

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Klaus Peter Sedibauer

IBP-Bericht HTB-29k/2015

2. Hygrothermische Beurteilung einer Dachkonstruktion mit Regeneintrag durch Nageldurchdringungen in die Dachsparren

Durchgeführt im Auftrag:

Firma Würth GmbH

Der Bericht umfasst 12 Seiten Text 2 Tabellen 11 Bilder

Valley, 15. Okt. 2015

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet

Eruppenleiter

Dipl.-Ing.

Daniel Zirkelbach

Bearbeiter

M. Eng.

Philipp Kölsch

Problemstellung 1

Laboruntersuchengen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Stuttgart haben ergeben, dass Nageldurchdringungen an Dachkonstruktionen bei Beregnung keine vollkommene Dichtheit gegen eindringendes Regenwasser aufweisen.

Die vorliegenden hygrothermischen Untersuchungen bewerten das Austrocknungsverhalten von Standardkonstruktionen, bei denen Regenwasser aufgrund von Undichtigkeiten an Nageldurchdringungen während einer Freibewitterungszeit (vor Eindeckung des Dachs) in die Konstruktion eingedrungen ist.

Für die eingetragene Feuchtemenge werden die in den Prüfberichten P6-186/2015 [1] und P6-187/2015 [2] des Fraunhofer IBP in Stuttgart angegebenen Mengen verwendet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen soll die nachfolgend beschriebene Standardkonstruktion bezüglich der hygrothermischen Gebrauchstauglichkeit bewertet werden.

2 Durchgeführte Untersuchungen

Die Untersuchungen werden mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [3] durchgeführt. Das Programm WUFI® entspricht den Anforderungen des WTA-Merkblatts 6-2 [4] sowie der europäischen Norm DIN EN 15026 [5] für hygrothermische Simulationen.

Für die Berechnungen wird ein zweidimensionaler Schnitt durch die Standard-Dachkonstruktion betrachtet. Die Konstruktion ist von außen nach innen wie folgt aufgebaut:

- Rote Ziegeleindeckung (Einbau nach der Freibewitterungsphase)
- Dachlattung bzw. Hinterlüftungsschicht

30 mm

Konterlattung bzw. Hinterlüftungsschicht

- 30 mm
- Unterdeck- Unterspannbahn WÜTOP® THERMO ND Plus
- Mineralwolldämmung WLG 035 bzw. Holzsparren

200 mm

Dampfbremse WÜTOP® DB2

Die Kennwerte der eingesetzten Materialien werden entsprechend der WUFI®-Materialdatenbank verwendet, sofern sie nicht vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden. Der für die Simulation modellierte Aufbau ist in Bild 1 dargestellt.

Für die Simulation wird ein zweidimensionaler Schnitt durch den für den Feuchteeintrag relevanten Querschnitt des Dachaufbaus betrachtet. Dieser liegt bei

der vorliegenden Konstruktion im Bereich des Sparrens mit einer Breite von 80 mm und einer Höhe von 200 mm in der Mitte der Konstruktion. Den Berechnungen wird eine Gefachbreite von 800 mm zu Grunde gelegt. Aus Symmetriegründen wird jeweils die Hälfte des Gefachbereichs mit einer Breite von 400 mm seitlich neben dem Sparren angeordnet (vgl. Bild 1).

Die Steildachkonstruktion wird mit einer Neigung von 45° angenommen und ist nach Norden orientiert. Dies stellt auf Grund des geringen Strahlungseintrags und den damit verbundenen niedrigen Oberflächentemperaturen den kritischsten Fall bezüglich des Austrocknungsverhaltens dar.

An der Außenseite werden stündliche Klimadaten des Standorts Holzkirchen verwendet; dieser ist durch seine Lage auf einer Hochebene vor den Alpen kritisch repräsentativ für Standorte bis in vergleichbare Höhen von etwa 700 m ü. NN. Die Messdaten des IBP enthalten auch die für die Berechnung benötigten Strahlungsdaten. Der Klimadaten von Holzkirchen liegen z.B. auch den Glaser Randbedingungen zu Grunde.

Die Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte der Außenluft sind in Bild 2 dargestellt. Das Innenklima wurde von dem verwendeten Klimadatensatz des Außenklimas nach DIN EN 15026 [5] für Wohnraumverhältnisse mit normaler Belegung abgeleitet. Die Verläufe der Temperatur und relativen Feuchte des Innenklimas sind in Bild 3 dargestellt.

Entsprechend Erfahrungswerten des IBP aus zahlreichen Freiland- und Objektuntersuchungen wird an der Außenseite ein pauschaler Wärmeübergangskoeffizient von 19 W/m²K angesetzt – die in der Norm vorgeschlagenen 25 W/m²K entsprechen einer mittleren Windgeschwindigkeit von über 6 m/s, was deutlich über dem Mittelwert für Deutschland mit 3,5 m/s und damit zu weit auf der sicheren Seite liegt. Die 19 W/m²K enthalten einen konvektiven Anteil von 12,5 W/m²K, welcher bei der Verwendung der effektiven Strahlungsbilanz zur Anwendung kommt, während der strahlungsbedingte Anteil explizit berechnet wird. Auf der Raumseite wird der übliche Wert für den Übergangskoeffizient von 8 W/m²K angenommen (z.B. [7], [10]).

2.1 Bauteilsimulation während der Freibewitterungsphase

Für die Bauteilsimulation während der Freibewitterungsphase wird die Konstruktion ohne eine Eindeckung betrachtet. Dazu werden der Berechnung die Strahlungsparameter der dunklen Unterdachbahn zu Grunde gelegt. Die kurzwellige Absorptionszahl der Unterdachbahn wird mit a=0,85 und die langwellige Emissionszahl mit $\epsilon=0,79$ zum Ansatz gebracht [8].

Um eine erhöhte Einbaufeuchte des Sparrens und somit einen kritischen Fall zu simulieren, wird die Anfangsfeuchte mit 18 M-% angenommen. Als Anfangsfeuchte für die anderen verwendeten Materialen wird die Ausgleichsfeuchte bei 80 % r.F. angesetzt. Damit weisen die Materialien eine etwas höhere Feuchte

auf, als in der Regel im Einbauzustand vorliegt. Die Annahme liegt somit leicht auf der sicheren Seite

Die Berechnungen der Freibewitterungszeit beginnen im Oktober und werden jeweils über einen Zeitraum von drei Monaten durchgeführt. Die Parameter für die Simulationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.2 Feuchteeintrag während der Freibewitterungsphase

Die vergleichenden Laboruntersuchengen des Fraunhofer IBP in Stuttgart haben gezeigt, dass weder Nageldurchdringungen ohne noch mit Nageldichtband einen hundertprozentigen Schutz gegen das Eindringen von Regenwasser bieten. Den Betrachtungen des Feuchteeintrags liegen die Ergebnisse der folgenden Prüfberichte des Fraunhofer IBP in Stuttgart zu Grunde:

- Prüfbericht P6-186/2015: Ermittlung der Schlagregendichtheit eines Dachelements mit der Unterspannbahn "WÜTOP® Thermo ND Plus"[1]
- Prüfbericht P6-187/2015: Ermittlung der Schlagregendichtheit eines Dachelements mit Unterspannbahn "WÜTOP® Thermo ND Plus" und dem Nageldichtband "Eurasol® PE"[2]

Auf Grundlage der beiden Prüfberichte sollen die Konstruktionen mit und ohne Nageldichtband unter der Konterlattung betrachtet werden. In den Laboruntersuchungen wurde für beide Aufbauten eine Freibewitterung simuliert. Hierzu wurden die Konstruktionen mit ca. 2 l/m²min. beregnet und stufenweise der Druck von 0 bis 600 Pa erhöht.

Während des Prüfzyklus von 3 Stunden konnten an den Testkonstruktionen von jeweils 3,2 m² folgende Feuchteeinträge festgestellt werden:

- Variante 1 (mit Nageldichtband): 10,2 g
- Variante 2 (ohne Nageldichtband): 20,1 g

Während des dreistündigen Prüfzyklus wurde auf die Testkonstruktionen eine Wassermenge von 360 l/m² aufgebracht. Der Vergleich der Wassermenge die während der Laborversuche aufgebracht wurde mit der Jahresniederschlagssumme des Feuchtereferenzjahr in Holzkirchen (1185 mm / m² Jahr) zeigt, dass während der dreistündigen Prüfung ca. 1/3 des Jahresniederschlages aufgebracht wurde.

Die Prüfung erfolgte stufenweise bis zu Drücken von 600 Pa. Derart hohe Drücke treten in Verbindung mit starkem Niederschlag in der Realität recht selten an Gebäuden auf. Untersuchungen an einem 30 m hohen Gebäude, an der stark schlagregenbeanspruchten belgischen Küste, haben gezeigt, dass dies im Durchschnitt nur etwa einmal in 10 Jahren vorkommt [15]. Somit liegt der Ansatz der Feuchteeinträge aus den Laborversuchen weit auf der sicheren Seite.

Für die hygrothermische Simulation wird eine Freibewitterungszeit von 3 Monaten zu Grunde gelegt und davon ausgegangen, dass es in der Realität möglich ist in diesem Zeitraum die Eindeckung des Daches fertig zu stellen. Um eine möglichst kritische Situation bewerten zu können, wird angenommen, dass innerhalb dieser drei Monate täglich ein Regenereignis stattfindet und in den drei Monaten der gesamte Jahresniederschlag auf das Unterdach fällt.

Um auch lokal den kritischsten Fall abzubilden, wird davon ausgegangen, dass die Wassermengen, die durch die 3,2 m² großen Testkonstruktionen eingedrungen sind, vollständig auf einen Sparren mit einer Länge von 2 m konzentriert werden.

Pro laufenden Sparrenmeter ergeben sich dadurch folgende Feuchteeinträge die durch den Jahresniederschlag eingebracht werden:

- •Variante 1 (mit Nageldichtband): 15,30 g/m a
- •Variante 2 (ohne Nageldichtband): 30,15 g/m a

Umgerechnet auf das einstündige Regenereignis pro Tag ergeben sich folgende Feuchtequellen die für die zweidimensionale hygrothermische Simulation über die 12-wöchige Freibewitterung Verwendung finden:

- •Variante 1 (mit Nageldichtband): 4,72 · 10⁻⁸ kg/m s
- •Variante 2 (ohne Nageldichtband): 9,30 · 10⁻⁸ kg/m s

Diese Wassermengen werden im Zeitraum von Anfang Oktober bis Ende Dezember jeweils zwischen 18 Uhr und 19 Uhr eines jeden Tages in den Sparren der Konstruktion eingebracht. Der Zeitraum sowie die Uhrzeit der Einbringung stellen wiederum den kritischsten anzunehmenden Fall dar, da in dieser Zeit mit den geringsten solaren Strahlungswerten und somit mit den niedrigsten Oberflächentemperaturen und dem geringsten Rücktrocknungspotential zu rechnen ist.

Wie aus den IBP Berichten aus Stuttgart hervorgeht, finden die Feuchteeinträge hauptsächlich an den Nagelstellen der Lattung statt. Aus diesem Grund werden die Feuchtemengen bei der hygrothermischen Simulation direkt in die darunter befindlichen Sparren eingebracht.

Wie Untersuchungen des Fraunhofer IBP in Holzkirchen zeigen, findet eine oberflächliche Wasseraufnahme des Sparrens quer zur Faserrichtung nur in geringem Maß statt. Bei einer Nagelstelle im Sparren dringt das Wasser seitlich entlang des Nagels bis zu dessen Ende in das Holz ein. In Bild 4 ist der Schnitt durch eine Nagelstelle in einem Sparren nach viertägiger Wasserexposition dargestellt. Anhand dieser Erkenntnisse wird für die hygrothermische Simulation eine Feuchtequelle mit einer Breite von 8 mm und einer Länge von 50 mm (an-

genommene Nageleindringtiefe) in der Mitte des Sparren platziert. Die Platzierung der Feuchtequelle in der Konstruktion ist in Bild 5 dargestellt.

2.3 Bauteilsimulation während der Trocknungsphase

Um das Verhalten der Eindeckung während der Trocknungsphase realistisch abbilden zu können, werden für die Berechnung effektive Übergangssparameter einer roten Eindeckung mit einer Hinterlüftungsebene verwendet. Die Eindeckung und die belüftete Schicht wird hierbei nicht explizit im Dachaufbau nachgebildet, sondern lediglich der kurzwellig Absorptionsgrad und der effektive konvektive Wärmeübergangskoeffizient in der Weise angepasst, dass die Oberflächentemperatur auf dem Unterdach der einer hinterlüfteten Eindeckung entspricht.

Für die Simulation werden hierzu effektive Parameter verwendet, die die kälteste Stelle einer "normal" belüfteten Eindeckung repräsentieren. Diese Stelle befindet sich bei einem Dach in der Nähe der Belüftungsöffnungen an der Traufe und stellt für die hygrothermische Simulation auf Grund der geringen Oberflächentemperaturen und dem geringsten Rücktrocknungspotential den kritischen Fall dar.

Die verwendete rote Eindeckung besitzt eine kurzwellige Absorptionszahl von a=0,76 und eine langwellige Emissionszahl von ϵ =0,90. Dies sind die typischen Strahlungskennwerte von roten Betondachsteinen wie sie am Fraunhofer IBP in Holzkirchen ermittelt wurden [8] [9]. Mit der Verwendung der effektiven Übergangsparameter für eine hinterlüftete Eindeckung ergibt sich die effektive kurzwellige Absorptionszahl mit dem Reduktionsfaktor von 0,7 zu:

$$a_e = a \cdot 0.70 = 0.76 \cdot 0.70 = 0.53$$

Die langwellige Emissionszahl bleibt mit ϵ =0,90 unverändert. Der effektive konvektive Wärmeübergangskoeffizient beträgt 19 [W/m²K] [9].

Die Simulation beginnt mit dem zweidimensionalen Temperatur- und Feuchtefeld der Konstruktion, wie es sich aus der Simulation der Freibewitterungszeit ergeben hat. Die Berechnung startet am 1. Januar und wird für einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt. Die Parameter für die Simulationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.4 Berücksichtigung der Infiltration während der Trocknungsphase

Holzbaukonstruktionen, wie auch die hier untersuchte Dachkonstruktion, sind nie vollständig luftdicht, was bei Druckdifferenzen eine geringfügige Durchströmung der Hülle bedingt. Diese Durchströmungen sind mit einem zusätzlichen Feuchteeintrag verbunden, der nach [14] bei der feuchtetechnischen Bemessung berücksichtigt werden muss. Hier erfolgt dies durch das Infiltrationsmodel des IBP.

Dazu wird eine Feuchtequelle in den äußeren 20 mm der Mineralfaserdämmung platziert. Die Position der Infiltrationsquelle ist in Bild 6 dargestellt. Im Fall von Feuchteeintrag durch Infiltration ist bei kalten Bedingungen an der Außenseite mit Kondensation an dieser Position zu rechnen. Für die Befeuchtungsmenge wird der Volumenstrom q₅₀ durch die Gebäudehülle bei einer Druckdifferenz von 50 Pa herangezogen. Dieser Wert kann aus einer Gebäudeluftdichtheitsmessung (Blower-Door-Test) abgeleitet werden. Da für das fiktive Gebäude keine Luftdichtheitsmessungen vorliegen, wird für das Infiltrationsmodell ein q₅₀-Wert von 3,0 m³/m²h angesetzt. Dieser Wert entspricht der Luftdichtheitsklasse B des IBP-Infiltrationsmodells und wird, wie Untersuchungen aus dem Jahr 1996 gezeigt haben, im Neubau in der Regel erfüllt [12].

Als Höhe des für den thermischen Auftrieb maßgeblichen, zusammenhängenden Luftraums wird eine Höhe von 10 m, was in etwa der Höhe eines dreistöckigen Gebäudes entspricht, angesetzt.

Da die Berücksichtigung des konvektiven Feuchteeintrags durch Infiltration in der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation zurzeit noch nicht möglich ist, wurde für den Regelquerschnitt der untersuchten Konstruktion eine eindimensionale Simulation in WUFI® PRO mit Infiltrationsquelle durchgeführt. Die konvektiven Feuchteeinträge der eindimensionalen Simulation wurden danach als Feuchtequelle auch für die zweidimensionale Simulation herangezogen.

3 Ergebnisse

Zur Beurteilung der Konstruktion wird zunächst das Feuchteprofil über den zweidimensionalen Querschnitt am Ende des Berechnungszeitraums der Freibewitterung betrachtet. Die entsprechenden Profile sind in Bild 7 für die Berechnungsvariante mit Nageldichtband und in Bild 8 für die Variante ohne Nageldichtband dargestellt. Die X- und Y-Achse stellen den zweidimensionalen Schnitt durch die Konstruktion dar, auf der Z-Achse ist der Wassergehalt zum Berechnungszeitpunkt in kg/m³ aufgetragen. Der mittlere Teil der Grafiken mit dem erhöhten Wassergehalt stellt den Sparren dar; seitlich davon sind die mit Mineralwolle gefüllten Gefache ersichtlich.

Der Anfangswassergehalt im Sparren beträgt 18 M-% bzw. 81,9 kg/m³. Bei beiden Berechnungsvarianten ist erkennbar, dass die erhöhte Anfangsfeuchte in der Zeit der Freibewitterung in die Gefache und in Richtung Innenraum abnimmt. Im Bereich der Nageleindringung steigt der Wassergehalt der Variante mit Nageldichtband in der Spitze auf ca. 90-95 Kg/m³ (19,8 – 20,9 M-%) an, während die Variante ohne Nageldichtband einen Spitzenwert von 104 Kg/m³ (22,8 M-%) erreicht. Anhand der beiden Grafiken ist ersichtlich, dass die Unterschiede im kritischen Bereich der Nageleindringung mit maximal 3 M-% eher gering sind.

Zur weiteren Beurteilung wird der Wassergehalt im kompletten Sparrenquerschnitt über den gesamten Berechnungszeitraum herangezogen. In Bild 9 ist der Wassergehalt des Sparrens in M-% über den Berechnungszeitraum von 5 Jahren und 3 Monaten dargestellt. Die Zeit der Freibewitterung am Anfang des Berechnungszeitraums ist grau hinterlegt. Die Berechnungsvariante mit Nageldichtband ist als rote gestrichelte Linie dargestellt, die Variante ohne Nageldichtband als blaue Linie. Wie die Grafik zeigt, sind über den gesamten Betrachtungszeitraum kaum Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsvarianten erkennbar.

Es ist bei beiden Varianten ersichtlich, dass der Gesamtwassergehalt im Sparren von den anfänglichen 18 M-% bereits während der Freibewitterungszeit auf einen Wert von ca. 16 M-% austrocknet. Dies lässt den Schluss zu, dass die, durch die Nageleindringungen, eingetragene Feuchtemengen zu keiner Steigerung des Wassergehaltes im gesamten Sparren beiträgt, da die austrocknende Einbaufeuchte mengenmäßig den Regeneintrag übersteigt. Im weiteren Verlauf trocknet der Gesamtwassergehalt des Sparrens von den anfänglichen 18 M-% innerhalb von ca. 1,5 Jahren auf ein Niveau um 11 M-% bei immer noch leicht fallender Tendenz aus. Der Wassergehalt im Sparren schwankt im Jahresverlauf zwischen ca. 10,5 und 12 M.-% was weit unterhalb des Bereiches liegt in dem mit einer Holzschädigung zu rechnen ist.

Abschließend wird der kritische Bereich der Nageleindringung betrachtet. Der untersuchte Bereich ist identisch mit dem Bereich der Feuchtequelle während der Freibewitterungszeit (Vgl. Bild 5) und stellt somit lediglich jenen kleinen Ausschnitt des Sparrens dar, in dem die höchsten Feuchtegehalte zu erwarten sind. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind über einen Zeitraum von 5 Jahren und 3 Monaten in Bild 10 dargestellt. Die Zeit der Freibewitterung am Anfang des Berechnungszeitraums ist wieder grau hinterlegt. Die Berechnungsvariante mit Nageldichtband ist rot gestrichelt, die Variante ohne Nageldichtband als blaue Linie dargestellt. In den drei Monaten der simulierten Freibewitterung steigt der Wassergehalt im kritischen Bereich der Variante ohne Nageldichtband auf 22,8 M.-% und bei der Variante mit Nageldichtband auf 20,5 M.-% an. Damit ergibt sich ein Unterschied von 2,3 M -% zwischen den beiden Varianten.

Die berechneten Holzfeuchten im betrachteten Bereich liegen somit bei beiden Varianten oberhalb des Grenzwertes der DIN 68800-2 [14] von 20 M.-%. Die DIN 68800-2 schreibt für ein Überschreiten des Grenzwertes während der Bauphase eine Austrocknungszeit von drei Monaten vor. Somit liegt die Rücktrocknungszeit der Variante ohne Nageldichtband mit ca. 5 Monaten über der in der Norm angegebenen Zeitspanne. Aus der Norm geht jedoch nicht hervor, ob sich der genannte Grenzwert sowie die Austrocknungsdauer auf den gesamten Holzquerschnitt oder auch auf einzelne kritische Bereiche davon beziehen. Weiterhin vernachlässigt der Grenzwert der DIN 68800-2 die Korrelation der Holzfeuchte mit der Temperatur.

Neuere Untersuchungen in [16] zeigen allerdings, dass holzzerstörende Vorgänge sehr stark von den auftretenden Temperaturen abhängen. Bei niedrigen Temperaturen sind deutlich höhere Holzfeuchten als 20 M.-% möglich, ohne

dass ein Abbau von Holz stattfindet. Im neuen WTA-Merkblatt E 6-8 D zur hygrothermischen Beurteilung von Holzkonstruktionen [17] werden dementsprechend für die hygrothermische Bemessung umgerechnet auf die Holzfeuchte des hier verwenden Materials maximal etwa 26 M-% bei 0 °C und ca. 20 M-% bei 30 °C gefordert. In Bild 11 ist für die Variante ohne Nageldichtband (leicht höherer Wassergehalt) die Holzfeuchte des kritischen Bereichs der Nageleindringung über die gleichzeitig auftretende Temperatur in °C aufgetragen. Die oben genannten Grenzwerte sind als rote Linie dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die korrelierenden Punkte zwischen Temperatur und Holzfeuchte zu keinem Zeitpunkt oberhalb der Grenzwertkurve liegen.

Obwohl beide Varianten nach DIN 68800-2 [14] im kritischen Bereich der Nageleindringung den Grenzwert kurzzeitig überschreiten würden, liegen die Feuchtegehalte in Verbindung mit der Temperatur nicht in einem Bereich, in dem eine Holzschädigung möglich ist. Hierbei spielt es auch keine Rolle, wie lange diese Bedingungen vorherrschen bzw. wie lange die Austrocknung dauert, da zu keinem Zeitpunkt ein Zustand erreicht wird, der zu Holzschädigung führen kann. Weiterhin hat die Simulation gezeigt, dass höhere Holzfeuchten im kritischen Bereich nur über einen kurzen Zeitraum auftreten und die Konstruktion nach der Freibewitterungsphase zuverlässig austrocknet.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Unterschiede der Holzfeuchte durch den eingetragenen Niederschlag an den Nageleindringungen mit und ohne Nageldichtband nur gering sind. Bei der Variante ohne Nageldichtband stellt sich nach der Freibewitterungszeit im kritischen Bereich um den Nagel ein maximaler Wassergehalt von 22,8 M.-% und bei der Variante mit Nageldichtband von 20,5 M.-% ein. Bei beiden Varianten trocknet die zusätzlich eingebrachte Feuchte innerhalb von 2 bzw. 5 Monaten wieder aus. Bei Betrachtung nur des kritischsten Bereichs im Holz direkt um die Nagelung würde zwar temporär der temperaturunabhängige Sicherheitsbereich nach DIN 68800-2 [14] überschritten, Bedingungen bei denen Holzfäule möglich ist, werden aber zu keinem Zeitpunkt erreicht. Die diesbezüglichen temperaturabhängigen Bemessungskriterien des neuen WTA-Merkblatts E 6-8/D 2015 [17] werden problemlos eingehalten. Der der zusätzliche Feuchteeintrag wirkt sich auch nicht auf den gesamten Sparrenguerschnitt aus, so dass dessen Austrocknung bezogen auf den Gesamtwassergehalt sogar schon während der Freibewitterungsphase beginnt.

Die hier dargestellten Ergebnisse gelten für die verwendeten Randbedingungen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Simulation mit diesen, wie bereits erläutert möglichst kritisch gewählten Randbedingungen für die Klimaverhältnissen in Deutschland ein Worst-Case-Szenario darstellt. Fachgerecht verarbeitet können demnach beide untersuchten Konstruktionen über einen Zeitraum von drei Monaten einer Freibewitterung ausgesetzt werden, ohne dass eine Holzschädigung der darunterliegenden Sparren eintritt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Prüfbericht P6-186/2015: Ermittlung der Schlagregendichtheit eines Dachelements mit der Unterspannbahn "WÜTOP® Thermo ND Plus". Stuttgart 2015. Fraunhofer IBP.
- [2] Prüfbericht P6-187/2015:Ermittlung der Schlagregendichtheit eines Dachelements mit Unterspannbahn "WÜTOP® Thermo ND Plus" und dem Nageldichtband "Eurasol® PE". Stuttgart 2015. Fraunhofer IBP.
- [3] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [4] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.
- [5] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007, Beuth Verlag, Berlin
- Zirkelbach, D.; Schafaczek, B.: Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2863, Fraunhofer-Institut für Bauphysik -IBP-, Holzkirchen, Fraunhofer IRB Verlag 2013, ISBN 978-3-8167-9018-1
- [7] DIN EN ISO 6946: Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007), April 2008, Beuth Verlag, Berlin
- [8] Kölsch, P.: Einfluss von be- bzw. hinterlüfteten Dächern auf das Oberflächenklima der Unterkonstruktion. MA Hochschule Augsburg, September 2013.
- [9] Kölsch, P.: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern, Fraunhofer IBP, Holzkirchen. Online verfügbar: http://wufi.de/de/service/downloads/hygrothermische-simulation-von-hinterluefteten-steildaechern-mit-effektiven-uebergangsparametern/
- [10] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Juli 2001.

- [11] Zirkelbach, D., Künzel, H.M., Schafaczek, B., Borsch-Laaks, R.: Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. 4th Intern. Symposium on Building and Ductwork Air tightness. October 1-2, 2009, Berlin/Germany.
- [12] Hauser, G.; Geißler, A.: Untersuchung der Luftdichtheit von Holzhäusern. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 9579, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel (März 1996).
- DIN EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauele-[13] menten – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, Mai 2013, Beuth Verlag, Berlin
- [14] DIN 68800-2 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Februar 2012.
- Van Den Bossche, N.; Lacasse, M.A.; Janssens, A.: Boundary Conditions for Water Tight-[15] ness Testing Based on Pareto-Front Analysis. Building Enclosure Science & Technology (BEST). Atlanta. April 2012.
- [16] Kehl, D. Feuchtetechnische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA; Hygrothermische Auswertung der anderen Art. In: Holzbau Quadriga 06.2013 S. 24-28
- WTA Merkblatt E 6-8/D 2015: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen Verein-[17] fachte Nachweise und Simulation

Anhang

A.1 Tabellen

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulation der Dachkonstruktion während der Freibewitterungsphase

Außenoberfläche		
Außenklima	Holzkirchen	
Neigung	45 °	
Orientierung	-	
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient außen	12.5 W/m²K	
Kurzwellige Absorptionszahl	0,85	
Langwellige Emissionszahl	0,79	
Explizite Strahlungsbilanz	verwendet	
Innenoberfläche		
Temperatur Innenklima	Nach EN 15026 abgeleitet vom	
Relative Feuchte Innenklima	Außenklima	
Übergangskoeffizient innen	8 W/m²K	
Sonstiges		
Infiltrationsquelle IBP	Ohne Infiltration	
Anfangsbedingungen	Ausgleichsfeuchte bei 80 % RF Holzfeuchte bei 18 M-%	
Berechnungszeitraum	3 Monate	
Berechnungsbeginn	1. Oktober	

Tabelle 2: Randbedingungen für die Simulation der Dachkonstruktion während der Austrocknungsphase mit Eindeckung

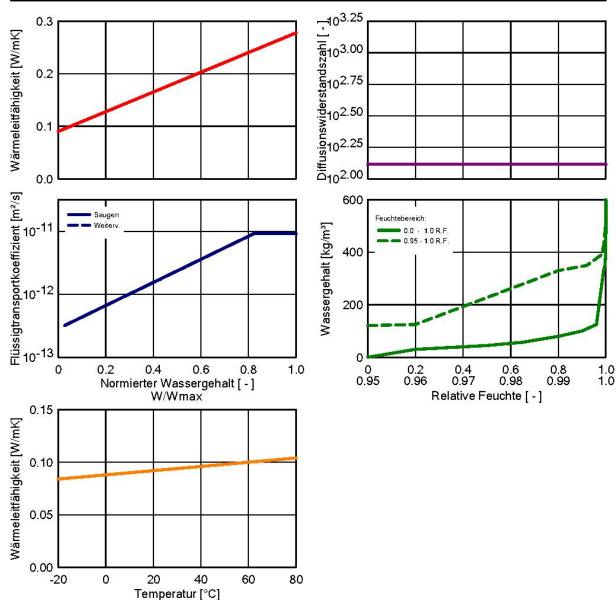
Außenoberfläche		
Außenklima	Holzkirchen	
Neigung	45°°	
Orientierung	Nord	
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient außen	19 W/m²K	
Kurzwellige Absorptionszahl	0,53	
Langwellige Emissionszahl	0,90	
Explizite Strahlungsbilanz	verwendet	
Innenoberfläche		
Temperatur Innenklima	Nach EN 15026 abgeleitet vom	
Relative Feuchte Innenklima	Außenklima	
Übergangskoeffizient innen	8 W/m²K	
Sonstiges		
Infiltrationsquelle IBP	LDK B ($Q_{50} = 3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$) Höhe Luftsäule 10 m Mechanischer Überdruck 0 Pa	
Anfangsbedingungen	Ausgleichsfeuchte bei 80 % RF	
Berechnungszeitraum	5 Jahre	
Berechnungsbeginn	1. Januar	

A.2 Materialdaten

Material: Fichte radial

Zusammenstellung der Rechengrößen

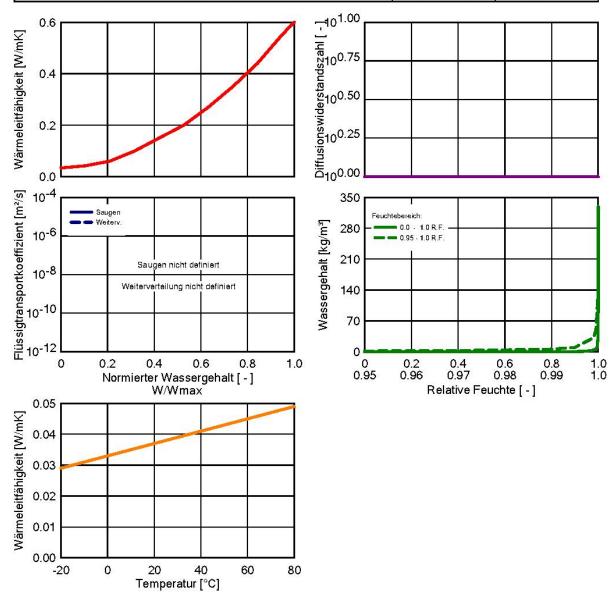
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	455,0
Porosität	[m³/m³]	0,73
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,09
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	130,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M%]	1,3
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material: ISOVER GW Integra ZKF - 035

Zusammenstellung der Rechengrößen

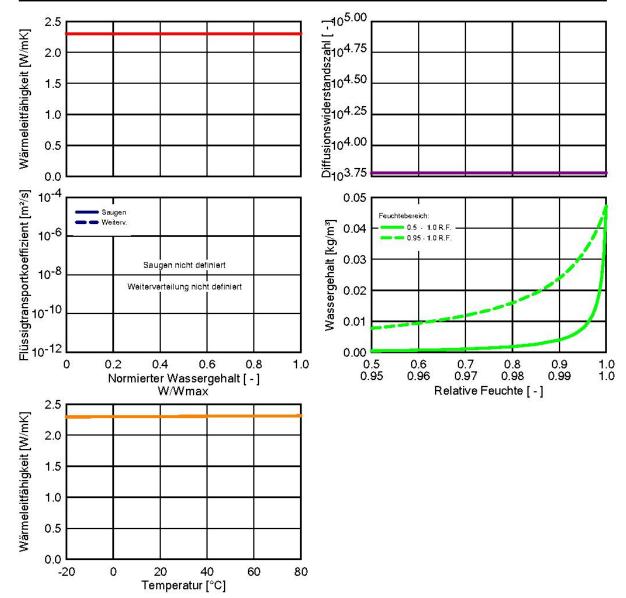
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	21,0
Porosität	[m³/m³]	0,95
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	840,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,035
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	1,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



Material: WÜTOP DB 2

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	130,0
Porosität	[m³/m³]	0,001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	2,3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	6020,0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0,0002



A.3 Bilder

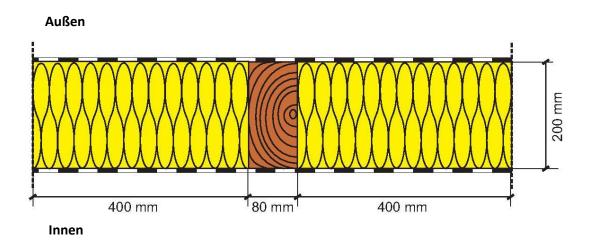


Bild 1: Für die Simulation in WUFI $^{\$}$ 2D modellierter Aufbau der Konstruktion zur Berechnung der Feuchtegehalte.

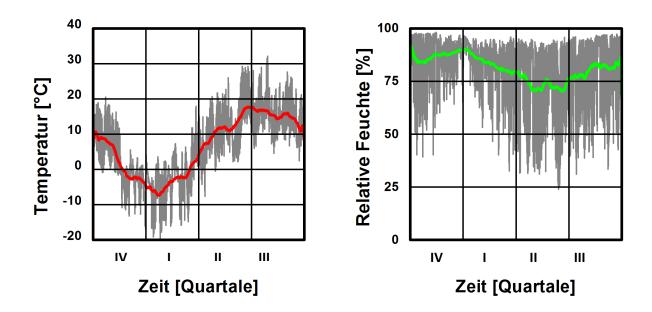


Bild 2: Verlauf der Temperatur und relativen Feuchte des Außenklimas am Standort Holzkirchen. Der graue Verlauf stellt jeweils die Stundenwerte dar, der farbige das gleitende Monatsmittel. Beginn: Oktober

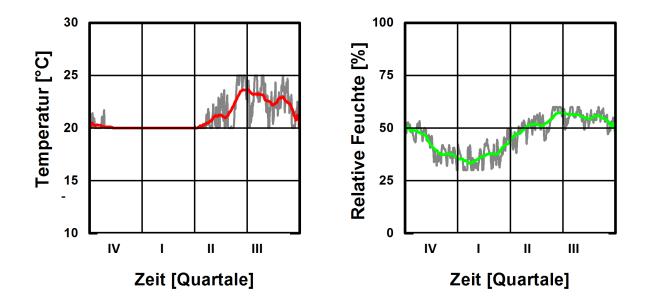


Bild 3: Verlauf der Temperatur und relativen Feuchte im Innenraum nach DIN EN 15026 für normale Belegung, abgeleitet aus dem Außenklima vom Standort Holzkirchen. Der graue Verlauf stellt jeweils die Stundenwerte dar, der farbige das gleitende Monatsmittel. Beginn: Oktober

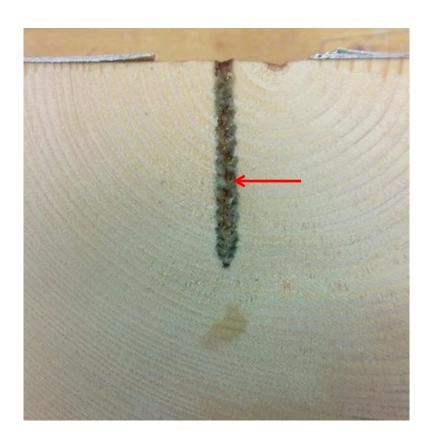


Bild 4: Schnitt durch eine Nagelstelle an einem Holzsparren nach 4-tägiger Wasserexposition.

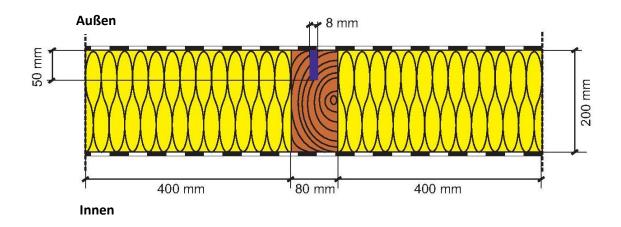


Bild 5: Position der Feuchtequelle (blau) für die Simulation der Freibewitterungszeit in WUFI® 2D.

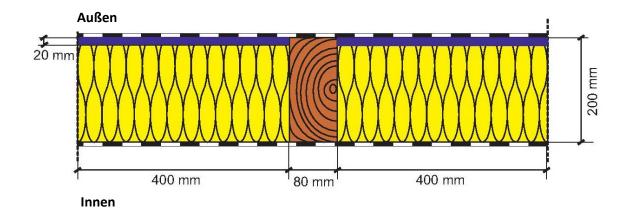


Bild 6: Position der Infiltrationsquelle (blau) für die Simulation der Austrocknungsphase in WUFI® 2D.

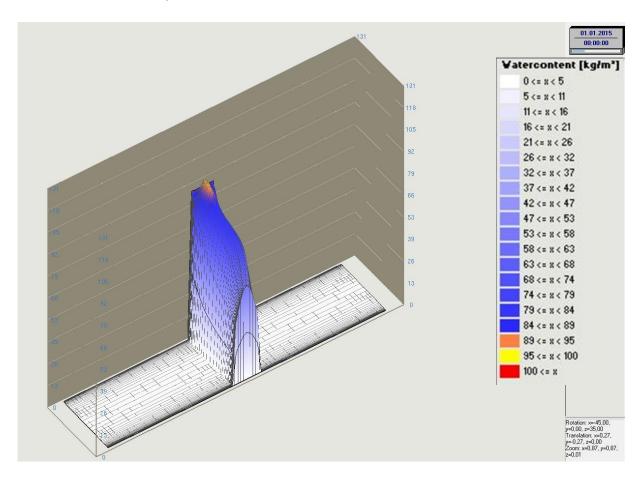


Bild 7: Berechnete Feuchteverteilung aus der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation am Ende des Freibewitterungszeitraums. Berechnungsvariante mit Nageldichtband.

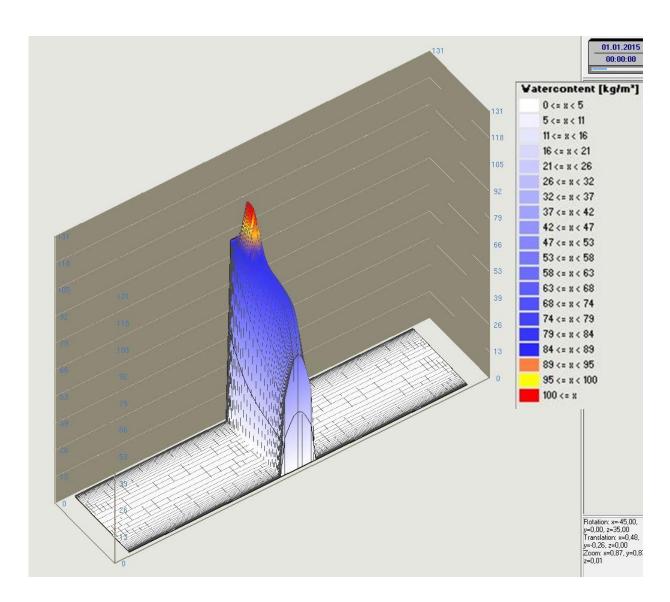


Bild 8: Berechnete Feuchteverteilung aus der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation am Ende des Freibewitterungszeitraums. Berechnungsvariante ohne Nageldichtband.

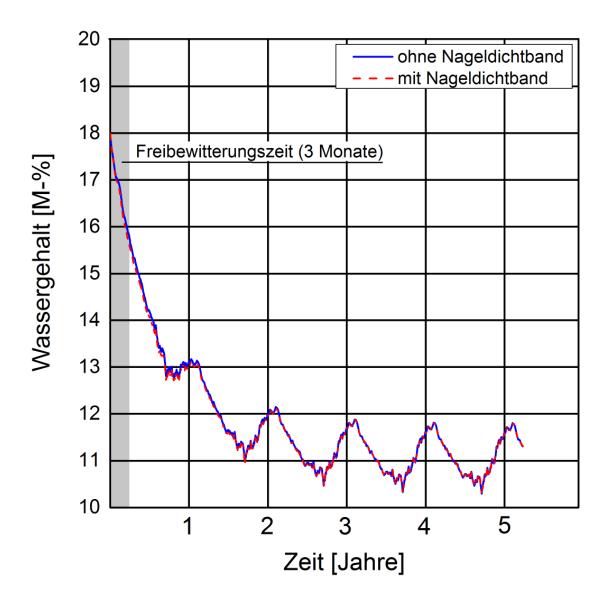


Bild 9: Verlauf der berechneten Holzfeuchte im gesamten Querschnitt des Dachsparrens. Die Simulation mit Feuchteeintrag ohne Nageldichtband ist als blaue Kurve, die mit Nageldichtband als rote, gestrichelte Kurve dargestellt. Die Berechnung beginnt im Oktober.

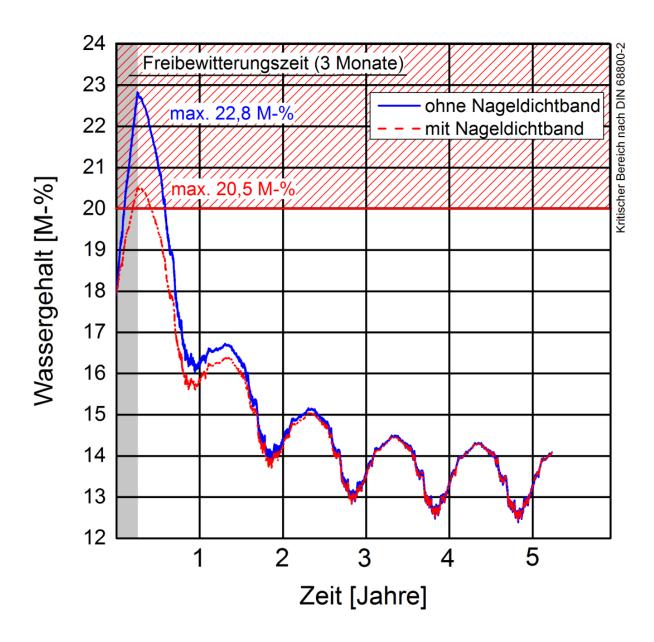


Bild 10: Verlauf der berechneten Holzfeuchte im kritischen mittleren Bereich des Dachsparrens. Die Simulation mit dem Feuchteeintrag ohne Nageldichtband ist als blaue Kurve, die mit Nageldichtband als rot gestrichelte Kurve dargestellt. Die Berechnung beginnt im Oktober.

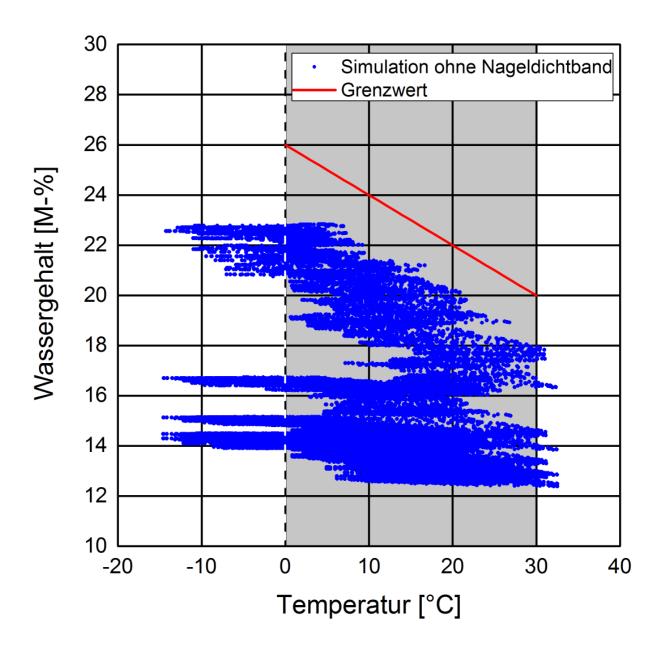


Bild 11: Berechnete Holzfeuchten im kritischen Bereich des Dachsparrens in M.-% in Abhängigkeit von der gleichzeitig auftretenden Temperatur in °C (blaue Punkte) bei der Variante ohne Nageldichtband. Der Grenzwert nach [16] ist als rote Linie dargestellt.