

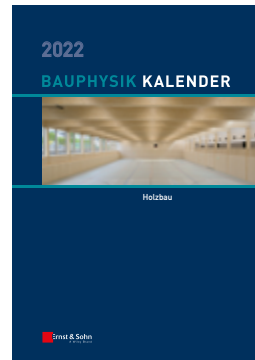
Nabil A. Fouad (Hrsg.)

# Bauphysik-Kalender 2022

## Schwerpunkt: Holzbau

- Bauprodukte und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRo)
- leichtes und nachhaltiges Bauen
- Brandschutz von und mit Holzkonstruktionen

Nachhaltiges Bauen in Holz- und Hybridbauweise und Dämmstoffe aus Naturfasern werden für höhere Gebäudeklassen zunehmend angewendet. Das erfordert eine intensive bauphysikalische Planung. Das Buch enthält Berechnungsverfahren und Konstruktionen für Feuchte-, Schall-, Brandschutz.



2022 · 708 Seiten ·  
478 Abbildungen · 243 Tabellen

Hardcover  
**ISBN 978-3-433-03360-9 € 159\***

**Fortsetzungspreis € 139\***

eBundle (Print + ePDF)  
**ISBN 978-3-433-03364-7 € 194\***

**Fortsetzungspreis eBundle € 169\***

### BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3360

## ÜBER DAS BUCH

Die aktuelle Ausgabe des Bauphysik-Kalenders behandelt das gesamte bauphysikalische Themenspektrum rund um den Holzbau, welcher seit einigen Jahren eine wachsende Aufmerksamkeit erhält. Die Bauweise zeichnet sich durch geringes Gewicht und kurze Bauzeiten aufgrund der Vorfertigung aus. Energetisch optimierte Holzkonstruktionen mit großen Dämmstoffdicken sind im Holzrahmenbau und Holztafelbau möglich. Im Fokus dieses gewachsenen Interesses steht außerdem die Anwendung des nachwachsenden Rohstoffes Holz, weil das gebundene CO<sub>2</sub> aus der Wachstumsphase im Gebäude gespeichert bleibt und ein relativ geringer Einsatz von Energie bei der Herstellung nötig ist.

Damit dieser Vorteil gegenüber den Massivbauweisen mit Beton bzw. Mauerwerk tatsächlich zum Tragen kommt, muss die Lebensdauer der Gebäude und Bauwerke in Holzbauweise vergleichbar lang sein. Für die höheren Gebäudeklassen kommt hierbei den bauphysikalischen Aspekten eine entscheidende Rolle zu: Feuchteschutz, Wärmeschutz, Brandschutz müssen die Dauerhaftigkeit der Konstruktion sichern und, zusammen mit

dem Schallschutz, die hochwertige Nutzung gewährleisten. Der Einsatz von Naturfaserdämmstoffen zu diesen Zwecken wird gemeinsam mit dem Holzbau ebenfalls attraktiver.

Der neue Bauphysik-Kalender 2022 bietet eine solide Arbeitsgrundlage und ein verlässliches aktuelles Nachschlagewerk für die Planung in Neubau und Bestand, alle Kapitel bewegen sich nahe an der Ingenieurpraxis. Das Buch enthält Planungshinweise, Konzepte und Praxisbeispiele für energieeffizientes, schadenfreies, nachhaltiges Bauen mit Holz.

## BESTELLUNG

Anzahl	ISBN / Bestell-Nr.	Titel	Preis
	978-3-433-03360-9	Bauphysik-Kalender 2022	€ 159*
		Fortsetzungspreis	€ 139*
	978-3-433-03346-3	Bauphysik-Kalender 2022 (eBundle)	€ 194*
		Fortsetzungspreis (eBundle)	€ 169*

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

	Privat	Geschäftlich
Firma, Abteilung	_____	UST-ID Nr. _____
Name, Vorname	_____	Telefon _____ Fax _____
Straße, Nr.	_____	
PLZ/Ort/Land	_____	E-Mail _____
Datum/Unterschrift	_____	

www.ernst-und-sohn.de/3360

## Vorwort

Als nachwachsender, energieneutraler und in Mitteleuropa heimischer Rohstoff ist Holz nicht nur ein außergewöhnlich nachhaltiges Baumaterial, sondern zudem sehr beliebt. Dies liegt auch darin begründet, dass Holz sich ideal für modernes, umweltschonendes und gesundes Wohnen eignet. So entspricht das Bauen mit Holz dem Wunsch vieler Menschen, in allen Lebensbereichen umweltfreundlich und nachhaltig zu agieren. Der Baustoff Holz kommt daher in den letzten Jahren immer häufiger im mehrgeschossigen und verdichtenden Wohnungsbau sowie z. B. im Schulbau zum Einsatz. Insbesondere die letzten Novellierungen mehrerer Landesbauordnungen ermöglichen den Einsatz der Holz- und Holz-Hybridbauweise als auch den von nachhaltigen Dämmstoffen aus Naturfasern bei Gebäuden bis zur Klasse 5.

Alle an Entwurf, Planung und Ausführung von hölzernen Bauwerken Beteiligte sowie Bauproduktehersteller, Materialprüfanstalten und Bauaufsichtsbehörden müssen ein hohes Maß an Fachkenntnis sowie einen Überblick über den aktuellen Stand aller relevanten Bereiche im Zusammenhang mit dem Bauen mit Holz besitzen. Nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit können sichere und optimierte Holzbauten entwickelt und realisiert, Umplanungen vermieden und Genehmigungsverfahren optimiert werden.

Der Bauphysik-Kalender 2022 widmet sich dem Bauen mit Holz. Er soll für die Planung und Ausführung bei Neubauten und im Bestand eine aktuelle, verlässliche und praxisingerechte Arbeitsgrundlage schaffen. Die folgenden Inhalte werden vermittelt:

- Kommentierung/Erläuterung aktueller Regeln der Technik,
- Beiträge über gebräuchliche und innovative Dämmstoffe insbesondere aus nachwachsenden Rohstoffen,
- Vorstellung der neuesten Entwicklungen und ausgeführte Beispiele für das Konstruieren mit Holz,
- Vorstellung der neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet möglicher bauphysikalischer Nachweis- und Bemessungsverfahren im Holzbau, wobei insbesondere Berechnungsverfahren für den Wärme-, Feuchte-, Schall- sowie Brandschutz vorgestellt und erläutert werden,
- im Abschnitt E die jährlich aktualisierten bauphysikalischen Materialkennwerte sowie einen Beitrag mit materialtechnischen Tabellen für den Brandschutz.

Der Bauphysik-Kalender 2022 will mit der dargestellten Beitragsvielfalt den Bogen von der Forschung zur Praxis und vom Planungsbüro zur ausführenden Firma spannen und dabei auf neue Entwicklungen und Tendenzen hinweisen. Er stellt eine solide Arbeitsgrundlage sowie ein aktuelles Nachschlagewerk nicht nur für die Praxis, sondern auch für Lehre und Forschung dar. Für kritische Anmerkungen sind die Autoren, der Herausgeber und der Verlag dankbar.

Der Herausgeber möchte an dieser Stelle allen Autoren für ihre Mitarbeit und dem Verlag für die angenehme Zusammenarbeit herzlichst danken.

Hannover, im September 2021

Nabil A. Fouad

# Inhaltsverzeichnis

## A Allgemeines und Normung

### A 1 Feuchteschutz im Holzbau – Hintergründe und aktuelle Regeln der Technik 1

Hartwig Künzel, Daniel Zirkelbach, Daniel Kehl

1	Einleitung	3	3.2.1.3	Diffusionswiderstand	20
2	Relevante hygrothermische Beanspruchungen und deren Auswirkungen	3	3.2.1.4	Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	21
2.1	Ursachen für hygrothermische Beanspruchungen	3	3.2.1.5	Generische Datensätze für Holzwerkstoffe	21
2.1.1	Raumseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	4	3.2.2	Rand- und Anfangsbedingungen	23
2.1.2	Außenseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	4	3.2.2.1	Außenklimabedingungen	23
2.1.3	Solare Einstrahlung	5	3.2.2.2	Raumklima	25
2.1.4	Schlagregen	6	3.2.2.3	Anfangsbedingungen	26
2.1.5	Umkehrdiffusion durch Sonneneinstrahlung nach Regen (Solar Vapour Drive)	7	3.2.3	Wärme- und Feuchteübergang	26
2.1.6	Dampfkonvektion durch Undichtheiten in Außenbauteilen infolge von Luftdruckdifferenzen	8	3.2.4	Hilfsmodelle zur vereinfachten Berücksichtigung spezieller hygrothermischer Effekte	27
2.1.7	Anfangsfeuchte	8	3.2.4.1	Berücksichtigung von Konvektionseffekten	28
2.1.8	Leitungswasserschäden	9	3.2.4.2	Berücksichtigung von Regenwasserpenetration	29
2.2	Auswirkungen von Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	9	3.2.5	Simulationsergebnisse und deren Interpretation	30
2.2.1	Feuchtebedingte Erhöhung des Wärmedurchgangs	9	3.2.5.1	Feuchtebilanz	30
2.2.2	Schimmel und holzerstörende Pilze	10	3.2.5.2	Relevante Bewertungskriterien für den Holzbau	30
2.2.3	Korrosion von metallischen Verbindungen und Befestigungsmitteln	11	3.2.5.3	Feuchteverhältnisse an den Oberflächen	31
2.2.4	Hygrothermisch verursachtes Quell- und Schwindverhalten	12	3.2.5.4	Holzfeuchte	31
3	Feuchteschutzbemessung anhand von Normen und Richtlinien	12	3.2.5.5	Holzwerkstofffeuchte	31
3.1	Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018-10	13	3.2.5.6	Tauwasserbildung innerhalb des Bauteils	32
3.1.1	Nachweisfreie Konstruktionen	13	3.2.5.7	Wassergehaltsgrenzwerte für mineralische Baustoffe	32
3.1.1.1	Holzfachwerkwände	13	3.3	Feuchteschutz nach Holzschutznorm DIN 68800-2	32
3.1.1.2	Dächer in Holzbauweise	13	3.3.1	Berücksichtigung und Gründe für eine Trocknungsreserve	33
3.1.2	Nachweis mithilfe des Periodenbilanzverfahrens nach Glaser	14	3.3.2	Hygrothermische Simulation für außen dampfdichte Bauteile	33
3.1.3	Feuchteschutznachweis durch hygrothermische Simulation	16	3.4	Regeln für die hygrothermische Simulation von Holzbauteilen nach WTA	34
3.2	Grundlagen, Normen und Richtlinien zur hygrothermischen Simulation	18	3.4.1	Verschattung	34
3.2.1	Materialkennwerte für Holz und Holzwerkstoffe	18	3.4.2	Bewertung von Holz durch die Porenluft- und Holzfeuchte	35
3.2.1.1	Feuchtespeicherung	19	3.4.3	Bewertung von Holzwerkstoffen durch Materialfeuchte	37
3.2.1.2	Feuchtetransport dampfförmig und flüssig	20	4	Schlussfolgerungen und Ausblick	38
			5	Literatur	39

**B Materialtechnische Grundlagen****B 1 Dämmstoffe im Bauwesen 43**  
Wolfgang M. Willems, Kai Schild

- |       |  |  |       |                                 |                                 |                    |
|-------|--|--|-------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1     | Physikalische Grundlagen                       | 47                                     | 3.2   | Baumwolle                       | 68                              |                    |
| 1.1   | Wärmeschutz                                    | 47                                     | 3.2.1 | Herstellung und Hintergrund-    | informationen                   |                    |
| 1.1.1 | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$                   | 47                                     |       |                                 | 68                              |                    |
| 1.1.2 | Wärmedurchlasswiderstand R                     | 50                                     | 3.2.2 | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung                    |                    |
| 1.1.3 | Spezifische Wärmekapazität c                   | 50                                     |       |                                 | 69                              |                    |
| 1.1.4 | Temperaturleitzahl a                           | 51                                     | 3.2.3 | Charakteristische Kenngrößen    | „Baumwolle“                     |                    |
| 1.1.5 | Physik der Wärmedämmung                        | 51                                     |       |                                 | 70                              |                    |
| 1.2   | Feuchteschutz                                  | 52                                     | 3.2.4 | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte                         |                    |
| 1.2.1 | Wasserdampf-Diffusionswiderstands-             | zahl $\mu$                             | 52    |                                 | 70                              |                    |
| 1.2.2 | Wasserdampfdiffusionsäquivalente               | Luftschichtdicke $s_d$                 | 52    | 3.3                             | Blähglas                        |                    |
| 1.2.3 | Auswahl der Wasserdampf-Diffusions-            | widerstandszahl $\mu$ für den Nachweis | 53    | 3.3.1                           | Herstellung und Hintergrund-    | informationen      |
|       | nach Glaser                                    | 53                                     |       |                                 | 70                              |                    |
| 1.3   | Schallschutz                                   | 53                                     | 3.3.2 | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung                    |                    |
| 1.3.1 | Schallabsorptionsgrad                          | 53                                     |       |                                 | 71                              |                    |
| 1.3.2 | Schallabsorptionsfläche A                      | 54                                     | 3.3.3 | Charakteristische Kenngrößen    | „Blähglas“                      |                    |
| 1.3.3 | Längenbezogener Strömungs-                     | widerstand r                           | 54    |                                 | 71                              |                    |
| 1.3.4 | Dynamische Steifigkeit $s'$                    | 55                                     | 3.3.4 | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte                         |                    |
| 1.3.5 | Dynamischer Elastizitätsmodul $E_{\text{Dyn}}$ | 55                                     |       |                                 | 71                              |                    |
| 1.4   | Brandschutz                                    | 55                                     | 3.4   | Blähton                         | 72                              |                    |
| 1.4.1 | Baustoffklassen nach DIN 4102-1                | 55                                     | 3.4.1 | Herstellung und Hintergrund-    | informationen                   |                    |
| 1.4.2 | Benennung des Brandverhaltens nach             | DIN EN 13501-1                         | 56    |                                 | 72                              |                    |
| 1.5   | Rohdichte                                      | 59                                     | 3.4.2 | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung                    |                    |
| 2     | Dämmstoffe im Bauwesen                         | 60                                     |       |                                 | 72                              |                    |
| 2.1   | Dämmstoffübersicht                             | 60                                     | 3.4.3 | Charakteristische Kenngrößen    | „Blähton“                       |                    |
| 2.2   | Aspekte für die Auswahl von                    | Dämmstoffen                            | 60    |                                 | 73                              |                    |
| 2.2.1 | Baukonstruktive Aspekte                        | 60                                     | 3.4.4 | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte                         |                    |
| 2.2.2 | Bauphysikalische Aspekte                       | 60                                     |       |                                 | 73                              |                    |
| 2.2.3 | Ökologische Aspekte                            | 60                                     | 3.5   | Flachs                          | 73                              |                    |
| 2.2.4 | Ökonomische Aspekte                            | 63                                     | 3.5.1 | Herstellung und Hintergrund-    | informationen                   |                    |
| 2.3   | Zusatzstoffe                                   | 63                                     |       |                                 | 73                              |                    |
| 2.3.1 | Treibmittel                                    | 63                                     | 3.5.2 | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung                    |                    |
| 2.3.2 | Bindemittel                                    | 65                                     |       |                                 | 74                              |                    |
| 2.3.3 | Stützfasern                                    | 66                                     | 3.5.3 | Charakteristische Kenngrößen    | „Flachs“                        |                    |
| 2.3.4 | Zusätze für Brand- und Feuchteschutz           | 66                                     |       |                                 | 74                              |                    |
| 2.4   | Entwicklung der Dämmschichtdicken in           | Dach und Wand in den europäischen      | 66    | 3.5.4                           | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte            |
|       | Ländern  | 66                                     |       |                                 | 74                              |                    |
| 3     | Beschreibung von Dämmstoffen                   | 66                                     | 3.6   | Getreidegranulat                | 74                              |                    |
| 3.1   | Aerogel  | 66                                     | 3.6.1 | Herstellung und Hintergrund-    | informationen                   |                    |
| 3.1.1 | Herstellung und Hintergrund-                   | informationen                          | 66    |                                 | 74                              |                    |
| 3.1.2 | Anwendungsbereiche und                         | Verarbeitung                           | 68    | 3.6.2                           | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung       |
| 3.1.3 | Charakteristische Kenngrößen                   | „Aerogel“                              | 68    |                                 | 75                              |                    |
| 3.1.4 | Gesundheitliche und ökologische                | Aspekte                                | 68    | 3.6.3                           | Charakteristische Kenngrößen    | „Getreidegranulat“ |
|       |  |  |       |                                 | 75                              |                    |
|       |  |  | 3.6.4 | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte                         |                    |
|       |  |  |       |                                 | 75                              |                    |
|       |  |  | 3.7   | Hanf                            | 76                              |                    |
|       |  |  | 3.7.1 | Herstellung und Hintergrund-    | informationen                   |                    |
|       |  |  |       |                                 | 76                              |                    |
|       |  |  | 3.7.2 | Anwendungsbereiche und          | Verarbeitung                    |                    |
|       |  |  |       |                                 | 76                              |                    |
|       |  |  | 3.7.3 | Charakteristische Kenngrößen    | „Hanf“                          |                    |
|       |  |  |       |                                 | 77                              |                    |
|       |  |  | 3.7.4 | Gesundheitliche und ökologische | Aspekte                         |                    |
|       |  |  |       |                                 | 77                              |                    |

- 3.8 Holzfaser 77
- 3.8.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 77
- 3.8.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 78
- 3.8.3 Charakteristische Kenngrößen „Holzfaser“ 78
- 3.8.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 78
- 3.9 Holzwole-Leichtbauplatten und Holzwole-Mehrschichtplatten 79
- 3.9.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 79
- 3.9.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 80
- 3.9.3 Charakteristische Kenngrößen „HWL“ 81
- 3.9.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 81
- 3.10 Kalziumsilikat 81
- 3.10.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 81
- 3.10.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 82
- 3.10.3 Charakteristische Kenngrößen „Kalziumsilikat“ 82
- 3.10.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 82
- 3.11 Kokos 83
- 3.11.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 83
- 3.11.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 83
- 3.11.3 Charakteristische Kenngrößen „Kokos“ 83
- 3.11.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 83
- 3.12 Kork 84
- 3.12.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 84
- 3.12.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 84
- 3.12.3 Charakteristische Kenngrößen „Kork“ 85
- 3.12.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 85
- 3.13 Melaminharzschäum 85
- 3.13.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 85
- 3.13.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 86
- 3.13.3 Charakteristische Kenngrößen „Melaminharz“ 86
- 3.13.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 86
- 3.14 Mineralschäum 86
- 3.14.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 86
- 3.14.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 87
- 3.14.3 Charakteristische Kenngrößen „Mineralschäum“ 87
- 3.14.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 87
- 3.15 Mineralwolle 88
- 3.15.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 88
- 3.15.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 89
- 3.15.3 Charakteristische Kenngrößen „Mineralwolle“ 89
- 3.15.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 89
- 3.16 Perlite 90
- 3.16.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 90
- 3.16.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 90
- 3.16.3 Charakteristische Kenngrößen „Perlite“ 91
- 3.16.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 91
- 3.17 Phenolharz 91
- 3.17.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 91
- 3.17.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 91
- 3.17.3 Charakteristische Kenngrößen „Phenolharz“ 92
- 3.17.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 92
- 3.18 Polyesterfaser 92
- 3.18.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 92
- 3.18.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 92
- 3.18.3 Charakteristische Kenngrößen „Polyesterfaser“ 93
- 3.18.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 93
- 3.19 Polystyrol, expandiert (EPS) 93
- 3.19.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 93
- 3.19.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 94
- 3.19.3 Charakteristische Kenngrößen „EPS“ 95
- 3.19.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 95
- 3.20 Polystyrol, extrudiert (XPS) 95
- 3.20.1 Herstellung und Hintergrundinformationen 95
- 3.20.2 Anwendungsbereiche und Verarbeitung 96
- 3.20.3 Charakteristische Kenngrößen „XPS“ 97
- 3.20.4 Gesundheitliche und ökologische Aspekte 97

3.21	Polyurethan (PUR, Hartschaum und Ortschaum) 97	3.27.3	Charakteristische Kenngrößen „Stroh“ 106
3.21.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 97	3.27.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 106
3.21.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 98	3.28	Transparente Wärmedämmung 106
3.21.3	Charakteristische Kenngrößen „PUR“ 98	3.28.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 106
3.21.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 99	3.28.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 106
3.22	Pyrogene Kieselsäure 99	3.28.3	Charakteristische Kenngrößen „TWD“ 107
3.22.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 99	3.28.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 107
3.22.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 99	3.29	Vacuum Insulating Sandwich (VIS) 107
3.22.3	Charakteristische Kenngrößen „Pyrogene Kieselsäure“ 99	3.29.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 107
3.22.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 100	3.29.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 109
3.23	Schafwolle 100	3.29.3	Charakteristische Kenngrößen „VIS“ 109
3.23.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 100	3.29.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 109
3.23.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 100	3.30	Vakuumisolationspaneele (VIP) 109
3.23.3	Charakteristische Kenngrößen „Schafwolle“ 101	3.30.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 109
3.23.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 101	3.30.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 111
3.24	Schaumglas 101	3.30.3	Charakteristische Kenngrößen „VIP“ 112
3.24.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 101	3.30.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 112
3.24.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 101	3.31	Vermiculite 112
3.24.3	Charakteristische Kenngrößen „Schaumglas“ 102	3.31.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 112
3.24.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 103	3.31.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 112
3.25	Schilfrohr 103	3.31.3	Charakteristische Kenngrößen „Vermiculite“ 113
3.25.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 103	3.31.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 113
3.25.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 103	3.32	Zellelastomere 113
3.25.3	Charakteristische Kenngrößen „Schilfrohr“ 104	3.32.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 113
3.25.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 104	3.32.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 113
3.26	Seegras 104	3.32.3	Charakteristische Kenngrößen „Zellelastomere“ 114
3.26.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 104	3.32.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 114
3.26.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 104	3.33	Zellulose 114
3.26.3	Charakteristische Kenngrößen „Seegras“ 104	3.33.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 114
3.26.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 104	3.33.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 115
3.27	Stroh 105	3.33.3	Charakteristische Kenngrößen „Zellulose“ 115
3.27.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 105	3.33.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 116
3.27.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 105	4	Literatur 116

**B2 Naturfaserdämmstoffe 121**

Norbert Rüter

- |       |                                 |     |       |               |     |
|-------|---------------------------------|-----|-------|---------------|-----|
| 1     | Einleitung                      | 123 | 2.3   | Sonstige      | 127 |
| 2     | Rohstoffe                       | 123 | 2.3.1 | Seegras       | 127 |
| 2.1   | Forstwirtschaft                 | 123 | 2.3.2 | Zellulose     | 128 |
| 2.1.1 | Nadelholzfaser                  | 124 | 2.3.3 | Schafwolle    | 128 |
| 2.1.2 | Nadelholzspäne                  | 124 | 3     | Dämmstoffe    | 129 |
| 2.1.3 | Holzwohle                       | 124 | 4     | Anwendungen   | 130 |
| 2.1.4 | Kork                            | 125 | 5     | Bauphysik     | 131 |
| 2.2   | Landwirtschaft                  | 125 | 5.1   | Feuchteschutz | 132 |
| 2.2.1 | Flachs                          | 125 | 5.2   | Wärmeschutz   | 133 |
| 2.2.2 | Hanf                            | 125 | 5.3   | Brandschutz   | 133 |
| 2.2.3 | Schilf/Reet                     | 126 | 5.4   | Schallschutz  | 135 |
| 2.2.4 | Stroh                           | 126 | 6     | Literatur     | 137 |
| 2.2.5 | Wiesengras/Wiesengras-Zellulose | 127 |       |               |     |

**B3 Bauprodukte aus Rinde 139**

Eugenia Mariana Tudor, Hermann Huber

- |       |  |     |     |   |     |
|-------|--|-----|-----|---|-----|
| 1     | Einleitung                                 | 141 | 4.3 | Oriented Strand Boards  | 152 |
| 2     | Baumrinde – allgemeine Eigenschaften       | 141 | 4.4 | Dämmplatten aus Rinde   | 152 |
| 2.1   | Anatomie der Baumrinde                     | 142 | 4.5 | Dekorative und Dämmplatten aus Baumrinde mit geringem Formaldehydgehalt | 154 |
| 2.2   | Chemische Zusammensetzung von Baumrinde    | 142 | 4.6 | Rinde-Ton-Verbundwerkstoffe mit feuerhemmenden Eigenschaften            | 154 |
| 2.3   | Tannine                                    | 143 | 4.7 | Verbundplatten aus Baumrinde und deren Schallabsorptionsvermögen        | 156 |
| 2.3.1 | Tannin-basierte Klebstoffe                 | 144 | 4.8 | The “living wall” – decorative bark-based panels                        | 158 |
| 2.3.2 | Tannin-basierte Schäume                    | 144 | 5   | Kork  | 158 |
| 3     | Vorbereitung des Rohstoffes                | 144 | 5.1 | Die Makrostruktur von Kork  | 158 |
| 3.1   | Entrindungsmethoden                        | 144 | 5.2 | Die Mikrostruktur von Kork  | 159 |
| 3.1.1 | Trommelentrindung                          | 145 | 5.3 | Eigenschaften von Kork  | 159 |
| 3.1.2 | Cradle-Entrindung                          | 146 | 6   | Produkte auf Korkbasis  | 160 |
| 3.1.3 | Fräskopfentrindung (Rosserkopf-entrindung) | 146 | 6.1 | Agglomerierte Korkverbundwerkstoffe                                     | 160 |
| 3.1.4 | Kettenschlagentrinder                      | 146 | 6.2 | Expandierte Korkagglomerate   | 160 |
| 3.1.5 | Hochdruck-Wasserstrahl-Entrindung          | 146 | 6.3 | Kork-Kautschuk-Verbundwerkstoffe  | 161 |
| 3.1.6 | Kompressionsentrinder                      | 147 | 6.4 | Kork-Sandwich-Verbundwerkstoffe   | 161 |
| 3.1.7 | Bio-Entrindung                             | 147 | 6.5 | Kork-Mineralien-Verbundwerkstoffe                                       | 161 |
| 3.2   | Zerkleinern der Rinde                      | 147 | 6.6 | Korkböden und Wandverkleidungen   | 161 |
| 3.3   | Sichtung der Rindenpartikel                | 148 | 6.7 | Umweltaspekte von Korkprodukten   | 162 |
| 3.4   | Trocknung der Rinde                        | 148 | 7   | Literatur   | 162 |
| 4     | Produkte aus Baumrinde                     | 149 |     |   |     |
| 4.1   | Spanplatten aus Baumrinde                  | 150 |     |   |     |
| 4.2   | Mitteldichte Faserplatten mit Baumrinde    | 151 |     |   |     |



**C Nachweisverfahren**

**C1 Energetisch optimierte Holzkonstruktionen 171**

Peter Schmidt, Saskia Windhausen

1	Einführung	173	4.3.4	Unterer Gebäudeabschluss (Bodenplatte und Kellerdecke)	187
2	Anforderungen und Regelwerke	173	4.3.5	Bauteile zu unbeheizten Räumen	188
3	Bauweisen und Konstruktion	175	4.4	Sonstige Anforderungen	188
3.1	Typische Merkmale und Vorteile der Holzbauweise	175	5	Anschlüsse und Details	189
3.2	Blockbauweise	176	5.1	Wärmebrücken	189
3.2.1	Klassische Blockbauweise	176	5.2	Luftdichtheit	191
3.2.2	Moderne Blockhäuser	177	5.3	Ausgewählte Anschlüsse und Details	193
3.2.3	Abdichtung der Fugen	177	6	Sommerlicher Wärmeschutz	193
3.2.4	Vorfertigung und Güteüberwachung	177	6.1	Gebäudestandort und Ausrichtung des Gebäudes	196
3.2.5	Sonstige Massivholzbauweisen	178	6.2	Fenster	196
3.3	Holzrahmenbau und Holztafelbau	178	6.3	Sonnenschutzmaßnahmen	196
3.3.1	Konstruktionsprinzip	178	6.4	Lüftung und passive Kühlung	197
3.3.2	Entwurfgrundlagen und Rastermaß	179	6.5	Interne Wärmequellen	197
3.3.3	Vorteile der Holztafelbauweise	179	6.6	Wirksame Wärmespeicherfähigkeit	197
3.3.4	Güteüberwachung	180	7	Anlagensysteme	199
3.4	Holzskelettbau	180	7.1	Heizungsanlage	199
4	Energetische Ausbildung von Baukörper und Bauteilen	181	7.2	Trinkwarmwasser	200
4.1	Einflussgrößen auf den Energiebedarf von Gebäuden	181	7.3	Solarthermieanlage	200
4.2	Baukörper und Grundstück	181	7.4	Lüftungsanlage	200
4.3	Bauteile	182	7.5	Sonstige Anlagenkomponenten	201
4.3.1	Dach	182	8	Zusammenfassung	201
4.3.2	Außenwände	184	9	Literatur	201
4.3.3	Fenster und Verglasungen	185			

**C2 Dokumentation einer Energiebilanz nach DIN/TS 18599 Beiblatt 3 205**

Kati Jagnow, Lutz Dorsch

1	Einführung	207	4.4	Dokumentation der Gebäudegeometrie und Qualitäten der Bauteile	215
2	Entstehungshistorie	207	4.5	Dokumentation von Heizwärme- und Kühlbedarf	216
2.1	Das Beiblatt von 2015	208	4.6	Dokumentation der RLT- und Lüftungsanlagen	217
2.2	Förderprojekt BMU und DIBt	208	4.7	Dokumentation der statischen Heizsysteme	218
2.3	Projektgruppe und Arbeitstreffen	208	4.7.1	Wärmeübergabe	218
2.4	Überführung in ein Normungsvorhaben	209	4.7.2	Wärmeverteilung	220
3	Struktur des Beiblattes	209	4.7.3	Wärmespeicherung	220
3.1	Gliederung der Dokumentation	209	4.7.4	Wärmeerzeugung	221
3.2	Allgemeine Festlegungen	210	4.8	Dokumentation der Beleuchtung	222
3.3	Erläuterungstext und Zielgruppe	210	4.9	Dokumentation der Stromerzeugung	224
4	Beispielprojekt mit Dokumentation	211	5	Fazit und Ausblick	225
4.1	Vorstellung des Bürogebäudes mit Zonen und Versorgung	211	6	Dank	225
4.2	Dokumentation der Verfahren und Randbedingungen	212	7	Literatur	225
4.3	Dokumentation der Nutzung und Konditionierung	212			



### C3 Erfassen der Feuchtespeicherung in Holz und Potenzial für Messsysteme zur Bauwerksüberwachung 227

Mike Sieder, Yannick Plüss, Paul Biller, Moritz Tronnier

1	Einleitung	229	3.1.2	Holzeigenschaften	237
2	Feuchtetransport in Vollholz und Holzwerkstoffen	229	3.1.3	Prüfkörperform	237
2.1	Feuchteaufnahme durch Sorption	229	3.1.4	Faserrichtung	237
2.1.1	Chemisorption	230	3.1.5	Feuchteverteilung im Holz	237
2.1.2	Physisorption	230	3.1.6	Elektroden und Widerstandsmessgerät	238
2.1.3	Kapillarkondensation	230	3.2	Kalibrierung von zwei Hygrometern	238
2.2	Kapillare Wasseraufnahme	230	3.2.1	Versuchsaufbau	238
2.3	Flüssigkeitstransport im Holz	231	3.2.2	Referenzmessungen	239
2.4	Einflüsse auf die Wasseraufnahme	232	3.2.3	Ergebnisse der Versuchsreihe A	239
2.4.1	Änderungen des Umgebungsklimas	232	3.2.4	Ergebnisse der Versuchsreihe B	240
2.4.2	Unterschiede aufgrund der Holzstruktur	232	3.2.5	Aufwand der Kalibrierung	242
2.4.3	Einfluss von Verklebungen und Beschichtungen	233	4	Holzfeuchtebestimmung über Sorptionskurven im Gebäudemonitoring	242
2.5	Berechnung der Holzfeuchteverteilung	234	4.1	Versuchsaufbau und Ergebnisse	242
2.5.1	Feuchteaufnahme aus der Luft	234	4.2	Kalibrierung und Genauigkeit	244
2.5.2	Feuchtetransport im Holz	234	4.3	Mögliche Einbauvarianten	245
3	Ermittlung der Holzfeuchte über den elektrischen Widerstand	236	4.4	Anwendungsbereiche	246
3.1	Feuchte	236	5	Fazit und Ausblick	246
3.1.1	Temperatur	237	5.1	Genauigkeit des Sensors	246
			5.2	Sensitivität und Ansprechverhalten	247
			6	Literatur	247

### C4 Rechnerische Simulation zeitlicher Holzfeuchteverläufe im Vergleich zu langjährigen Messreihen 249

Sandra Tilleke, Nabil A. Fouad

1	Einleitung und Motivation	251	4	Klimadaten	266
2	Physikalische Grundlagen	253	4.1	Einfluss der Messfrequenz	266
2.1	Feuchte- und Wärmespeicherung	253	4.2	Einfluss des Messzeitpunktes	267
2.1.1	Feuchtespeicherung	253	4.3	Einfluss der Datenquelle	268
2.1.2	Wärmespeicherung	254	4.3.1	Anpassung der Außenklima-Daten	268
2.2	Transportvorgänge	255	4.3.2	Ergebnisse der Simulationen aus den Klimadaten	269
2.2.1	Feuchtetransport	255	5	Vergleich der Simulationen mit den gemessenen Langzeitwerten	270
2.2.2	Wärmetransport	257	6	Fazit	271
2.2.3	Gekoppelter Wärme-Feuchte-Transport	258	7	Literatur	272
3	Materialmodell	258			
3.1	Materialspezifische Kennwerte für den Baustoff Holz	258			
3.1.1	Allgemeine und thermische Kennwerte	258			
3.1.2	Hygrische Materialparameter	258			
3.2	Anpassung des Materialmodells	261			
3.2.1	Ergänzende Versuche	261			
3.2.2	Parameterstudie	262			

**C5 Schallschutz im Holzbau 275**

Joachim Hessinger, Andreas Rabold, Bernd Saß, Markus Schramm

- 1 Einführung 277
- 1.1 Schallprüfungen, Begriffsdefinitionen 277
- 1.2 Schalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden 277
  - 1.2.1 Luftschalldämmung 278
  - 1.2.2 Trittschalldämmung 279
- 1.3 Nationale Anforderungen, DIN 4109 279
- 1.4 Grundlagen der Bauakustik 280
  - 1.4.1 Massegesetz 281
  - 1.4.2 Koinzidenzfrequenz 282
  - 1.4.3 Platten-Eigenfrequenz 283
  - 1.4.4 Masse-Feder-Masse Resonanz 284
  - 1.4.5 Entkopplung 285
  - 1.4.6 Dämpfung/Schallabsorption 285
- 2 Holzdecken 285
  - 2.1 Konstruktionsregeln 286
    - 2.1.1 Estrichaufbauten 286
    - 2.1.2 Rohdeckenbeschwerden 288
    - 2.1.3 Schwingungstilger 288
    - 2.1.4 Tragstruktur und Dämmung im Balkenzwischenraum 288
  - 2.1.5 Unterdecken 289
  - 2.1.6 Gehbeläge 290
  - 2.2 Konstruktive Optimierung von Holzdecken 290
    - 2.2.1 Einfluss von Estrichaufbauten 290
    - 2.2.2 Einfluss durch Rohdeckenbeschwerung 291
    - 2.2.3 Verbesserung durch federnd abgehängte Unterdecke 291
  - 2.3 Bauteilsammlung für Holzdecken 292
  - 2.4 Flankenübertragung 296
    - 2.4.1 Flankenübertragung bei vertikaler Trittschallübertragung 296
    - 2.4.2 Flankenübertragung bei vertikaler Luftschallübertragung 299
    - 2.4.3 Horizontale Flankenübertragung von Decke und Boden 299
    - 2.4.4 Massivholzelemente als flankierende Bauteile 300
  - 2.5 Berechnungsbeispiel und Genauigkeit des  $K_1, K_2$ -Verfahrens für die Trittschalldämmung 305
  - 2.6 Berechnungsbeispiel und Genauigkeit des differenzierten Berechnungsverfahrens 306
  - 2.7 Schalldämmung der Decken bei tiefen Frequenzen 306
  - 2.8 Hinweise zur Bauausführung 309
- 3 Wände in Holzbauweise 312
  - 3.1 Konstruktive Details von Wandkonstruktionen 312
    - 3.1.1 Holzständerkonstruktionen 312
    - 3.1.2 Massivholzkonstruktionen 313
  - 3.2 Holzwände in unterschiedlichen Anwendungsbereichen 313
    - 3.2.1 Innenwände 313
    - 3.2.2 Außenwände 314
    - 3.2.3 Gebäudetrennwände in Holzbauweise 315
    - 3.2.4 Flankenschalldämmung von Holzständerwänden 316
    - 3.2.5 Flankenschalldämmung von Massivholzwänden 316
    - 3.2.6 Bauteilsammlung für Holzwände 316
  - 3.3 Berechnungsbeispiel 321
  - 3.4 Genauigkeit des Prognoseverfahrens 322
  - 3.5 Schalldämmung von Holzwänden bei tiefen Frequenzen 322
    - 3.5.1 Anwendung für Gebäudetrennwände 322
    - 3.5.2 Anwendung für Außenwände 325
- 4 Dächer 326
  - 4.1 Steildachkonstruktionen 326
    - 4.1.1 Steildächer mit Zwischensparrendämmung 326
    - 4.1.2 Steildächer mit Aufsparrendämmung 327
    - 4.1.3 Trennwandanschluss an Steildächer 328
    - 4.1.4 Transmissionsschalldämmung von Steildächern 329
    - 4.1.5 Flankenschalldämmung von Steildächern 331
  - 4.2 Flachdachkonstruktionen 334
    - 4.2.1 Einfluss der Dämmung bei Flachdächern 334
    - 4.2.2 Abdichtung, Dachdeckung und Gehbelag 334
    - 4.2.3 Unterdecke und raumseitige Bekleidung 335
  - 4.3 Bauteilsammlung für Steildächer 335
  - 4.4 Bauteilsammlung für Flachdächer 341
  - 4.5 Schalldämmung von Steildächern bei tiefen Frequenzen 341
  - 4.6 Hinweise zur Bauausführung 346
- 5 Treppen in Reihenhäusern in Holzbauweise 349
  - 5.1 Stahl-Holz-Treppen 350
  - 5.2 Massivholz-Treppen 351
  - 5.3 Einfluss der Trennwand auf die Trittschalldämmung der Treppe 351
  - 5.4 Verbesserung der Trittschalldämmung von Treppen 352
- 6 Literatur 353

<b>C6</b>	<b>Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer neuartigen Holzleichtbauwand für Schulen</b>	<b>357</b>
	Michael Flieger, Markus Hofmann, Tobias Götz, Oliver Kornadt	
1	Einleitung	359
2	Akustische Grundlagen	359
2.1	Schall und Schalldruckpegel	359
2.2	Raumakustik	360
2.3	Bauakustik	365
2.4	Resonanzfrequenz und Koinzidenz- grenzfrequenz	367
3	Normative Anforderungen der DIN 4109 an Leichtbautrennwände	368
3.1	Mindestanforderungen und erhöhte Anforderungen nach DIN 4109	368
3.2	Rechnerische Nachweisverfahren für Leichtbautrennwände nach DIN 4109-2	371
3.3	Daten für die rechnerischen Nachweisverfahren	373
3.3.1	Daten für Metallständerwände	373
3.3.2	Daten für Holztafelwände	373
4	Normative Vorgaben für experimentelle Untersuchungen im Labor	378
4.1	Normative Anforderungen an einen akustischen Wandprüfstand	378
4.2	Anforderungen an das Mess- equipment	378
4.3	Kontrolle der Umgebungsbedingungen und des Hintergrundgeräuschpegels	380
4.4	Experimentelle Messung der Nachhallzeit	380
4.5	Experimentelle Messung des Schalldämm- Maßes	381
5	Entwicklung einer Holzleicht- bauwand	382
5.1	Entwicklungsziele und Projektpartner	382
5.2	Simulationstechnische Prognose des Schalldämm-Maßes	382
5.3	Prognose des bewerteten Bauschalldämm- Maßes nach DIN 4109	383
5.4	Entwicklung von Prototypvarianten	384
5.5	Experimentelle Untersuchung im Wandprüfstand	386
5.6	Auswertung der Labormessungen	387
5.6.1	Bau- und Raumakustische Eigenschaften	387
5.6.2	Vergleich zwischen den Prototyp- varianten	389
5.6.3	Vergleich mit anderen Trennwänden	389
6	Zusammenfassung und Fazit	390
7	Literatur	391
<b>C7</b>	<b>Luftdichtheit in Planung, Ausführung und Messung</b>	<b>393</b>
	Stefanie Rolfsmeier, Robert Borsch-Laaks, Alexander Kiß, Paul Simons	
1	Einleitung	395
2	Antriebskräfte, die Luftströmungen durch Lecks bewirken	395
3	Gründe für eine luftdichte Gebäudehülle	397
3.1	Funktion von Lüftungsanlagen sicherstellen	397
3.2	Bauschäden durch konvektiven Feuchteintrag vermeiden	398
4	Überprüfung der Gebäudehülle mit einer Luftdurchlässigkeitsmessung (Blower-Door-Messung)	399
5	Luftdichtheitskonzept: Der erfolgreiche Weg zur vereinbarten Luftdichtheit	400
5.1	Luftdichtheit bei der energetischen Sanierung	400
5.2	Luftdichtheitskonzept bei der Sanierung von kleinen Wohnungsbauten	400
5.2.1	Grobkonzept	400
5.2.2	Hinweise: Einbindung haustechnischer Anlagen	401
5.2.3	Relevante Details	401
5.2.4	Detailplanung	402
5.2.5	Angebotsanfrage, Ausschreibung	403
5.2.6	Gewerkeübergreifendes Koordinierungs- gespräch	403
5.2.7	Überprüfung der Ausführung	403
5.3	Luftdichtheitskonzept im Neubau	405
5.4	Luftdichtheitskonzept bei großen Gebäuden	405
5.4.1	Detailplanung	406
5.4.2	Detailoptimierung mittels Luftdichtheitstest in einem Muster Raum	408
5.4.3	Eigenüberwachung der Luftdicht- heitsebene	409
5.4.4	Schlussmessung im fertiggestellten Gebäude	409
6	Arten von Luftleckagen	409
7	Messzeitpunkt	409
7.1	Messung am Bestandsgebäude	409
7.2	Messung bzw. Untersuchung während Bauprozess	409
7.3	Schlussmessung	410
7.4	Messung nach einigen Betriebsjahren	410
8	Luftdurchlässigkeitsmessung nach DIN EN ISO 9972: 2018-12	410

8.1	Grenzwerte für kleine Gebäude (< 1500 m <sup>3</sup> )	410	8.6.1	Festlegung des Prüfumfangs	415
8.1.1	Ermittlung des Gebäudeluftvolumens	410	8.6.2	Preiskalkulation der Blower-Door-Messung	416
8.2	Grenzwerte für große Gebäude (> 1500 m <sup>3</sup> )	411	8.6.3	Nachströmwege der Luft zu den Blower-Door-Messgeräten	416
8.2.1	Ermittlung der Hüllfläche A <sub>E</sub>	412	8.6.4	Baubegehung vor der Messung	416
8.3	Schlussmessungen	412	8.6.5	Vorbereitung der Messung	417
8.3.1	Messzeitpunkt	412	8.6.6	Gebäuderundgang	417
8.3.2	Die Luftdichtheitsschicht ist überdeckt – das Gebäude ist fertiggestellt	413	8.6.7	Messung – Aufnahme der Messreihen	417
8.3.2.1	Leckageortung	413	8.6.8	Beispiele von Messungen an großen Gebäuden	419
8.4	Der Messablauf	414	8.7	Messung hoher Gebäude	419
8.5	Luftdurchlässigkeitsmessung in Mehrfamilien- und Laubenganghäusern	414	9	Beurteilung von Luftleckagen in der Luftdichtheitsebene	420
8.6	Blower-Door-Messung bei großen Gebäuden	415	10	Literatur	421

**C 8 Zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode für Bestandsuntersuchungen im Holzbau: Wellenbasierte Methoden – Stand der Technik und Untersuchungsergebnisse 423**  
 Elena Perria, David Böhler, Mike Sieder

1	Theoretische Grundlagen	425	3	Experimentelle Ergebnisse zum Einfluss der Holzmerkmale auf die Schallgeschwindigkeit	444
1.1	Physikalische Grundlagen – Wellen	425	3.1	Problembeschreibung	444
1.1.1	Mechanische Wellen	425	3.2	Methode	446
1.1.2	Elektromagnetische Wellen	425	3.3	Materialien und Sortierung	447
1.2	Grundlagen zum Baustoff Holz	427	3.3.1	Geometrie	447
1.2.1	Holzanatomie	427	3.3.2	Sortierung der Proben	448
1.2.1.1	Struktur und Aufbau	427	3.4	Messung der Proben	449
1.2.1.2	Eigenschaften des Holzes	428	3.5	Auswertung der Versuchsergebnisse	450
1.2.1.3	Strukturveränderungen	428	3.5.1	Fichtenholz	450
1.2.1.4	Pilze und Mikroorganismen	429	3.5.2	Eichenholz	452
1.2.1.5	Insekten und Meeresorganismen	429	3.5.3	Zusammensetzung von bereichsweise ermittelten Schallwellengeschwindigkeiten	452
1.3	Schlussfolge	430	3.6	E-Modul	453
2	Wellenbasierte zerstörungsfreie Baustoffprüfmethode für Holz	430	3.6.1	Fichtenholz	453
2.1	Radar	431	3.6.2	Eichenholz	454
2.1.1	Grundlagen der Radartechnik	431	3.6.3	Schädigungstabellen	456
2.1.2	Physikalisches Messprinzip	431	4	Anwendungsbeispiel in der Praxis	459
2.1.3	Holzspezifische Einflüsse auf Radarmessungen	432	4.1	Einteilung der Messreihen auf der Balkenunterseite	459
2.1.4	Aussagekraft über mechanische Eigenschaften	434	4.2	Bestimmung der Roh-, Darrdichte und Holzfeuchte	460
2.2	Terahertz-Strahlung	434	4.3	Berechnung der Schallwellengeschwindigkeit und E-Modul	460
2.2.1	Grundlagen der Terahertz-Strahlungstechnik	434	4.4	Korrektur der Schallwellengeschwindigkeit	460
2.2.2	Physikalisches Messprinzip	434	4.5	Bewertung des Holzzustands	460
2.2.3	Holzspezifische Einflüsse auf Terahertz-Strahlungsmessungen	435	4.6	Bewertung der Tragfähigkeit über den dynamischen E-Modul	460
2.2.4	Aussagekraft über die mechanischen Eigenschaften	436	4.7	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	461
2.3	Schallwellenbasierte Messsysteme	437	5	Schlussfolgerung und Ausblick	461
2.3.1	Grundlagen der Schalltechnik	437	6	Literatur	462
2.3.2	Physikalisches Messprinzip	437			
2.3.3	Holzspezifische Einflüsse auf Terahertz-Strahlungsmessungen	437			
2.3.4	Aussagekraft über mechanische Eigenschaften	444			

## C9 Berechnungsverfahren von Holzrahmenbauteilen mit brandschutztechnischer raumabschließender Funktion 465

Sabine Scheidel, Sebastian Dienst, Tobias Götz, Oliver Kornadt

1	Einleitung	467	6	Untersuchungen zu additiven Berechnungsverfahren	482
2	Grundlagen	467	6.1	Hintergrund	482
2.1	Brandschutz	467	6.2	Brandversuche	482
2.2	Holzbau	470	6.2.1	Versuchsaufbau Brandversuche	482
3	Additive Berechnungsverfahren	472	6.2.2	Ergebnisauswertung Brandversuche	483
3.1	Additive Berechnungsverfahren	473	6.3	Berechnungsverfahren	484
3.1.1	Britisches Berechnungsverfahren	473	6.3.1	Nach DIN EN 1995-1-2 Anhang E	484
3.1.2	Kanadisches Verfahren	473	6.3.2	Nach Component Additive Method	485
3.1.3	Dänisches Verfahren	474	6.3.3	Ergebnisauswertung Berechnungsverfahren	487
3.2	Verfahren nach Joakim Norén	475	6.4	Simulationen	489
4	Aktuelle, europäische additive Berechnungsverfahren	476	6.4.1	Modulbeschreibung	489
4.1	Verfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010 Anhang E	476	6.4.2	Simulationsergebnisse	489
4.2	Component Additive Method	477	6.5	Auswertung der Ergebnisse	491
4.3	Berechnungsverfahren nach DIN ENV 1995-1-2	478	7	Weitere Schritte und Ausblick	494
5	Anwendung in der Praxis	480	8	Fazit	494
			9	Literatur	495

## D Konstruktive Ausbildung/Ausführungsplanung

### D1 Aufstockungen von Bestandsbauten 497

Maren Fath, Michael Storck, Mike Sieder, Annette Hafner

1	Aufstockungen – Allgemeines	499	4.2	Planungsaufwand von Anschlussdetails	506
2	Bestandsgebäude	499	4.3	Außenwand Aufstockung/Bestand	507
2.1	Potenzial verschiedener Bestandsgebäude für Aufstockungen	499	4.4	Loggien und Balkone	508
2.2	Eigenschaften von Bestandsgebäuden	500	5	Ökobilanzierung	510
3	Anforderungen an Aufstockungen	504	5.1	Grundlagen/ökologische Vorteile von Aufstockungsmaßnahmen	510
3.1	Wärmeschutz nach GEG	504	5.2	Ökologische Bilanzierung von Gebäuden	511
3.1.1	Winterlicher Wärmeschutz	504	5.3	Ökobilanz Aufstockungen	512
3.1.2	Sommerlicher Wärmeschutz	505	5.4	Berechnungsbeispiel	513
3.2	Feuchteschutz	505	5.4.1	Beschreibung der Aufstockungsmaßnahme	513
3.3	Schallschutz	505	6	Literatur	515
3.4	Brandschutz	505			
4	Anschlussituationen	506			
4.1	Allgemeine Hinweise	506			

### D2 Leichtes und nachhaltiges Bauen – Erfahrungen und Analysen im Kontext des Wettbewerbs

#### Solar Decathlon Europe 517

Frauke Rottschy, Jan Martin Müller, Karsten Voss

1	Einführung	519	2.2	Datenbasis und Auswertungsmethodik	524
2	Modulares und elementiertes Bauen	520	2.3	Ergebnisse	526
2.1	Randbedingungen beim Wettbewerb	522	2.4	Projektbeispiele	530
2.1.1	Anforderungen an den Transport	523	2.4.1	IKAROS Bavaria – Team Rosenheim	
2.1.2	Zeitliche Beschränkung für Auf- und Abbau	524		SDE 2010	531

2.4.2	Nottingham H.O.U.S.E – Team Nottingham SDE 2010	533	3.3.2	Counter Entropy House – Team Aachen SDE 2012	545
2.4.3	home+ – Team Stuttgart SDE 2010	534	3.3.3	Habiter 2030 – Team Lille SDE 2019	546
2.4.4	Urcomante – Team Valladolid SDE 2010	536	3.4	Der Urban Mining Index zur Bewertung der Kreislaufkonsistenz	547
2.4.5	Lumen House – Team Blacksbury SDE 2010	536	3.4.1	Systematik	547
2.5	Zusammenfassung	537	3.4.2	Qualitätsstufen	547
3	Nachhaltiges und recyclinggerechtes Bauen	539	3.4.3	Bewertungsebenen	548
3.1	Der Gebäudebestand als Rohstofflager – Urban Mining	540	3.4.4	Umsetzung als Berechnungswerkzeug	549
3.2	Nachhaltigkeit als Disziplin im Solar Decathlon	542	3.4.5	Beispielhafte Ergebnisse	551
3.3	Projektbeispiele	543	3.5	Zusammenfassung	552
3.3.1	Ecolar – Team Konstanz SDE 2012	544	4	Ausblick	552
			5	Danksagung	553
			6	Literatur	553

**D3 Brandschutz bei hölzernen Bauteilen nach den nationalen Regeln und Brandschutzkonzepten bei hölzernen Bauwerken 555**

Michael Dehne, Dirk Kruse, Björn Kampmeier

1	Einleitung	557	2.6.1	Konstruktive Grundsätze für Holzfassaden in der Gebäudeklasse 4 und 5	563
2	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise – MHolzBauRL, Fassung Oktober 2020	558	2.6.1.1	Hinterlüftung/Nichtbrennbare Trägerplatte	563
2.1	Allgemeines	558	2.6.1.2	Horizontale Brandsperrern	563
2.2	Neuerungen der MHolzBauRL	559	2.6.1.3	Vertikale Brandsperrern	564
2.3	Anforderungen an Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 in Massivholzbauweise	560	2.6.2	Wirksame Löscharbeiten für die Feuerwehr	565
2.4	Oberflächen von Massivholzbauteilen	561	2.7	Installationen	565
2.5	Rauchdichtigkeit von raumabschließenden Massivholzbauteilen	561	2.7.1	Allgemeines	565
2.5.1	Rauchdichtigkeit von Massivholzwänden	561	2.7.2	Elektrische Leitungen	565
2.5.1.1	Rauchdichtigkeit von Elementfugen	561	3	Projektbeispiel: Brandschutzkonzept für ein Hochhaus in Holz-Hybrid-Bauweise in Heilbronn	565
2.5.1.2	Rauchdichtigkeit von Bauteilfugen	561	3.1	Beschreibung des Gebäudes	565
2.5.2	Rauchdichtigkeit von Geschossdecken	562	3.2	Erschließung für die Feuerwehr	566
2.6	Anforderungen an Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5	562	3.3	Flucht- und Rettungswege	567
			3.4	Anforderungen an die Konstruktion	567
			3.5	Anlagentechnischer Brandschutz	570
			4	Zusammenfassung	571
			5	Literatur	571

**D4 Nachhaltige Holzbrücken für Geh- und Radwege 573**

Wilfried Moorkamp, Leif A. Peterson, Thomas Uibel

1	Einleitung	575	3.4	Analyse des Brückenzustands	578
2	Motivation	575	4	Invention der Standardbrücken	582
3	Bestandsuntersuchungen	575	4.1	Anforderungen und Anwendungsbereiche	582
3.1	Holzbrücken in Deutschland	575	4.2	Standardtypen und Ausführungsvarianten	583
3.2	Holzbrücken in NRW	576	4.3	Bauteile und Anschlüsse	583
3.3	Analyse der NRW-Datenbasis	576			

5	Betrachtungen zur Nachhaltigkeit	587	6	Leitfäden für Planer und Bauherren	589
5.1	Grundlagen	587	7	Zusammenfassung	591
5.2	Umweltindikatoren	588	8	Literatur	591
5.3	Ökobilanz der Standardbrücken	588			

## **E Materialtechnische Tabellen**

### **E1 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz** 593 Nina Schjerve

1	Einleitung	595	2.4	Heizwerte	604
1.1	Relevanz von Materialdaten	595	2.5	Lagerungsdichte und m-Faktoren	611
1.2	Prüfverfahren ausgewählter Materialdaten	595	2.6	Luftbedarf	614
1.3	Einheiten und Einheiten- Konvertierung	596	2.7	Verbrennungseffektivität und Verbrennungsanteile	615
2	Stoffdaten	596	2.8	Zusätzliche Stoffdaten für Kunststoffe	619
2.1	Zündtemperaturen und Entzündungs- kriterien	596	2.9	Flächenbezogene Brandleistung und Brandentwicklung	622
2.2	Abbrand	601	3	Literatur	628
2.3	Brandausbreitung	603			

### **E2 Materialtechnische Tabellen** 631 Rainer Hohmann

1	Vorbemerkungen	633	3	Schallschutztechnische und akustische Kennwerte	673
2	Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	635	4	Literatur	685

### **Stichwortverzeichnis** 687



### 3.2.4.1 Berücksichtigung von Konvektionseffekten

Bild 12 zeigt drei Beispiele für Luftkonvektionen, die in Holzbaukonstruktionen auftreten können. Die wichtigste und in der Regel gewollte Konvektion betrifft die Hinterlüftung der äußeren Schalung. Sie soll der Austrocknung von Feuchte dienen, die entweder aus dem Raum oder durch Niederschlag in die Belüftungsebene eingedrungen ist. Allerdings kann bei hochgedämmten Bauteilen durch die Hinterlüftung nicht nur eine Trocknung, sondern auch eine zusätzliche Befeuchtung durch nächtliche Unterkühlung stattfinden. Welcher Effekt zu welcher Jahreszeit überwiegt, hängt von vielen Faktoren ab und kann nicht ohne genauere Analyse vorhergesagt werden. Deshalb ist es mehr als wünschenswert die Auswirkung einer Hinterlüftung mit einem entsprechenden Modell zu erfassen. WTA 6-2 [39] schlägt hierfür im Abschnitt 5.1 ein einfaches Modell vor, dass von einem konstanten Luftwechsel und von einer idealen Durchmischung der Außenluft mit der Luft im Spalt ausgeht. Dieses Modell liefert im Vergleich zu Messungen am Objekt recht zuverlässige Ergebnisse [11, 47].

Die Luftkonvektion von außen durch die Wärmedämmung bis hin zur inneren Beplankung, das sogenannte Wind-washing, führt im Winter in der Regel nicht zu einer Befeuchtung der Konstruktion, sondern wegen der geringen absoluten Feuchte der Außenluft eher zu einer Austrocknung. Wird der Effekt jedoch so stark, dass die raumseitige Oberfläche dadurch bis zum Taupunkt der Raumluft abkühlt, dann können durchaus Probleme entstehen. Bei nach dem Stand der Technik ausgeführten Konstruktionen sollte das allerdings nicht vorkommen. Allerdings hat dieser Effekt eventuell energetische Konsequenzen (Hinweise darauf z. B. in [48]), die unerwünscht sind und einer Abhilfe z. B. durch eine Winddichtheitsebene bedürfen. Feuchtetechnische Nachteile sind in unserer Klimazone, außer bei gekühlten Gebäuden, in der Regel jedoch nicht zu befürchten. Daher finden sich zu diesem Phänomen bisher keine Modellansätze in unseren Feuchteschutzrichtlinien.

Der umgekehrte Fall, wenn feuchte Luft aus dem Raum durch kleine Undichtheiten in die Konstruktion eindringt und an einer anderen Stelle wieder austritt, ist

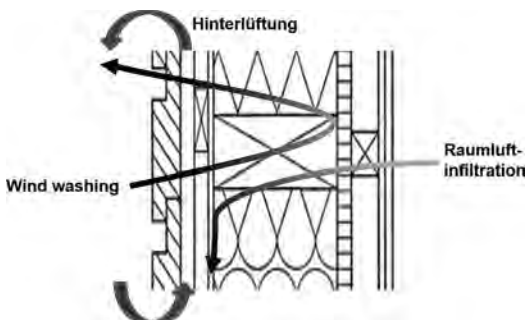


Bild 12. Luftströmungsphänomene in Leichtbaukonstruktionen

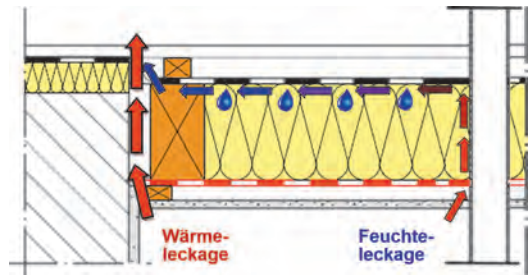


Bild 13. Verschiedene Strömungswege am Beispiel eines Flachdachs. Bei direkter Durchströmung des Bauteils, z. B. im Randanschlussbereich, könnte es sein, dass durch die Luftströmung der Strömungsweg erwärmt und es daher nicht oder nur zu einem geringen Tauwasseranfall kommt (Wärmeleckage). Bei einem längeren Strömungsweg durch das Bauteil wird sich die Luft jedoch auf der Kaltseite ausreichend abkühlen, sodass größere Mengen Tauwasser anfallen können (Feuchteleckage).

feuchtetechnisch jedoch von großer Bedeutung. Bild 13 zeigt am Beispiel eines unbelüfteten Flachdachs, dass die realen Verhältnisse in Bezug auf Undichtheiten und mögliche Luftströmungswege sehr komplex sind. Sie physikalisch korrekt, d. h. in ihrer dreidimensionalen Struktur zu erfassen, würde einen extremen Aufwand bedeuten. Außerdem müssten die Strömungswege zuvor messtechnisch genau identifiziert werden. Es liegt auf der Hand, dass dies praktisch nicht durchführbar ist. Deshalb müssen hier einige Modellannahmen getroffen werden. Die wesentlichste Vereinfachung ist die Überführung eines komplexen dreidimensionalen Luftströmungsphänomens in ein eindimensionales Kondensationsmodell. Dabei wird ähnlich wie bei der Dampfdiffusion davon ausgegangen, dass die Tauwasserbildung gleichmäßig über die gesamte Kaltseite des Bauteils stattfindet. Diese Annahme hat sich aufgrund der Ergebnisse in [19] als durchaus realistisch erwiesen.

Wie in [49] dargelegt, wird die Tauwassermenge für jeden Rechenschritt aus dem eindringenden Dampfkonzentrationsstrom und der Dampfkonzentrationsdifferenz zwischen der Raumluft und der Sättigungsdampfkonzentration unter den Taupunktbedingungen auf der Innenoberfläche der Kaltseite des Bauteils, also z. B. an der äußeren Beplankung, bestimmt. Der Dampfkonzentrationsstrom wiederum errechnet sich aus der Luftdurchlässigkeit des Bauteils und der Luftdruckdifferenz zwischen dem Raum und der Außenluft. Solche Luftdruckdifferenzen treten entweder im Winter durch die Beheizung von Gebäuden auf oder durch Windströmung. Letztere wirkt meist nur kurzzeitig ein und ist stark von der Geometrie und Exposition des Gebäudes abhängig. Es gibt meist auch keine großen Unterschiede zwischen Sommer und Winter. Das ist bei der auftriebsbedingten Strömung anders. Hier wirkt im Winter eine näherungsweise gleichbleibende Druckdifferenz

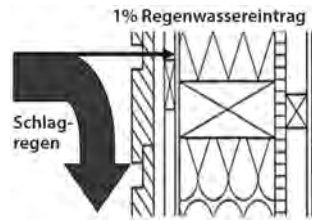
ferenz, die im Sommer aufgrund der Temperaturangleichung zwischen innen und außen zum Erliegen kommt. Neben der relativ einfach zu bestimmenden Druckdifferenz durch thermischen Auftrieb im Winter können auch noch z. B. durch eine Lüftungsanlage mechanisch induzierte Druckdifferenzen auftreten. Diese sollten ebenfalls berücksichtigt werden.

Wenn man aus den genannten Gründen den Windeinfluss vernachlässigt, bleibt als einzige Unbekannte die Luftdurchlässigkeit des Bauteils übrig. Dabei sind die in Bild 13 dargestellten Feuchteleckagen maßgeblich. Bei professionell abgedichteten Konstruktionen sind in der Regel alle verbleibenden Undichtheiten dieser Kategorie zuzuordnen, d. h. die Luftdurchlässigkeit des Bauteils könnte mit einer entsprechenden bauteilbezogenen Differenzdruckanlage direkt gemessen werden. Bei Wohngebäuden liegt sie etwa bei 5% bis 10% der gesamten Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. Das Dampfkonvektionsmodell im Abschnitt 5.2 des WTA-Merkblatts 6-2 [39] schlägt hier einen Wert vor, der bei Flachdächern von Einfamilienhäusern eine konvektive Tauwasserbildung zur Folge hat, die der Trocknungsreserve für Dächer von  $250 \text{ g/m}^2$  in der DIN 68800-2 entspricht. Alternativ kann die Luftdurchlässigkeit des Bauteils auch auf Basis der Summe einzelner kleiner Undichtheiten, wie in [50] beschrieben, ermittelt werden.

Im Gegensatz zur Luftkonvektion durch thermischen Auftrieb sind die Luftdruckdifferenzen durch Wind bei uns das ganze Jahr über im Monatsmittel ähnlich groß, d. h. es gibt hier keinen ausgeprägten saisonalen Effekt. Das bedeutet, dass die Differenzdrücke durch Wind sowohl zu einer Befeuchtung im Winter als auch zur Trocknung im Sommer beitragen können. Es gibt Hinweise darauf, dass die windinduzierte Austrocknung im Sommer und zum Teil auch in den Übergangszeiten den auftriebsbedingten winterlichen Feuchteintrag kompensieren können. Deshalb ist das derzeitige Infiltrationsmodell (ohne Windeinfluss) als konservativ zu betrachten. Zur Weiterentwicklung des Infiltrationsmodells sind allerdings weitere Forschungsanstrengungen notwendig.

### 3.2.4.2 Berücksichtigung von Regenwasserpenetration

Weit verbreitete und zum Teil erhebliche Feuchteschäden in den 90er Jahren an Holzwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen in Nordamerika haben die Fachwelt wacherüttelt und nach den Ursachen suchen lassen. Dabei wurde relativ schnell klar, dass die Gründe nur in sehr geringem Umfang mit der Dampfkonvektion zu tun hatten. Vielmehr waren die Schäden auf Regenwasserpenetration im Bereich der Fensteranschlüsse (meist am Fensterbrett) zurückzuführen [51]. Deshalb wurden auch die hydrothermischen Modelle zur Feuchteschutzbeurteilung von Außenwandkonstruktionen entsprechend angepasst. In der ASHRAE Norm 160 [52] zur Feuchteschutzbeurteilung durch hy-



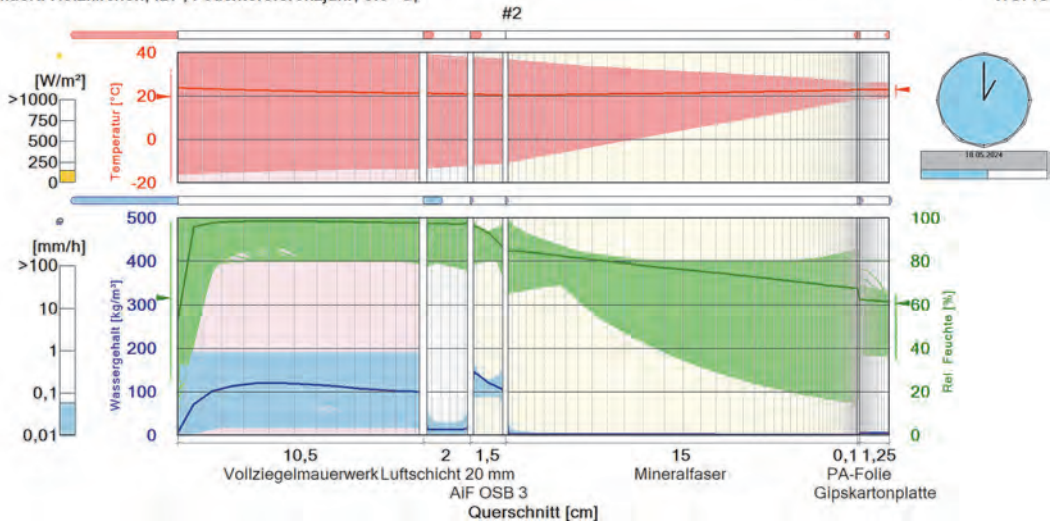
**Bild 14.** In der ASHRAE Norm zur Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen durch hydrothermische Simulation [52] wird empfohlen, den Schlagregeneinfluss bei Außenwänden zu berücksichtigen, indem man eine kleine Menge (1 %) des auf die Fassade auftreffenden Schlagregens auf die nächstliegende Bauteilschicht hinter der äußeren Wetterschutzschale aufbringt.

grothermische Simulationsmodelle wird daher folgendes empfohlen: Wie in Bild 14 dargestellt, soll bei Außenwandkonstruktionen ein kleiner Teil des Schlagregens auf die Oberfläche der nächsten Bauteilschicht hinter der äußeren Bekleidung aufgebracht werden. Das ist in der Regel die äußere Witterungsschutzbahn, im Fall eines WDVS ohne Drainage wäre das jedoch die Oberfläche der Unterkonstruktion, d. h. die äußere Beplankung. Falls keine Versuchsergebnisse zur Schlagregendichtheit der äußeren Bekleidung vorliegen, soll die aufgebrachte Wassermenge einem Prozent des an der Fassade ankommenden Schlagregens entsprechen. Neue Lösungen, wie eine spezielle Abdichtungstechnik im Fensteranschlussbereich, bringen eine deutliche Verbesserung aber ein geringer Eintrag von Schlagregengeuchte kann dennoch nie zu 100 Prozent ausgeschlossen werden. Allerdings liegt der Feuchteintrag hier deutlich unter den genannten ein Prozent des auftreffenden Schlagregens, was auch durch Beregnungsversuche nachgewiesen werden kann.

Da nach den großen Schadensereignissen in Nordamerika auch in Europa und anderen Teilen der Welt ähnliche Probleme mit der Schlagregenpenetration von gedämmten Außenwänden aufgetreten sind, wurde der amerikanische Ansatz in den Abschnitt 5.3 des WTA-Merkblatts 6-2 [39] übernommen. Eine Literaturstudie über Regenwasserpenetrationsuntersuchungen für Mauerwerksvorsatzschalen in [53] hat ergeben, dass der Wert von einem Prozent des Schlagregens für solche Konstruktionen ganz gut passt. Andere Studien an Außenwänden mit hinterlüfteten Bekleidungen [54] kommen zu dem Schluss, dass der Regenwasserpenetrationsansatz in ASHRAE 160 von 1% eher etwas konservativ ist, d. h. für diese Außenwandkonstruktionen auf der sicheren Seite liegt. Wendet man diesen Ansatz auf massive Außenwände mit WDVS in Europa an [55], zeigt sich, dass das Aufbringen von einem Prozent der Schlagregenmenge direkt auf die Oberfläche des Mauerwerks selbst bei hoher Schlagregenbeanspruchung keinerlei negative Auswirkungen auf die Feuchte im Mauerwerk hat. Sie bleibt trotz des Regenwassereintrags unter der Gleichgewichtsfeuchte des

Klimaort: Holzkirchen; IBP, Feuchtereferenzjahr; 0,0 °C;

WUFI®



**Bild 15.** Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer nach Westen orientierten zweischaligen Außenwand mit Holz-Tragkonstruktion im Verlaufe des Monats Mai. Der Wassergehalt in der Außenschale erreicht niederschlagsbedingt hohe Werte bis hin zur freien Wassersättigung des Mauerwerks, was trotz Luftspalt auch zu einer entsprechenden Befeuchtung der dahinter liegenden OSB führt.

Mauerwerks bei 80% relativer Feuchte (praktischer Baufeuchtegehalt). Das erklärt auch, warum es bei außen gedämmten Mauerwerkswänden kaum nennenswerte sichtbare Probleme gibt.

### 3.2.5 Simulationsergebnisse und deren Interpretation

Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtfelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen ausgegeben. Aus diesen Ergebnissen können sowohl die langfristigen Verläufe der hygrothermischen Kenngrößen Temperatur, relative Feuchte und Wassergehalt an verschiedenen Positionen im Bauteil als auch deren örtliche Verteilungen (Profile) zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden. Eine zweckmäßige und anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. Bild 15 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Simulation des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

#### 3.2.5.1 Feuchtebilanz

Die Beurteilung der Ergebnisse von hygrothermischen Simulationsberechnungen erfordert etwas Erfahrung. Ähnlich wie bei der Beurteilung nach *Glaser* kommt es darauf an, dass sich in der Konstruktion langfristig kein Wasser ansammelt. Deshalb wird zunächst der Verlauf des Gesamtwassergehalts analysiert. Wenn es

hier zu einer permanenten Akkumulation in relevantem Umfang kommt, ist das bereits ein KO-Kriterium. Wenn der Gesamtwassergehalt fällt oder von Jahr zu Jahr gleich bleibt, ist die Voraussetzung für eine weiterführende Auswertung gegeben, d. h. dann werden die hygrothermischen Verhältnisse in den einzelnen Materialschichten sowie an den Oberflächen und Materialgrenzen betrachtet.

#### 3.2.5.2 Relevante Bewertungskriterien für den Holzbau

Für den Holzbau gibt es bereits einige Bewertungskriterien, die aus langjährigen Erfahrungen und aus der stationären Dampfdiffusionsberechnung stammen. Allerdings besteht derzeit noch eine gewisse Diskrepanz zwischen der Genauigkeit der hygrothermischen Simulation, die Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit meist stündlicher Auflösung zur Verfügung stellt und den in der Praxis etablierten, meist stark vereinfachten stationären Grenzwerten. Diese beziehen sich z. B. bei Schimmel oder Holzfäule ausschließlich auf ein bestimmtes Feuchteniveau ohne dessen Einwirkdauer, die gleichzeitig auftretende Temperatur oder die Sensitivität des jeweiligen Materials adäquat zu berücksichtigen. Die Anwendung solcher Grenzwerte führt dann im besten Fall zu Konstruktionen mit großen Sicherheitsreserven, im ungünstigsten Fall dazu, dass gut funktionierende, gegebenenfalls sogar nachweisfreie Bauteile ausgeschlossen würden. Um dieses Problem zu lösen, wurden in den letzten Jah-

ren zahlreiche Anstrengungen unternommen, um die Bewertungskriterien analog zu den genaueren Berechnungsverfahren zu verfeinern. Anspruch und Ziel ist dabei, nicht nur die Feuchteverhältnisse, sondern auch deren Bewertung so realitätsnah wie möglich zu gestalten.

In diesem Abschnitt werden zunächst die einfachen Grenzwerte erläutert, die bei einer Bewertung natürlich immer auch berücksichtigt und wenn möglich eingehalten werden sollten. Es wird aber auch auf bereits verfügbare oder in Bearbeitung befindliche verfeinerte Bewertungsmöglichkeiten verwiesen, die in anderen Abschnitten ausführlicher behandelt werden.

Die relative Feuchte, die von Biologen auch als Wasseraktivität bezeichnet wird, ist die für die meisten Schadensmechanismen maßgebliche Feuchtegröße. Sie beschreibt, wie stark das Wasser an die Poren- oder Faserstruktur des Materials durch Sorptionskräfte gebunden ist. Unterhalb von etwa 70 bis 80 % r. F. ist diese Bindung so stark, dass das Wasser kaum für chemische oder für biologische Prozesse „genutzt“ werden kann – werden diese Feuchtwerte also nicht überschritten, können in den Konstruktionen eigentlich gar keine Schäden auftreten. Ausnahme sind hier nur Spannungen oder Risse aufgrund von Schwinden des Materials bei sehr trockenen Bedingungen. Oberhalb von etwa 95 % r. F. spricht man dann vom sogenannten Kapillarwasserbereich, bei dem die Bindungskräfte nur noch schwach sind und dementsprechend in den Poren zunehmend flüssiges Wasser vorliegt, dass vergleichsweise leicht entzogen werden kann.

Der Feuchtebereich unterhalb von 80 % r. F. gilt im Baubereich als relativ sicher, da mikrobielles Wachstum, wenn überhaupt dann nur sehr langsam in Gang kommen kann. Diese Grenze kann bei geeigneter Auslegung der Konstruktion auf der Raumseite des Bauteils i. d. R. gut eingehalten werden. Praktisch unmöglich ist dies dagegen bei nahe am Außenklima liegenden Schichten, da die Außenluftfeuchte vor allem im Winter regelmäßig Werte über 90 oder sogar über 95 % r. F. erreicht. Dies führt bei längerer Einwirkdauer und diffusionsoffener Bauweise zu ebenso hohen Feuchten in den Materialien. In diesem Bereich ist eine generelle Begrenzung auf 80 % r. F. also nicht sinnvoll, unwirtschaftlich oder manchmal sogar kontraproduktiv. In einigen Ländern wie z. B. in Schweden wird eine derartige Begrenzung in den Normen trotzdem ohne geeignete Differenzierung gefordert, was den Planer vor nahezu unlösbare Aufgaben stellt oder zwingt, die Anforderung mit entsprechend guter Begründung zu umgehen. Auch in der ersten Version der ASHRAE Norm 160 [52] lag das Grenzkriterium für Oberflächen innerhalb eines Bauteils bei einem Monatsmittel von 80 % r. F. mit der Folge, dass eine Reihe von bewährten Konstruktionen die Feuchteschutzbeurteilung nicht bestanden haben. In der aktuellen Version wurde das allerdings korrigiert und durch das Schimmelpilzwachstumsmodell von *Viitanen* [26] ersetzt.

### 3.2.5.3 Feuchteverhältnisse an den Oberflächen

An den raumseitigen Oberflächen sowie im Bereich von Luftschichten in den wärmeren Bereichen eines Bauteils besteht die Gefahr von Schimmelpilzbildung, wenn bestimmte Temperatur- und Feuchtegrenzen überschritten werden. Bei Einhaltung von 80 % r. F. ist ein Schimmelrisiko im Winter sicher ausgeschlossen. Bei Überschreitung dieses Werts oder bei längerfristigem Auftreten von hohen relativen Feuchten in Kombination mit hohen Temperaturen kann dagegen Schimmelpilzbildung nicht mehr sicher ausgeschlossen werden – zur Überprüfung kann in diesen Fällen eine temperaturabhängige oder auch instationäre Bewertung des Wachstumsrisikos mit dem biogyrothermischen Modell nach *Sedlbauer* [24, 70] oder mit dem VTT-Modell von *Viitanen* [25, 52] erfolgen. Außerhalb der Luftdichtheitsebene bzw. auf der Kaltseite der Konstruktion ist eine Bewertung des Schimmelrisikos i. d. R. nicht erforderlich, da andere Schadensmechanismen dominant sind und die Modelle hier auch meist sehr weit auf der sicheren Seite liegen – abschätzende oder vergleichende Bewertungen sind aber auch in solchen Bereichen mit gewissen Einschränkungen möglich.

### 3.2.5.4 Holzfeuchte

Zur Beurteilung der Wassergehalte in den einzelnen Schichten ist ein Vergleich mit den Grenzwassergehalten für die einzelnen Baustoffe zweckmäßig, sofern diese bekannt sind. Bei Holz wird meist eine Grenze der Holzfeuchte von 20 M.-% gefordert, so z. B. in [32]. Dieser Grenzwert sollte zumindest langfristig und in nach außen diffusionshemmenden geschlossenen Konstruktionen auch möglichst eingehalten werden. Bei Bauteilen, bei denen sich z. B. die Schalung oder Latung im nahen Kontakt mit der Außenluft befindet, werden dagegen im Winter bei hohen Außenluftfeuchten auch regelmäßig Holzfeuchten von deutlich über 20 M.-% erreicht. Da diese Werte aber nur temporär und bei niedrigen Temperaturen auftreten, bleiben sie ohne negativen Effekt, da holzerstörende Pilze bei diesen Bedingungen gar nicht oder nur extrem langsam wachsen können. Werden die 20 M.-% also überschritten, ist eine genauere Bewertung zum Beispiel mit dem im WTA-Merkblatt 6-8 [62] möglich. Auf dieses Merkblatt wird auch im Anhand D der DIN 4108-3 verwiesen. Sein Inhalt wird in Abschnitt 3.4.2 genauer beschrieben.

### 3.2.5.5 Holzwerkstofffeuchte

Bei Holzwerkstoffen nach EN ISO 13986 [79] ist aus Festigkeitsgründen für die meisten Materialien ein niedrigerer Grenzwert der Holzwerkstofffeuchte von 18 M.-% im Feuchtbereich bzw. 21 M.-% im Außenbereich einzuhalten. In der Einleitung der DIN 68800-2 [33] steht, dass diese Vorgaben für tragende



Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen gelten, allerdings für alle anderen Bauteile ebenfalls empfohlen werden. Zumindest für Faserdämmungen oder Dämmplatten in nach außen diffusionsoffenen Konstruktionen besteht auf der Außenseite der Bauteile jedoch das gleiche Problem der hohen Umgebungsfeuchte wie zuvor für Holzbeplankungen erwähnt: Die Materialien sorbieren Feuchte aus der Außenluft und erreichen Werte, die über den zulässigen stationären Wassergehaltsgrenzen liegen. Genauere Bewertungsmodelle und Grenzwerte für verschiedene Arten von Holzwerkstoffen sind derzeit allerdings noch Gegenstand der Forschung, sodass bei Überschreiten von 18 M.-% bzw. 21 M.-% derzeit mit dem Hersteller zu klären ist, ob das Material für solche Feuchten geeignet ist und ob der Hersteller eine entsprechende Gewährleistung übernimmt.

### 3.2.5.6 Tauwasserbildung innerhalb des Bauteils

Für feuchteunempfindliche Faserdämmstoffe wie Mineralfaser ist zu beachten, dass Tauwasserbildung im Winter z. B. im Flachdach unter der Dachabdichtung temporär zulässig ist, die Menge aber so gering bleiben sollte, dass das Wasser nicht aus der Konstruktion ablaufen kann. In DIN EN ISO 13788 [36] wird darauf hingewiesen, dass bei Tauwasserbildung an dichten Schichten ab ca. 200 g/m<sup>2</sup> das Risiko für das Abfließen des Wassers besteht. Dieser Wert hat sich auch bei Laborversuchen mit Mineralfaserdämmung auf Blechuntergrund bestätigt [60]. Ob bei entsprechender Rückhaltekapazität der Faserstruktur materialabhängig auch höhere Werte akzeptabel sind und wie diese Eigenschaft im Labor gemessen werden kann, wird derzeit genauer untersucht. Solche Ergebnisse verdeutlichen, dass Grenzkriterien aus dem vereinfachten deutschen Periodenbilanzverfahren (*Glaser*) wie z. B. 500 g/m<sup>2</sup> an nicht wasseraufnahmefähigen Schichten nicht auf die Ergebnisinterpretation von hygrothermischen Simulationen übertragbar sind.

Falls Tauwasser bei Umkehrdiffusion im Sommer auf der Außenseite der Dampfbremse auftritt, gelten im Prinzip die gleichen Regeln – allerdings sollte hier bei hohen Temperaturen im Sommer das Feuchteniveau aufgrund des mit der Temperatur ansteigenden Schimmelpilzwachstumsrisikos deutlich niedriger bleiben.

### 3.2.5.7 Wassergehaltsgrenzwerte für mineralische Baustoffe

Da auch im Holzbau mineralische Baustoffe wie Putze, Gipsfaserplatten etc. eingesetzt werden bzw. Holzbau- teile auch im Massivbau Anwendung finden, soll hier zum Schluss auch auf die feuchtetechnischen Grenzwerte dieser Baustoffe eingegangen werden. Für die meisten mineralischen Baustoffe gibt es bisher im Unterschied zu Holz und Holzwerkstoffen in der Regel keine vergleichbaren allgemeingültigen Grenzwerte für den maximalen Wassergehalt. Hier müssen andere Überlegungen angestellt werden, wie z. B., dass

das Wasser in potenziell frostempfindlichen Materialien nicht gefrieren soll. Basierend auf dieser Anforderung wird z. B. im WTA-Merkblatt 6-5 zur Bemessung von Innendämmsystemen auf Mauerwerk [56] für nicht frostbeständige Materialien im Bereich zwischen Dämmung und ursprünglicher Wand ein maximaler Durchfeuchtungsgrad von 30% bzw. eine maximale relative Luftfeuchte in den Poren des Materials von 95% r. F. angegeben. Wird diese Grenze nicht überschritten, gilt die Innendämmung als sicher. Falls dieser Grenzwert nicht eingehalten werden kann, müssen frost- und fäulnisbeständige Materialien eingesetzt oder bei einer genaueren Analyse der Feuchteauswirkungen z. B. die erreichten Wassergehalte mit materialspezifischen Feuchtegrenzwerten der Hersteller verglichen werden. Da die Thematik der Frostsicherheit für die Holzkonstruktionen allerdings weitgehend irrelevant ist, wird dies hier nicht weiter behandelt. Neben Kriterien zur Frostsicherheit sind bei einigen mineralischen Baustoffen, z. B. solche, die Gips oder Kalk enthalten, weitere Kriterien zu beachten. Hohe Wassergehalte können hier eine Veränderung der Kristallstruktur bewirken, wodurch sie an Festigkeit einbüßen.

## 3.3 Feuchteschutz nach Holzschutznorm DIN 68800-2

Der Feuchte- und damit Holzschutz ist zentraler Bestandteil der beiden Regelwerke DIN 68800-1 [32] und DIN 68800-2 [33]. Das grundlegende Prinzip der Norm hat sich seit mehreren Jahrzehnten bewährt: Mit den sogenannten „grundlegenden baulichen Maßnahmen“, die immer angewendet werden müssen, und den „besonderen baulichen Maßnahmen“ wird die niedrigste Gebrauchsklasse (GK 0) angestrebt. Neben vielen organisatorischen (u. a. Schutz des Holzes in der Bauphase, max. Einbaufeuchte) und konstruktiven Maßnahmen (u. a. dauerhaft wirksamer Witterungsschutz, entsprechende Sockelausbildung) zählt der Nachweis des Feuchteschutzes zu den zentralen Elementen des Holzschutzes.

Wie in der Feuchteschutznorm, gibt es in der Holzschutznorm drei mögliche Nachweisverfahren:

- vereinfachter Nachweis mit der Einhaltung von inneren und äußeren  $s_d$ -Werten sowie bewährte Bauteilaufbauten,
- rechnerischer Nachweis nach DIN 4108-3 mittels vereinfachter Diffusionsbilanz unter Berücksichtigung der Trocknungsreserve und
- Nachweis mittels hygrothermischer Simulation nach EN 15026 bzw. DIN 4108-3 Anhang D unter Berücksichtigung aller dynamischen Effekte (Verschattung, Luftundichtheiten etc.).

Gegenüber der DIN 4108-3:2001 änderte sich in der DIN 68800-2:2012 die Art der Nachweisführung. Der Fokus bei dem vereinfachten Diffusionsnachweis (*Glaser*-Verfahren) für Holzbauteile liegt nicht mehr auf der Vermeidung von Tauwasser, sondern auf einer

möglichst hohen Trocknungsreserve. Dieser Ansatz wurde bereits 1999 in [61] veröffentlicht.

### 3.3.1 Berücksichtigung und Gründe für eine Trocknungsreserve

Die Trocknungsreserve ist die Differenz zwischen der Tauwassermenge ( $M_t$ ) im Winter und der möglichen Trocknungsmenge im Sommer ( $M_{ev}$ ). Diese muss bei der vereinfachten Diffusionsbilanz bei Wänden und Decken mindestens  $100 \text{ g/m}^2$  und bei Dächern mindestens  $250 \text{ g/m}^2$  betragen. Dass Decken zu unbeheizten Dachgeschossen nur  $100 \text{ g/m}^2$  Trocknungsreserve aufweisen müssen, ist fachlich nicht begründbar. Sie sind genauso wie Dächer durch Konvektion gefährdet und bedürfen der gleichen Trocknungsreserve wie Dächer. Tritt in der vereinfachten Diffusionsbilanz nach DIN 4108-3 kein Tauwasser auf, ist zu beachten, dass dies noch keine hohe Trocknungsreserve bedeutet. Daher wird in diesem Fall die potentielle Verdunstungsmenge von der Baustoffgrenze im Bauteil berechnet, an der die Differenz zwischen Sättigungsdampfdruck und Wasserdampfteildruck am geringsten ist. In der Regel ist dies auf der kalten Seite der Dämmung der Fall. Dies wird seit 2016 im WTA-Merkblatt 6-8 [62] gefordert, ist aber bisher nur in wenigen Softwareprogrammen umgesetzt.

Den Sinn der Trocknungsreserve verdeutlichen die Ergebnisse in Tabelle 3. Alle Aufbauten sind innen dichter als außen (Verhältnis  $s_{d,i}/s_{d,e} \sim 7$  – siehe Bild 16) und wären nach der alten Fassung der DIN 4108-03 von 2001 zulässig. Hiernach wurden in der Vergangenheit vielfach „Dicht-Dicht-Bauteile“ freigegeben, die nur wenige Gramm pro Quadratmeter Trocknungsreserve aufwiesen. Mit fatalen Folgen, wie viele Schadensfälle bis heute belegen. Mit zunehmenden  $s_d$ -Werten sinkt die Trocknungsreserve. Während die ersten beiden Aufbauten hohe Trocknungsreserven aufweisen und damit als „robust“ bezeichnet werden können, werden die Aufbauten in Zeile 3 und 4 zu dicht, sodass die geforderte Trocknungsreserve nicht erreicht wird. Sie sind mit der vereinfachten Diffusionsbilanz nicht nachweisbar und damit nicht mehr zulässig.

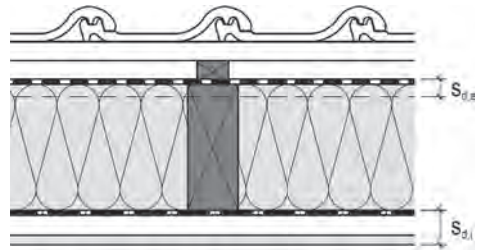
**Tabelle 3.** Einfacher Dachaufbau mit 240 mm Mineralfaser; hier als verschattetes Dach (wie Wand) gerechnet

$s_{d,i}$	$s_{d,e}$	Tauwassermenge <sup>a)</sup>	Verdunstungsmenge	Trocknungsreserve <sup>b)</sup>	Zulässig
[m]	[m]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	
2,0	0,3	86 (192)	2939 (2293)	2853 (2101)	Ja
10,0	1,5	27 (46)	594 (464)	567 (418)	Ja
30,0	4,0	6 (14)	220 (172)	214 (158)	Nein
140,0	20,0	3 (2)	35 (44)	32 (42)	Nein

a) zulässige Tauwassermenge:  $500 \text{ g/m}^2$

b) min. zulässige Trocknungsreserve  $250 \text{ g/m}^2$

(Klammerwerte: Ergebnis mit Blockklima DIN 4108-3:2001)



**Bild 16.** Definition der inneren ( $s_{d,i}$ ) und äußeren ( $s_{d,e}$ ) wasserdampffäquivalenten Luftschichtdicke ( $s_d$ -Wert); gestrichelte Linie: unter der Unterdeckbahn kann sich bspw. noch eine Holzschalung befinden

**Tabelle 4.** Anforderungen an wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicken ( $s_d$ -Werte) bei Verzicht auf einen rechnerischen Nachweis

Zeile	$s_d$ -Wert außen ( $s_{d,e}$ )	$s_d$ -Wert innen ( $s_{d,i}$ )
1	$\leq 0,1 \text{ m}$	$\geq 1,0 \text{ m}$
2	$0,1 \text{ m} \leq s_d \leq 0,3 \text{ m}$	$\geq 2,0 \text{ m}$
3	$0,3 \text{ m} \leq s_d \leq 2,0 \text{ m}$	$6 \times s_{d,e}$
4	$2,0 \text{ m} \leq s_d \leq 4,0 \text{ m}^{\text{a)}$	$6 \times s_{d,e}^{\text{a)}$

a) Nur bei beidseitig bekleideten oder beplankten, werkseitig hergestellten Elementen oder bei einer nachgewiesenen Luftdichtheit (inkl. Leckageortung) von  $q_{50} \leq 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$

Die hier dargestellten Ergebnisse des Daches berücksichtigen die Neuerung in der Norm, dass bei hellen Außenoberflächen und/oder Verschattungen von Dächern, die ungünstigeren Klimarandbedingungen von Wänden anzusetzen sind. Damit reduziert sich die Trocknung des Bauteils im Sommer. Auch eine über 20 Jahre alte Forderung [61], die nun umgesetzt wurde.

Einfach zusammengefasst bedeutet die Beachtung der Trocknungsreserve: „So diffusionsdicht wie nötig (zur Begrenzung des Tauwasserausfalls) und so diffusionsoffen wie möglich (zur Erzielung eines hohen Verdunstungspotentials)“ [57]

Das Ziel, auf der Außenseite möglichst diffusionsoffene Bauteile mit einem hohen Trocknungspotenzial zu erreichen, ist auch in der Holzschutznorm [33] festgelegt. Die Tabelle 4 kann für die sogenannten „nachweisfreien Bauteile“ herangezogen werden und wird in der nächsten Überarbeitung (voraussichtlich Dez. 2021) so oder ähnlich erscheinen und damit eine Angleichung an die DIN 4108-3 von 2018 [31] herstellen.

### 3.3.2 Hygrothermische Simulation für außen dampfdichte Bauteile

Aufgrund vermehrter Schäden bei außen dampfdichten Dächern (Metall und Flachdächer) wird seit 2012 in der Holzschutznorm für solche Dächer eine hygrothermische Simulation gefordert. Dort steht unter dem

Absatz 7.5: „*Flach geneigte oder geneigte, voll gedämmte, nicht belüftete Dachkonstruktionen mit Metalleindeckung oder mit Abdichtung auf Schalung oder Beplankung sind zulässig, sofern der Tauwasserschutz nach DIN EN 15026 nachgewiesen wird und nach 5.2.4 für den Gesamtquerschnitt gegeben ist. Individuelle Gegebenheiten, wie Standort, Farbe der Eindeckung und Verschattung sind im Nachweis zu berücksichtigen. ... Zusätzliche äußere Deckschichten (Bekiesung oder Begrünung), Dämmschichten oberhalb der Beplankung oder Schalung sowie raumseitige Bekleidungen sind zulässig, sofern sie im Einzelnachweis auf Basis von DIN EN 15026 mitberücksichtigt werden.*“ [33]

Um auch bei der hygrothermischen Simulation die Konvektion durch Luftundichtheiten zu berücksichtigen, ist der konvektive Feuchteeintrag entsprechend der geplanten Luftdurchlässigkeit mit dem  $q_{50}$ -Wert nach DIN 4108-7 mit der dazugehörigen Gebäudehöhe in Rechnung gestellt. Dabei handelt es sich aber nicht um die  $250 \text{ g/m}^2$ , wie in der vereinfachten Diffusionsbilanz nach Glaser [64], sondern um einen dynamischen Feuchteeintrag [49]. Der Feuchteeintrag hängt sowohl von dem Bauteilaufbau als auch den Randbedingungen ab und kann mehr oder weniger als die  $250 \text{ g/m}^2$  ergeben. Während beispielsweise eine Überdämmung zu einer geringeren konvektiven Feuchtequelle führt, können durch große Gebäudehöhen oder Überdruck durch eine Lüftungsanlage auch höhere Feuchteinträge hervorgerufen werden.

### 3.4 Regeln für die hygrothermische Simulation von Holzbauteilen nach WTA

Das WTA-Merkblatt 6-8 zur hygrothermischen Bemessung von Holzbauteilen [62] entstand im Nachgang zur Holzschutznorm. Planer(innen), die bis dahin hygrothermische Simulationen betrieben, mussten viele eigene Annahmen treffen, die sie aus der vorhandenen Literatur entnehmen konnten. Ein einheitliches Vorgehen gab es in Teilbereichen noch nicht. Daher wurde die international, zusammengesetzte WTA-Gruppe „Hygrothermische Bemessung von Holzkonstruktionen“ gegründet, um einen einheitlichen Standard zu schaffen. Dabei flossen die Erfahrungen der Expert(innen) aus der Schweiz, Österreich und Deutschland ein. So entstand die Überarbeitung des WTA-Merkblatts 6-2 [39] und das neue WTA-Merk-

blatt-6-8 [62]. Es werden im Folgenden nur die beiden Teilbereiche „Verschattung“ und „Bewertung“ herausgegriffen und ausführlich erläutert.

#### 3.4.1 Verschattung

Bei der Berechnung von Bauteilen, in der Regel bei Flachdächern, kommt es immer wieder vor, dass die Verschattung berücksichtigt werden muss. Diese verursacht niedrigere Oberflächentemperaturen und damit eine geringe Rücktrocknung des Bauteilaufbaus. Die Verschattung kann man durch entsprechende Werkzeuge [58, 59] detailliert oder nach WTA-Merkblatt 6-8 [62] mit einem pauschalen Ansatz berücksichtigen.

Bei der detaillierten Betrachtung erhält man eine Klimadatei, die die reduzierte Diffus- und Direktstrahlung enthält. Bei dem vereinfachten Ansatz, werden hingegen die Strahlungsparameter der Oberfläche (Absorptionskoeffizient und Emissionskoeffizient) durch Verschattungsfaktoren angepasst, je nachdem ob nur eine vertikale (nebenstehendes Gebäude, Bäume usw.) oder horizontale Verschattung (z. B. geschlossener Terrassenbelag) vorliegt (Tabelle 5). Das Resultat beider Ansätze ist eine reduzierte Oberflächentemperatur.

Im Fall der vertikalen Verschattung wird die kurzwellige Einstrahlung (Absorption) reduziert, die langwellige Abstrahlung (Emission) allerdings kaum verändert, da die Oberfläche trotz eines nebenstehenden Gebäudes weitestgehend mit dem Himmel im Strahlungsaustausch steht.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Merkblatts lagen zur Größenordnung der Verschattungsfaktoren kaum Messungen vor, sodass ein ingenieurmäßiger Ansatz gesucht werden musste. Dabei bot sich an, die einfallende Strahlung auf die Nordseite eines Gebäudes (weitestgehend diffuse Strahlung) ins Verhältnis zur Gesamtstrahlung auf eine horizontale Fläche (diffuse und direkte Strahlung) zu setzen. Dabei ist festzustellen, dass die Verhältniszahl bei vielen Standorten im deutschsprachigen Raum bei ca. 0,4 (0,37–0,41) liegt. Der Wert wurde abgerundet und somit die auftreffende Gesamtstrahlung auf 35% reduziert.

Bei einer horizontalen Verschattung durch einen geschlossenen Terrassenbelag wird hingegen davon ausgegangen, dass die Oberfläche der Abdichtung bei der nächtlichen Abstrahlung nicht so stark unterkühlt wie der darüber liegende Belag. Auch staut sich ggf. die Wärme unter dem Belag. Daher wird der Emissions-

**Tabelle 5.** Vorschläge effektiver Strahlungsparameter für die Berücksichtigung von verschatteten Flachdächern in hygrothermischen Simulationen nach WTA 6-8

	Effektiver kurzwelliger Absorptionsgrad ( $a_e$ )	Effektiver langwelliger Emissionsgrad ( $\epsilon_e$ )
vertikale Verschattung: z. B. durch Häuser, Bäume, Balkonbrüstung, Attika	$0,35 \cdot a_{\text{Abdichtung}}$	$1,00 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$
Verschattung durch aufgeständerte PV-Module	$0,30 \cdot a_{\text{Abdichtung}}$	$0,50 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$
Horizontale Verschattung (u. a. Terrassenbelag)	$0,35 \cdot a_{\text{Belag}}$	$0,45 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$



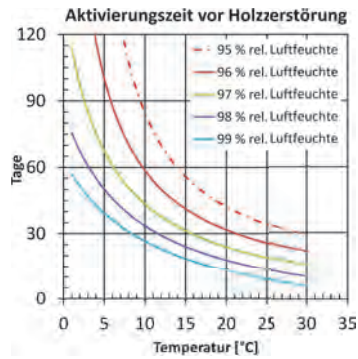
koeffizient auf 45 % reduziert, sodass die Abstrahlung in den freien Himmel geringer ausfällt. Messungen und Nachberechnungen [63] zeigen auch weitere Ansätze. Hier wird im Gegensatz zur WTA-Annahme der Absorptionskoeffizient auf 60 % reduziert, wohingegen der Emissionskoeffizient unverändert bleibt. Beide Ansätze kommen zu ähnlichen Ergebnissen.

### 3.4.2 Bewertung von Holz durch die Porenluft- und Holzfeuchte

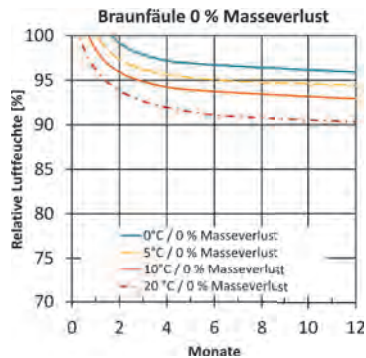
Holz ist in geschlossenen Bauteilen im Wesentlichen durch entsprechende holzerstörende Pilze gefährdet. Damit es in Holzbauteilen nicht zu Holzabbau durch Pilze kommt, hält die Holzschutznormung seit Jahrzehnten einen respektvollen Sicherheitsabstand bei der Beurteilung der Holzfeuchte. In der aktuellen DIN 68800-1 [32] steht: „*Unabhängig von dem tatsächlichen Feuchteanspruch Holze zerstörender Pilze sowie der Fasersättigungsfeuchte der verschiedenen Holzarten wird ... einer ausreichenden Sicherheit ein Wert von 20% Holzfeuchte als Obergrenze für das Vermeiden eines Pilzbefalls angesetzt.*“ Die genannten 20 M.-% sind folglich eine mit Sicherheit behaftete Größe. Der Bereich zwischen 20 M.-% und Fasersättigungsfeuchte (bei heimischen Nadelhölzern ca. 30 M.-%) ist letztendlich unscharf und ungeeignet für die Auswertung von hygrothermischen Berechnungen. Daher war es für das WTA-Merkblatt erforderlich, eine Bewertung für hygrothermische Berechnungen zu erarbeiten.

In einem Großteil der Literatur über holzerstörende Pilze wird allerdings kein Zusammenhang zwischen Temperatur, massebezogener Holzfeuchte bzw. relativer Luftfeuchte und der Einwirkungszeit des Klimas hergestellt. Lediglich *Viitanen* und *Ritschkoff* entwickelte vor der Jahrhundertwende aus Laborversuchen ein Bewertungsmodell [65, 66], dass zum einen alle Einflüsse berücksichtigt und zum anderen für die dynamische Auswertung geeignet ist. 1991 stellen *Viitanen* und *Ritschkoff* bei Laborversuchen fest, dass holzerstörende Pilze (Braunfäule wie Echter Hausschwamm, Kellerschwamm etc.) eine „Aktivierungsfeuchte“ benötigen, die sich bei mind. 95 % rel. Luftfeuchte einstellt (Bild 17). Umgerechnet in Holzfeuchte bedeutet dies bei einheimischen Bauhölzern ca. 25–28 M.-%. Die Aktivierungsfeuchte, die auch eine gewisse Zeit vorhanden sein muss, kann damit erklärt werden, dass eine erhöhte Feuchte zur Auskeimung der Pilzsporen erforderlich ist. Je nach Temperatur dauert es unterschiedlich lang (Bild 17). So beginnt das Auskeimen bei bspw. 10 °C und 95 % rel. Luftfeuchte erst nach knapp 85 Tagen. Bei höheren Temperaturen (20 °C) halbiert sich die Zeit bis zur Auskeimung (40 Tage). Somit ist die Gefährdung für das Holz im Winter aufgrund der Temperaturen geringer als im Sommer. Im Sommer hingegen können schon wenige Wochen bei hohen Feuchten, genügen, um den Pilz keimen zu lassen.

Nach der „Aktivierung/Auskeimung der Pilzsporen“ sind die Feuchteansprüche der Pilze geringer. Auch



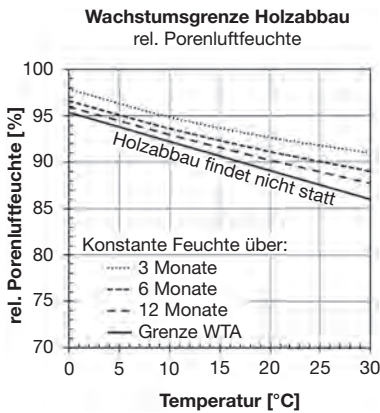
**Bild 17.** Zusammenhang zwischen Temperatur, rel. Luftfeuchte und der „kritische“ Zeit, ab der die Holzzerstörung beginnt, der sogenannten „Aktivierung“ (aus Laborversuchen [65] entwickelte Kurven). Unter 95 % rel. Luftfeuchte kommt es nicht zum Auskeimen der Sporen von Braunfäulepilzen.



**Bild 18.** Zusammenhang zwischen Temperatur, rel. Luftfeuchte und der Zeit: Nach der „Aktivierung“ (Bild 17) können sich die Pilze weiterentwickeln und das Holz abbauen.

hier hängen das Wachstum und der Abbau der Holzsubstanz im Wesentlichen von der Temperatur und der rel. Luftfeuchte ab. Nach dem Modell von *Viitanen* entstehen entsprechende Kurven in Bild 18. Wählt man beispielsweise die Grenzbedingung bei 20 °C (rot-Strich-Punkte Kurve) und 92 % r. F., würde vier Monate kein Holzabbau stattfinden. Erst wenn solche Bedingungen länger vorherrschen, kommt es zum Abbau der Holzsubstanz. Den Kurven sind Gleichungen hinterlegt, die es ermöglichen, dass man nicht nur solche statischen Betrachtungen durchführen, sondern auch dynamische Prozesse auswerten kann [67].

Eine entsprechende Betrachtung schien zunächst für die hygrothermische Simulation zu komplex und sie enthielt keine Sicherheiten. Daher wurde die Bewertung stark vereinfacht [68]: Abgeleitet aus Bild 18 und dem Betrachtungszeitraum von > 12 Monaten entstand die Grenzkurve aus Temperatur und rel. Porenluftfeuchte, die im WTA-Merkblatt hinterlegt ist (Bild 19; unterste durchgezogene Linie). Ergänzt wird hier die Abbildung mit zusätzlichen Kurven, die ande-



**Bild 19.** Möglichkeit der temperaturabhängigen Bewertung Simulationsergebnissen anhand der rel. Luftfeuchte im Holz, der sogenannten Porenluftfeuchte. Die unterste Kurve entspricht der Grenze nach WTA [62].

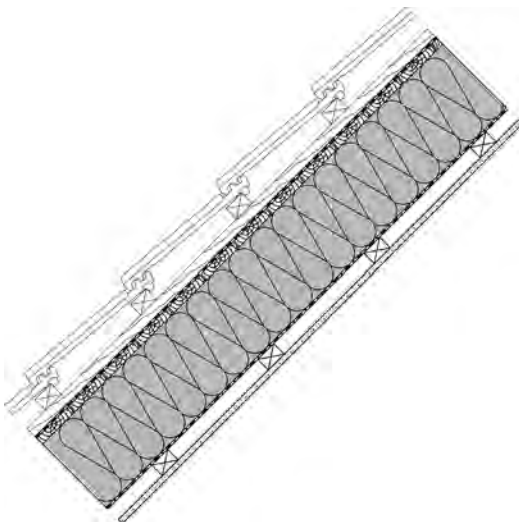
re Zeiträume (3, 6 und 12 Monate) betrachten. Daraus wird ersichtlich, dass die WTA-Kurve mit Sicherheiten behaftet ist, da in der Regel dynamischen Prozesse nicht 12 Monate oder sogar noch länger andauern. Für die aus der Berechnung stammenden Tagesmittelwerte wurde dementsprechend im WTA-Merkblatt ergänzt: „In begründeten Ausnahmefällen können einzelne kurzfristige Überschreitungen akzeptiert werden.“ [62]

Die erstellte Grenzkurve wurde innerhalb der WTA-Arbeitsgruppe an rund 200 Berechnungen ausführlich getestet und zeigt für die untersuchten Bauteile plausible Ergebnisse, die mit Erfahrungen aus der Praxis abgeglichen wurden. Nach nun über fünf Jahren Erfahrung mit der Grenzkurve und den neusten Erkenntnissen [28] wird in der WTA-Arbeitsgruppe aktuell eine veränderte Grenzziehung besprochen. Dabei werden

auch verschiedene Sicherheitsstufen diskutiert. Neben der bauphysikalischen Anforderung ist noch eine weitere Materialgrenze für Holz zu beachten. Handelt es sich bei dem Holzbauteil um ein tragendes Bauteil, sind die Nutzungsklassen aus der Tragwerksplanung (Eurocode 5) zu beachten. Die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit bei Holz hängen ebenfalls von der Umgebungs- und damit von der Holzfeuchte ab. Sind die Feuchten zu hoch, werden in der Statik Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Dabei wird die mittlere Feuchte im gesamten Holzquerschnitt betrachtet. In der Nutzungsklasse 2 sind maximale Holzfeuchten von 20 M.-% zulässig. Die Bauphase wird in der Regel nicht separat betrachtet. Es ist folglich die Feuchte im eingeschwungenen Zustand zu beachten.

### Beispiel Altbaudach

Anhand des folgenden Altbaudaches (Bild 20) wird exemplarisch aufgezeigt, dass die Grenzziehung der Holzfeuchte für die hygrothermische Bemessung geeignet ist. Bei älteren Dächern befindet sich unterhalb der hinterlüfteten Dachziegel oder unter einer Verblechung oder Verschieferung häufig eine Bitumenbahn auf einer Holzschalung, die als Unterdach dient. Will man solche Dächer energetisch von innen sanieren und den Sparrenzwischenraum dämmen, entsteht eine außen dampfdichte Konstruktion. Wird auf der Innenseite eine Dampfbremse mit einem hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand eingebaut (bspw.  $s_d = 10$  m), haben diese sogenannten „Dicht-Dicht-Konstruktionen“ keine Austrocknungsmöglichkeiten und damit ein hohes Schadenspotenzial. Da immer bei der Luftdichtheit mit Restleckagen zu rechnen ist, feuchten solche Konstruktionen auf. Sie sind daher nicht mehr Stand der Technik. Erst wenn der innere  $s_d$ -Wert reduziert oder mit einer feuchtevariablen Dampfbremse gearbeitet wird, besteht zum Innenraum hin ein gewisses Austrocknungspotenzial durch sommerliche Umkehr-



**Bild 20.** Saniertes Altbaudach

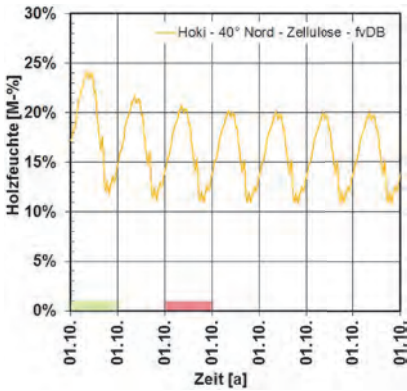
Aufbau von außen nach innen:

1. Ziegel mit Lattung
2. Bitumenbahn
3. Holzschalung 20 mm
4. Zellulosedämmung 200 mm
5. feuchtevariable Dampfbremse
6. Installationsebene mit GKB-Platte

Randbedingungen für die Simulation:

Klima Holzkirchen: Ø-Temp. 6,6 °C  
 Dachneigung: 40°; nordorientiert  
 Luftdichtheit  $q_{50} = 3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$   
 normale Feuchtelast nach WTA MB 6-2.  
 Start: 20 °C / 80 % rel. Luftfeuchte

01.10. Startfeuchte Zellulose: 5,45 kg/m<sup>3</sup>



**Bild 21.** Die Auswertung der Holzfeuchte in der Schalung. Durch den fehlenden Temperaturbezug kann das Schadensrisiko nicht beurteilt werden. Der grüne und rote Balken zeigt die Zeiträume an, die in Bild 22a und b beispielhaft ausgewertet werden.

diffusion. Damit die eingedrungene Feuchte aus dem Winter im Sommer überhaupt rücktrocknet, ist aber die Erwärmung der Dachfläche erforderlich. Demzufolge sind besonders nordorientierte Dächer, die sich in Folge einer geringen Sonneneinstrahlung kaum erwärmen, besonders gefährdet. Das untersuchte Dach hat daher eine nach Norden orientierte 40° geneigte Dachfläche. Die Dampfbremse auf der Unterseite des Daches ist feuchtevariabel und als Dämmung kommt Zellulosefaser zum Einsatz.

Die Holzfeuchte der Schalung steigt im ersten Winter auf 24 M.-% und trocknet dann innerhalb von 4 Jahren im Maximum des Jahreszyklus auf 20 M.-% (Bild 21). Ob die Konstruktion durch Holz zerstörende Pilze gefährdet ist, ist aus dieser Darstellung aber nicht ersichtlich. Die anfänglichen 24 M.-% erscheinen zunächst als hoch. Eine vereinfachte Grenzziehung bei 20 M.-% würde die Konstruktion als nicht funktionsfähig ausweisen. Aus der Praxis sind aber ausreichende Erfahrungen vorhanden, dass diese Konstruktion funktioniert. Betrachtet man hingegen Bild 22a, so ist gut zu erkennen, dass zum einen die Grenzkurve im ersten

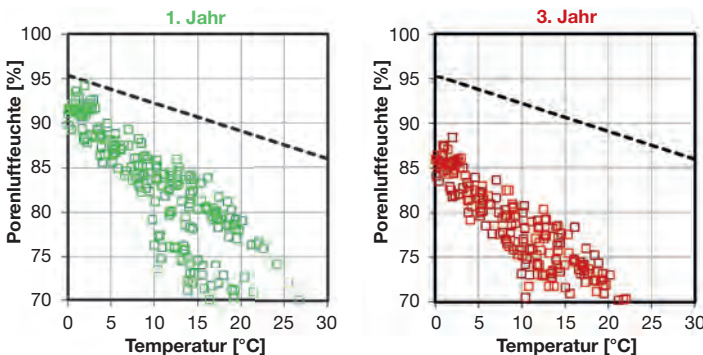
Jahr nicht überschritten wird, da die anfänglichen hohen Feuchten auf Grund der zu dieser Zeit herrschenden niedrigeren Temperaturen kein Problem darstellen. Zum anderen nehmen die Feuchten immer weiter ab (Bild 22b). Durch die jährliche Reduktion zeigt die Konstruktion ein ausreichendes Trocknungspotenzial.

### 3.4.3 Bewertung von Holzwerkstoffen durch Materialfeuchte

Grundsätzlich muss bei Holz und Holzwerkstoffen zwischen den jeweils relevanten Schadensmechanismen unterschieden werden. Während bei Holz die entsprechenden holzerstörenden Pilze maßgeblich sind für die Begrenzung der Feuchtegehalte, ist es bei den tragenden Holzwerkstoffen wie OSB- oder Spanplatten die Schädigung des Klebefüges, die bereits relevant ist, bevor holzerstörende Pilze wachsen können. Die sogenannte Delaminierung, welche durch das Quellverhalten der Holzstreifen (strands)/Holzspäne (particle) hervorgerufen wird, bewirkt einen Verlust der Tragfähigkeit. Das relevante Feuchteniveau ist im Vergleich zur Holzzerstörung dabei sogar noch etwas niedriger.

Die DIN EN 13986 [79] legt die Anforderungen an Holzwerkstoffe fest. Dabei unterscheidet die Norm drei Feuchtebereiche: Trocken-, Feucht- und Außenbereich. Je nach Bereich und Holzwerkstoff müssen entsprechende Produktprüfungen bestanden werden. DIN 68800-2 verbindet die drei Bereiche mit entsprechenden maximal zulässigen Holzfeuchten (Tabelle 6). Die zulässige Feuchte von 18 M.-% im Feuchtbereich darf bei hygrothermischen Simulationen nach Norm geringfügig bis 20 M.-% überschritten werden, bei einer maximalen Überschreitungsdauer von 3 Monaten. Unklar bleibt, ob dies jährlich oder nur in den Anfangsjahren geschehen darf. In der Praxis wird meist von letzterem ausgegangen.

Es ist also festzustellen, dass bei statisch relevanten Holzwerkstoffen häufig die mechanischen Eigenschaften und nicht das Holzfäule-Risiko maßgeblich für den maximal zulässigen Feuchtegehalt sind.



**Bild 22.** Die Porenluftfeuchte in der Schalung wird als Tagesmittel über die Temperatur aufgetragen. Die im ersten Jahr (a) vorhandenen, hohen Feuchten stellen aufgrund der niedrigen Temperaturen kein Problem dar. Im dritten Jahr (b) hat sich die Feuchte weiter reduziert und zeigt mit dem starken Abfall zwischen dem ersten und dritten Jahr ein ausreichendes Trocknungspotenzial.