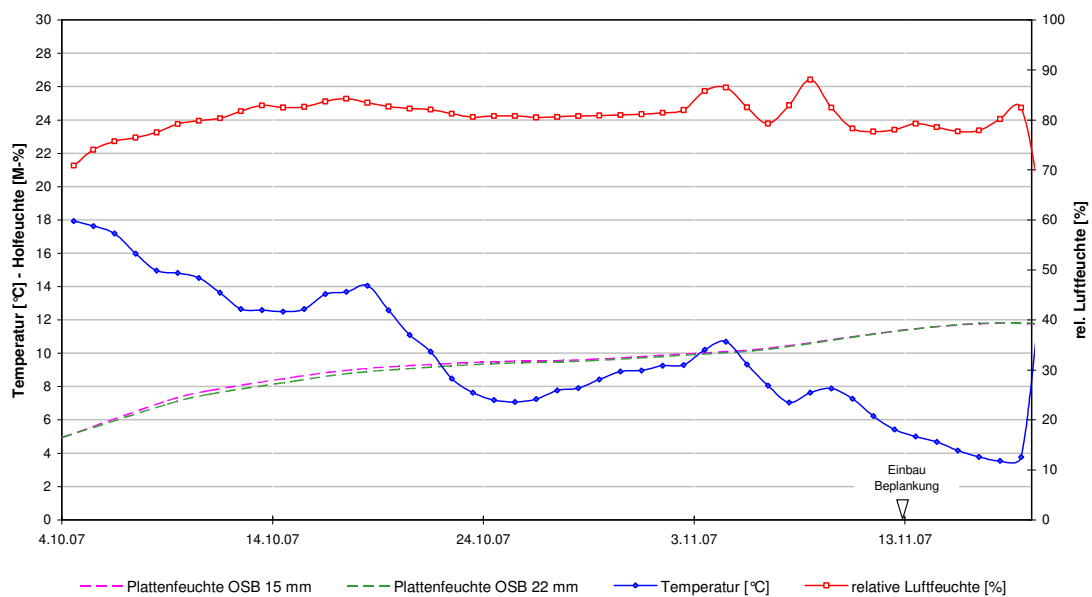


Abb. A - 3 Klimatisierung der eingesetzten OSB-Platten, Verlauf der Plattenfeuchten und Klimabedingungen



Abb. A - 4 Erstellung des
Flachdachaufbaus

Einhausung des Versuchs-
standes zur Erstellung des
Dachaufbaus November 2007



Verlegung der oberseitigen
Beplankung aus OSB/3-Platten



Verlegung der Dachabdichtung



Aufgebrachte Deckschichten



raumseitig diffusionshemmende
Schichten
(feuchtevariable Dampfbremse
und OSB/3-Platte)



Einbringen der
Zellulosedämmung



Abb. A - 5 Messtechnik

Einbau der Datenlogger für Temperatur und Rel. Luftfeuchte sowie der Holzfeuchtemessstellen in den Gefachbereichen



Messbereich innerhalb der Gefache



Messgerät zur Erfassung der Temperaturen und Relativen Luftfeuchten in der Kies- und Substratdeckschicht

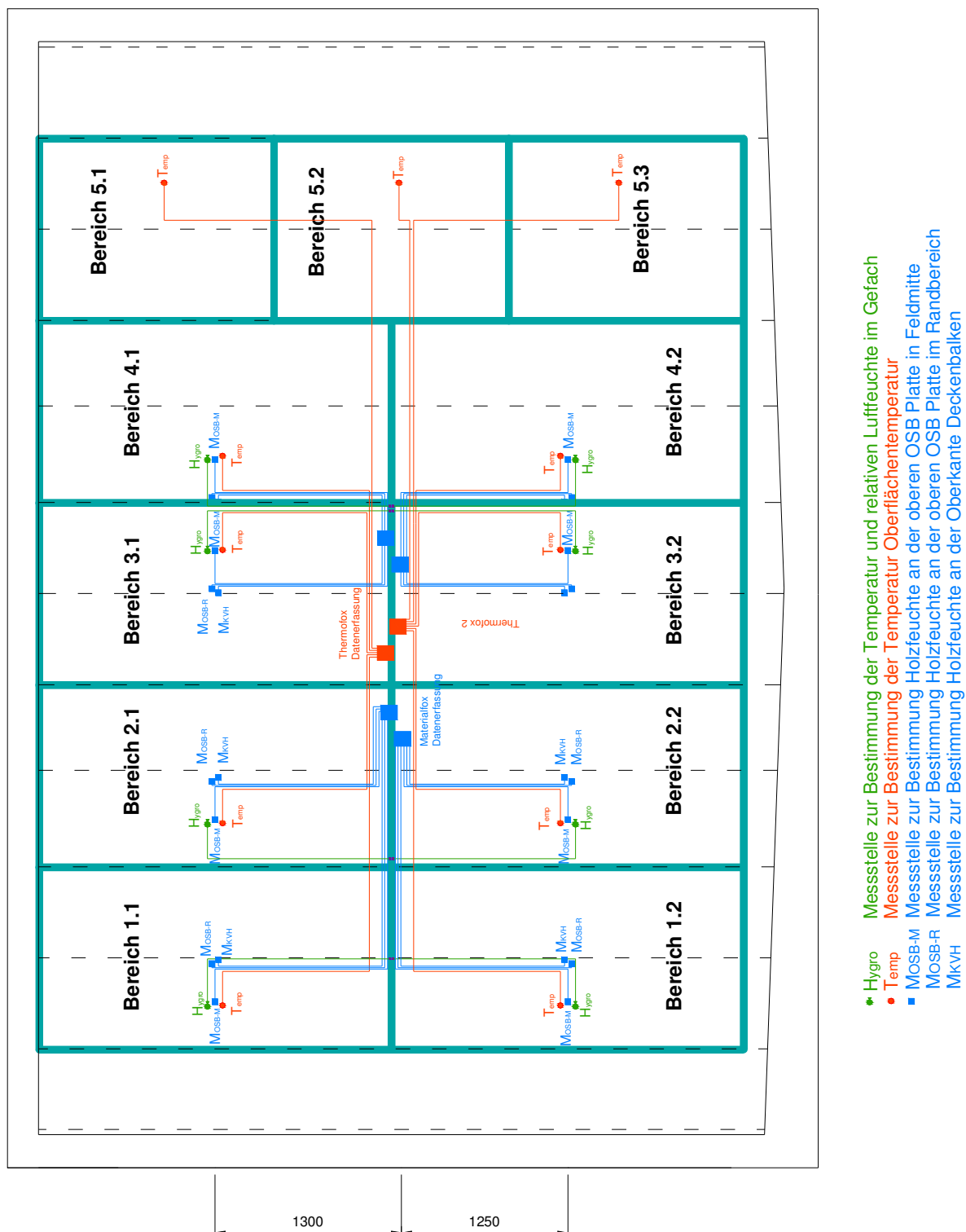


Abb. A - 6 Messstellenplan