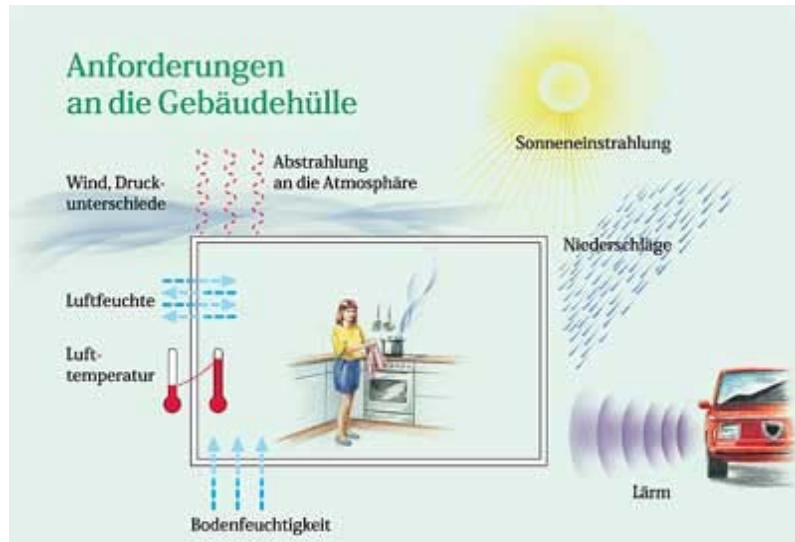




ZUKUNFT  
H O L Z

Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale

Auszug bestehend aus:  
**Kapitel 11 – Bauphysik**



## 11 Bauphysik Inhaltsverzeichnis

11.1 Wärme- und Feuchteschutz	
Sommerlicher Wärmeschutz	S. 867
Hygrothermische Kennwerte von Holz	S. 871
Außendämmung aus Holz	S. 875
Balkendurchdringungen in historischen Außenwänden	S. 883
Innendämmung - eine Chance für den Holzbau?	S. 889
Holzfaserplatten für die Innendämmung	S. 895
Passivhaus	S. 901
Flachdächer in Holzbauweise	S. 913
11.2 Schallschutz, Schwingung	
Schall- und schwingungsoptimierte Holzdecken Bemessungshilfen für die Praxis	S. 919
Schwingungstechnische Optimierung von Holzdecken	S. 929
Akustikbauteile aus natürlichem Holz	S. 937
11.3 Brandschutz	
Brandschutz im Holzbau	S. 943
Sicher hoch hinaus im Holzbau	S. 949
Hochgefüllte Papiere als Holzfaserverbundwerkstoff – Potential im Brandschutz	S. 957
Mehrschnittige Stabdübelverbindungen und Brandschutz	S. 965
Modell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen	S. 973
11.4 Dauerhaftigkeit	
Dauerhaftigkeit im Holzbau	S. 983

## 11 Bauphysik Einleitung

Holz hat hervorragende bauphysikalische Eigenschaften, die sich sowohl auf die Konstruktion als auch auf die Nutzung eines Gebäudes vorteilhaft auswirken. Es zeichnet sich durch hohe Festigkeit und Tragkraft bei gleichzeitig geringem Eigengewicht aus. Durch seinen niedrigen Wärmeleitwert können Wärmebrücken verhindert und Kosten für Heizmaterial gespart werden. Die Elastizität von Holz sorgt für gute Standfestigkeit und Erdbebensicherheit: Obwohl Holzgebäude schwingen, stürzen sie nicht so leicht ein wie Gebäude aus steifen Materialien. Seine innere Struktur macht Holz zu einem extrem dauerhaften Baustoff, sofern damit richtig konstruiert und seine Oberfläche im Bedarfsfall geschützt wird. Beim Brandschutz erfüllt der moderne Holzbau alle gesetzlichen Bestimmungen; dies bedeutet, dass entgegen aller Vorurteile kein erhöhtes Sicherheitsrisiko im Vergleich zu anderen Baustoffen besteht. Insgesamt sind Holzhäuser sehr behaglich und sie erhöhen das subjektive Wohlbefinden durch die positive Anregung der Sinne.

Dennoch: Wie alle anderen Baustoffe ist auch Holz den Einflüssen der Natur ausgesetzt. Vor allem gegen Feuchtigkeit kann es je nach natürlicher Dauerhaftigkeit empfindlich reagieren. Daher gilt es, bereits in der Entwurfsphase eines Gebäudes ein ganzheitliches Planungskonzept zu erstellen, welches die Bereiche des Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutzes berücksichtigt. Aufgrund der Vielfalt dieser Faktoren sind vor allem seitens der Planer bauphysikalische Fachkenntnisse unerlässlich. Die einzelnen bauphysikalischen Faktoren werden nachfolgend näher erläutert.

### **Wärme- und Feuchteschutz**

Ein guter Wärmeschutz ist bei Neubauten inzwischen selbstverständlich geworden. Passivhäuser können durch moderne Holzgebäude problemlos erfüllt werden. Dabei bezeichnet der Passivhausstandard solche Bauten, deren Heizwärmebedarf

im Jahr weniger als 15 kWh pro m<sup>2</sup> Gebäudenutzfläche betragen.

Die Holzrahmenbauweise, die sich in den meisten Holzgebäuden wieder findet, hat den Vorteil, dass der Anteil des Wandvolumens, der mit Wärmedämmung gefüllt werden kann, sehr hoch ist. Eine außen liegende Dämmschicht, wie bei der Massivbauweise üblich, kann zusätzlich ausgebildet werden. Durch die Vergrößerung der Dämmstoffdicken (z.B. durch eine gedämmte Installationsebene oder durch auf die äußere Belankung angebrachte Holzweichfaserplatten) sind U-Werte  $\leq 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  problemlos erreichbar. Mit ein Grund dafür ist, dass Holz selbst sehr niedrige Wärmeleitwerte besitzt, so dass beim Holzbau bereits die tragenden Bauteile hervorragende Dämmeigenschaften mit sich bringen.

Weitere Voraussetzung für einen guten Wärme- und Feuchteschutz ist die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle. Wird durch warme Innenluft Feuchtigkeit in die Konstruktion getragen, kann die Wand in einzelnen Fällen dauerhaft durchfeuchten, mit der Folge schwerer Schäden (vgl. auch Kapitel 12). Daher sollte auf eine nach außen diffusionsoffene Bauweise geachtet werden, um so eine sommerliche Rücktrocknung des Bauteils zu ermöglichen: „So diffusionsdicht wie nötig, so offen wie möglich“, lautet das Motto. Die Luftdichtigkeit wird mittels des Blower-Door-Tests geprüft, vorhandene Undichtigkeiten können somit behoben werden.

### **Dämmstoffe aus Holz**

Global gesehen ist die konsequente Dämmung des Gebäudebestandes eine der wenigen Möglichkeiten, die Energie- und Klimaproblematik wirklich in den Griff zu bekommen. Hier finden sich auch äußerst große Potenziale für Dämmstoffe auf der Basis von Holzcellulose oder Holzfasern. Der Beitrag „Innendämmung von massiven Außenwänden“ (Robert Borsch-Laaks) macht

deutlich, dass sich Holz basierte Dämmstoffe nicht nur an der Außenseite von Gebäuden, sondern durchaus auch als innenseitige Dämmung der Außenwände verwenden lassen. Die Angst vor der Verlagerung des Taupunktes in die Wand, samt der damit verbundenen Feuchteschäden, erweist sich in der Praxis in den allermeisten Fällen als unbegründet.

Der Beitrag zeigt im Detail, dass die Wände älterer Gebäude hinter der Innendämmung über Jahrzehnte lang trocken blieben. Ursache hierfür ist die kapillare Saugfähigkeit und das Sorptionsvermögen der historischen Wandbaustoffe. Bevor es zur befürchteten Tauwasserbildung kommen kann, wird möglicherweise entstandene Feuchtigkeit an der kalten Seite der Dämmschicht durch die Fähigkeit der massiven Wand zum kapillaren Flüssigkeitstransport weiterverteilt. Nur dort, wo Betonwände von innen ohne Dampfbremse gedämmt worden waren, konnte zuweilen der befürchtete Tauwasserfilm festgestellt werden.

Borsch-Laaks berührt noch ein anderes Problem, das allerdings weitgehend unabhängig vom verwendeten Dämmstoff ist: Wenn feuchte Innenraumluft in vorhandene Hohlräume zwischen Wand und Dämmstoff einfließt, kann es an der kälteren Wand ebenfalls zu Kondensation kommen und damit zur Gefahr der Schimmelbildung. Dieser Schadensfall kann aber durch eine sorgfältige Ausführung der Dämmung samt Dampfbremse verhindert werden.

### Hoch gedämmte Gebäudehüllen

Die sehr guten Chancen der Wärmedämmung mit Holz unterstreicht auch der Beitrag „Passivhaus“ (Till Schaller). Dieser zeigt, dass sich Holz als tragender und dämmender Baustoff auf Grund seiner hohen Tragfähigkeit mit gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit für hoch gedämmte Gebäudehüllen ideal eignet. Dies beweist übr-

gens auch eine in 2008 errichtete „Zero-Emission Polarforschungsstation“ für die Antarktis, bei der man bei der Entwicklung der Wärme dämmenden Hüllkonstruktion mit dem Baumaterial Aluminium einfach nicht mehr weiter kam und sich schließlich für Holz entschied.

Der Beitrag von Schaller verdeutlicht, dass ein Passivhaus von den Erstellungskosten etwa 6 bis 8 % teurer ist, als ein konventionelles Gebäude mit einem Dämmstandard nach Stand der Technik; zudem sind die bauhandwerklichen Details bezüglich der Luftdichtigkeit besonders sorgfältig auszuführen. Dieser Mehraufwand wird allerdings innerhalb weniger Jahre kompensiert, zum einen durch die reduzierte Haus- und Heiztechnik eines Passivhauses, zum anderen durch die Einsparung teurer Energieträger.



Passivhaus in Ottbergen. Architekt: Carsten Grobe

Einen umfassenden Überblick über die Möglichkeiten der Dämmung von Wänden und Dächern gibt der Beitrag „Außendämmung aus Holz“ (Norbert Rüter). Er zeigt den Stand der Technik für Dämmungen mit Holzwerkstoffen für die Anwendungsgebiete „Dach“ und „Wand“. Diese Anwendungen unterscheiden sich danach, ob zwischen Dämmschicht und Wetterschutz eine Luftschicht liegt (wie unter Dachdeckungen bzw. hinter Bekleidungen) oder auf eine Hinterlüftung verzichtet wurde (wie bei Dachabdichtungen

bzw. unter Wandputz). Der Beitrag zeigt deutlich, dass auch in diesen wetternahen Gebäudebereichen Holz schon seit geraumer Zeit Einzug gefunden hat; dieses Potenzial ist noch lange nicht ausgeschöpft.

Ein weiteres realistisches Potenzial für den Baustoff Holz erschließt der Beitrag „Flachdächer in Holzbauweise“ (Daniel Schmidt). Besonders wirtschaftliche Flachdächern aus Holz existieren auf vielen Gebäuden in Form nicht belüfteter Bauteile, bei denen sich die Dämmung innerhalb der Tragebene befindet. Mit Spannweiten bis zu 10 m liegen für den Wohnungs-, Bildungs- und Verwaltungsbereich ausreichende Elementtragfähigkeiten vor. Hier gibt es auch seitens des Brandschutzes heute keine Bedenken mehr.

Bei den größeren Dachflächen des Industrie- und Gewerbebaus sieht dies aufgrund der baurechtlichen Anforderungen für den Baustoff Holz leider noch anders aus, so der Autor. Die Funktionstüchtigkeit von Holzelementen in Bezug auf die Begrenzung der Brandweiterleitung im Bereich der geschlossenen Dachfläche konnte zwar durch Versuche nachgewiesen werden; nun ist es erforderlich, die baurechtlichen Randbedingungen in Bezug auf die Musterrichtlinien für Industriebauten und Versammlungsstätten zu schaffen, um die Leistungsfähigkeit dieser Holzkonstruktionen anwendbar machen zu können.

### **Brandschutz**

Dass Holz brennt ist eine Binsenweisheit, die Bilder vom Inferno brennender Wälder hat jeder im Kopf. Beim Brand eines Gebäudes jedoch ist Holz gegenüber anderen Baustoffen gewissermaßen im Vorteil, da es auf Grund seiner Eigenschaften berechenbarer ist. So bildet Holz eine schützende Kohleschicht, die ein weiteres Abrennen verhindert. Darunter bleibt, bei entsprechender Dimensionierung, ein tragfähiger Kern übrig. Auch aufgrund der Geräusentwicklung der Konstruktion

im Brandfall kann die Feuerwehr relativ gut abschätzen, wann Gefahr im Verzug ist. Insgesamt kann aus der heutigen Sicht der Forschung und Praxis gesagt werden, dass bei Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen bzw. bei einer gewissenhaften Planung und Realisierung eines Holzgebäudes ein erhebliches Brandschutzniveau erreicht wird.

Den aktuellen Stand in Deutschland erläutert der Beitrag „Brandschutz im Holzbau“ (Dirk Kruse, Michael Dehne). Aufgrund umfangreicher theoretischer und experimenteller Grundlagenuntersuchungen ist es gelungen, die Bedenken der Bauaufsicht und der Feuerwehr gegenüber der Holzbauweise auszuräumen. Die Musterbauordnung 2002 erlaubt in Verbindung mit der Musterrichtlinie für Brandschutzanforderungen an hochfeuerdämmende Bauteile in Holzbauweise (MHFHolzR) die Erschließung der innerstädtischen Quartiere in mehrgeschossiger Holzbauweise.

Wenn die konstruktiven Anforderungen der MHFHolzR erfüllt werden, können die mit der Brandschutzbekleidung eingekapselten Holzkonstruktionen als gleichwertig zu Mauerwerks- oder Stahlbetonbauteilen betrachtet werden. Über ganzheitliche Brandschutzkonzepte ist es sogar möglich bis zu sieben Geschoße zu realisieren. Aktuelle Projekte beschäftigen sich mit der Entwicklung von sicheren normal entflammaren Fassadenkonstruktionen sowie transparenten Brandschutzbeschichtungen, um Holz auch sichtbar verbauen zu können.

Der Ermittlung des Feuerwiderstands von massiven und zusammengesetzten Holzbauteilen widmet sich der Beitrag „Modell zum Nachweis der Raum abschließenden Funktion von Holzbauteilen“ (Vanessa Schleifer). Da tragende Holzbauteile zumeist mit Gipsplatten o.ä. verkleidet werden, um die Zeit des Feuerwiderstands (und damit die Eingriffszeit der Feuerwehr) zu erhöhen, wurden

auch jene Zeiten berechnet, nach deren Ablauf sich die Hölzer hinter der Verkleidung entzünden würden. Nach dieser Zeit würden zwar die Bauteile noch nicht nachgeben, durch entstehende Undichtigkeiten könnten jedoch giftige bzw. tödliche Rauchgase in benachbarte Räume entweichen.

Mit dem thermischen Verhalten von Holzverbindungen bei größeren Bauwerken und Hallen beschäftigt sich der Beitrag „Mehrschnittige Stabdübelverbindungen und Brandschutz“ (Carsten Erchinger). An dieser Stelle sei auch auf Kap. 10 „Verbindungstechniken“ verwiesen. Einen ganz anderen Ansatz verfolgt der Beitrag „Hochgefüllte Papiere als Holzfaserverbundwerkstoff – Potenzial im Brandschutz“ (Andreas Hofenauer). Er betrachtet den Brandschutz aus Sicht der Hersteller von mineralischen gebundenen Holzwerkstoffen mit der Möglichkeit, einen leichten Baustoff mit hoher Brandschutzqualifizierung herzustellen.

Fazit: Die Brandgefahr ist in einem modernen Holzhaus sicher nicht höher als in jedem anderen Haus. Diese Erkenntnis setzt sich allerdings erst langsam durch, und das Thema „Brandschutz“ ist noch immer eines der Hauptgründe, warum der Holzbau – im wahrsten Sinne des Wortes - nicht nach oben kommt.

### **Schallschutz, Schwingung**

Der Schallschutz von Holzbausystemen kann durch die Wahl geeigneter Bauteilaufbauten und Detailausbildungen ein hohes Niveau erreichen und dabei viele andere Bauweisen qualitativ übertreffen. Die Anforderungen sind in DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ enthalten.

Der Holzrahmenbau nutzt das Prinzip der Mehrschaligkeit, das durch den vielschichtigen Aufbau mit verschiedenen Beplankungen, Aufbauten, abgehängten Unterdecken usw. gegeben ist. Durch die Kombination mit Dämmstoffen in den Hohlräumen und den Beplankungstoffen mit un-

terschiedlicher Masse lassen sich die jeweiligen Schallschutzanforderungen erfüllen. Ein guter Schallschutz wird auch durch eine sorgfältige Konstruktion und Ausführung der Anschlüsse (z.B. Wand-/ Deckenanschluss) erreicht. Um eine Weiterleitung des Schalls über Nebenwege zu verhindern, müssen alle Anschlüsse Schall entkoppelt ausgebildet werden.

Gerade im mehrgeschossigen Holzbau mit mehreren Nutzern muss dem Schallschutz besonderes Augenmerk entgegengebracht werden, da das niedrige Gewicht des Holzes – sonst ein großer Vorteil der Holzbauweise – die Schallausbreitung oft nicht ausreichend dämpft. Durch die konstruktive Entkoppelung von einzelnen Bauteilen oder Geschossen, durch biegeeweiche und damit schallschluckende Beplankungen von Wänden und Fußböden bzw. Decken und durch die Ausbildung von Fugen werden sowohl Trittschall als auch Luftschall ausreichend unter Kontrolle gebracht und die gesetzlich geregelten Vorgaben an den Schallschutz in Mehrfamilienhäusern eingehalten.

### **Epilog: Zum Begriff der „Dauerhaftigkeit“**

Die Bauphysik spielt naturgemäß in alle Bereiche des Bauens hinein. Im Rahmen dieser Studie finden sich bauphysikalische Themen in fast in allen Kapiteln wieder, vor allem im Kapitel 10 („Verbindungstechniken“) sowie im Kapitel 12 („Holzschutz, Oberflächenbehandlung“).

Ob ein Bauwerk nun sorgfältig durchdacht und gebaut wurde, hat unmittelbaren Einfluss auf seine Dauerhaftigkeit. Im Holzbau liefert die DIN 1052 (ab Ausgabe 2004) folgende Definition: „Die Forderung nach einem angemessen dauerhaften Tragwerk gilt als erfüllt, wenn es während der vorgesehenen Nutzungsdauer seine Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften und

mit einem vertretbaren Instandhaltungsaufwand behält.“

Der Beitrag „Dauerhaftigkeit im Holzbau“ (Norbert Rüther) untersucht diesen wichtigen Aspekt des Bauens näher. So sind bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit im Holzbau die Fragestellungen nach der Optik, dem Trag- und Verformungsverhalten, der Dichtheit und dem Witterschutz zu beantworten. Als Beispiel wird die Dauerhaftigkeit einer Dichtfuge genannt: Diese wird erheblich von dem Verformungsverhalten der angrenzenden Bauteile beeinflusst. Erfüllt eine Dichtfuge nicht mehr ihre Funktion, so können andere – dahinter befindliche Bauteile – schnell in Mitleidenschaft gezogen werden. Insgesamt wird sich ein potenzieller Bauherr oder Käufer eines Holzhauses immer dafür interessieren, ob das Gebäude dauerhaft und damit wertbeständig ist.





## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Sommerlicher Wärmeschutz

Daniel Kehl

### 1 Einführung

Es ist bekannt, dass es bei Wohn- und Bürogebäuden während der Sommermonate unter bestimmten Randbedingungen zu einem unbehaglichen Raumklima kommen kann. Dies ist umso bedeutsamer, da es auf Grund des Klimawandels [1] zukünftig immer wärmer wird. Zur Reduktion hoher Temperaturen können sowohl anlagentechnische als auch konstruktive Massnahmen eingesetzt werden.

Allerdings sind Klimaanlage bei hoch effizienten Wohnbauten aus primärenergetischer Sicht kaum akzeptabel. Auch Lüftungsanlagen, die heute bei Niedrigenergie-Bauten eingesetzt werden und für einen Mindestluftwechsel im Winter ausgelegt sind, sind für notwendig hohe Luftwechsel im Sommer ungeeignet. Sie würden bereits beim doppelten Volumenstrom das Achtfache an Antriebsenergie benötigen [2].

### 2 Aktueller Stand

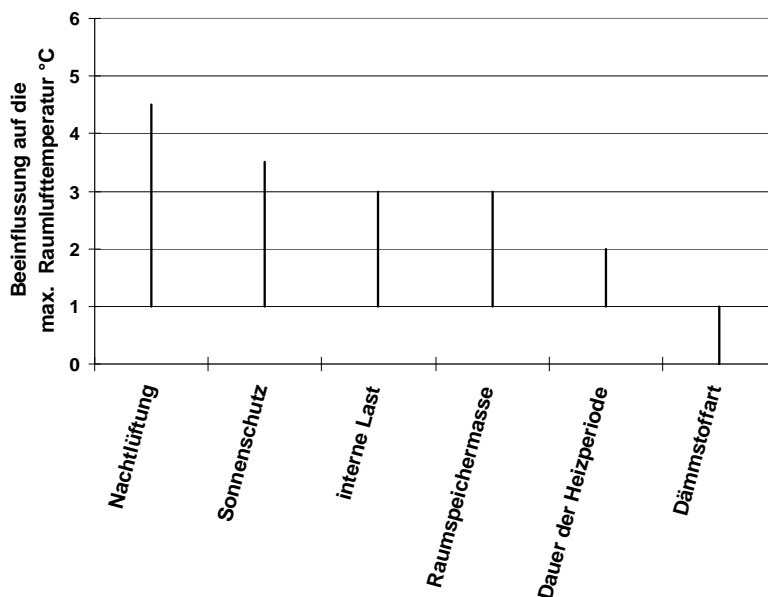


Abb. 1: Einfluss einzelner Parameter auf die max. Raumlufttemperatur (nachgebildet aus [13])

Die konstruktiven und nutzerbedingten Mechanismen, um die Temperaturen auf ein behagliches Mass zu reduzieren, sind prinzipiell bekannt, u.a. [2]-[9]. Zu Massivbauten liegen dazu Erkenntnisse aus Messungen und Simulationen vor. Da Holzbauten auf Grund ihrer unterschiedlichen inneren Speicherfähigkeit anders, teils kritischer, reagieren, können die Ergebnisse des Massivbaus nicht übertragen werden. Für Holzbauten mit ihren mittlerweile sehr unterschiedlichen Bauweisen (u.a. Holzrahmen-, Holzmassiv- und Holzbetonverbundbau) liegen nur vereinzelte Erkenntnisse vor. Hier fehlt es an detaillierten und umfangreichen Untersuchungen. Diese sind dringend erforderlich, da der Holzbau auf Grund der Nachkriegsbauten oftmals in der Bevölkerung mit Barackenklima gleichgesetzt wird und sich dies bis heute auf den Wiederverkaufswert von Holzgebäuden niederschlägt.

### 2.1 Aktuelle Planungswerkzeuge

Bisher stehen den Planenden verschiedene vereinfachte Nachweisverfahren zur Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes zur Verfügung. Die so genannten „Ja-Nein“-Nachweise treffen allerdings keine Aussage über die Qualität des Gebäudes. In der Regel sind sie außerdem für Holzbauten ungeeignet (s.u.a. [3], [7]). Eine Optimierung ist mit solchen Verfahren in der Regel nicht möglich. Hingegen sind Simulationen zu aufwendig, um einen Nachweis zu führen.

### 3 Forschungsbedarf

#### 3.1 Messung bestehender Gebäude:

Unter anderem sind Messungen an verschiedenen Holzbauten notwendig. Dabei kann das Raumklima, die Einflussfaktoren wie z.B. das Nutzerverhalten, genauer untersucht werden. Letzteres ist besonders wichtig, da hierzu kaum Informationen vorliegen. So bleibt oftmals unberücksichtigt, dass sich das Nutzerverhalten dem Gebäude anpassen kann. Die Ergebnisse der Messungen beziehen sich allerdings immer nur auf

die tatsächlichen Raumsituationen. Sie sind auf andere Räume mit anderen Randbedingungen nicht übertrag- und quantifizierbar.

### 3.2 Parameteruntersuchung mittels Gebäudesimulation

Daher ist es sinnvoll, die Messungen mittels thermischer Gebäudesimulation zu erweitern. So können die einzelnen Einflussparameter wie Fensterfläche und -ausrichtung, Verschattung, Lüftung sowie Wärmespeicherfähigkeit der Holzbauten und besonders deren Wechselwirkung genau analysiert werden. Hier wird das Augenmerk besonders auf die unterschiedlichen Speichermassen und die natürliche Lüftung über Fenstern gelegt. Letzteres ist hoch effektiv [2] [9] und kann z.B. mittels geringer Fenstertechnik anwenderfreundlich und mit geringem Energieeinsatz realisiert werden.

Anhand der Messungen und der Parameteruntersuchung können so die Varianten herausgearbeitet werden, unter denen bei Holzbauten auf Anlagentechnik im Sommer verzichtet bzw. auf ein Minimum reduziert werden kann.

### 4 Ziele der Forschung

Mittels der Messungen und der thermischen Gebäudesimulation werden die wichtigen Einflussparameter auf das sommerliche Raumklima untersucht. Zunächst ist das wesentliche Ziel der Messungen ein aktuelles Bild der tatsächlich vorhandenen Temperaturen in Wohngebäuden zu erlangen. Zudem wird das Nutzerverhalten genau untersucht. Die Messergebnisse dienen parallel dazu, das Simulationswerkzeug zu validieren und ggf. anzupassen. Mittels der gewonnenen Erkenntnisse kann genau spezifiziert werden, mit welchen konstruktiven Maßnahmen es im Holzbau möglich ist, die Behaglichkeit im Sommer ohne bzw. mit nur sehr geringer Anlagentechnik zu gewährleisten.

Die Ergebnisse müssen anschließend so aufbereitet werden, dass Architekten, Ingenieure und Holzbauer das sommerliche Verhalten von Gebäuden besser eingeschätzen und planen können. Damit dies möglich ist, soll neben Veröffentlichungen ein einfach handhabbares Planungstool entwickelt werden, das zum einen einen einfachen Nachweis ermöglicht und zum anderen eine qualitative Aussage über das Bauwerk trifft. Sehr gute Ansätze finden sich bspw. in [2]. Parallel dazu werden die Erkenntnisse in der Normung einfließen, so dass der Holzbau differenzierter abgebildet wird.

**Quellen**

- [1] Brunner, C.; Steinemann, U.: Bauen, wenn es wärmer wird – Notwendige Umkehrung normativen Denkens, Beitrag zum 14. Schweizerischen Status Seminar „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“, Zürich 2006
- [2] Hrsg.: Feist, W.: Lüftungsstrategien für den Sommer, Protokollband 22 des Passivhausinstitutes, Eigenverlag, Darmstadt 2003
- [3] Zweifel, G.; Ragonesi, M.: Holzbauten: Wärmeschutz im Sommer, Beiträge in der Zeitschrift Schweizer Holzbau, Ausgaben 7/2002 und 8/2002, Zürich 2002
- [4] Hrsg.: Feist, W.: Passivhaus Sommerklima Studie, Fachinformation PHI-1998/10 des Passivhausinstitutes, Eigenverlag, Darmstadt 1998
- [5] Stockinger, J.; Krec, K.; Seidl, J.: Thermisch optimierter Einsatz von Ziegel in Passivhäusern, Beitrag zur 8. Europäischen Passivhaustagung 2004, Zentrum für Bauen und Umwelt, Eigenverlag, Krems 2004
- [6] Hrsg.: Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München: Sommerliches Temperaturverhalten eines Dachzimmers bei unterschiedlichem Dachaufbau mit und ohne Berücksichtigung eines Sonnenschutzes, Bericht C1-14b/00 München 2000
- [7] Borsch-Laaks, R.: Ist das Sommerklima berechenbar – Teil 1: Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2, Beitrag aus der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Wolznach 2004
- [8] Borsch-Laaks, R.: Ist das Sommerklima berechenbar – Teil 2: Fallstudie zum sommerlichen Wärmeschutz mit PHPP 2004, Beitrag aus der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Wolznach 2004
- [9] Borsch-Laaks, R.: Die richtige Sommerlüftung – Erkenntnisse und Empfehlungen für die natürliche Kühlung, Beitrag aus der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Wolznach 2008
- [10] Otto, F.; Ringeler, M.: Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Wohngebäuden durch Holzfaser-Dämmplatten, Studie im Auftrag des Verbandes Holzfaserdämmstoffe e.V., Eigenverlag 2005
- [11] SIA 180 1999: Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1999
- [12] Önorm B 8110-3 Wärmeschutz im Hochbau – Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse, Österreichisches Normeninstitut, Wien 1999
- [13] Frank, Th.: Sommerlicher Wärmeschutz von Dachräumen, Vorlesung an der ETH Zürich „Spezialfragen Bauphysik HS 2007“, Zürich 2007



## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz

### Hygrothermische Kennwerte von Holz

**Daniel Kehl**

#### 1 Einleitung

Durch die steigende Nachfrage an ökologischen, energieeffizienten und nachhaltigen Bauweisen hat die Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen sowohl im Neubau als auch im Altbau in den letzten Jahren zugenommen. Parallel dazu wurden neue Holzwerkstoffe entwickelt und bewehrte Materialien modifiziert. Oftmals werden aber für solche Produkte im Wesentlichen Materialkennwerte für statische Nachweise ermittelt, da diese bauordnungsrechtlich erforderlich sind. Eine Vielzahl der Holzwerkstoffe übernehmen aber nicht nur tragende Funktionen sondern gleichzeitig auch bauphysikalische Aufgaben bzw. sind bauphysikalischen Einflüssen ausgesetzt.

#### 2 Aktueller Stand

Heute ist es in anderen Bereichen des Bauwesens wie z.B. der Tragwerksplanung üblich, zur Optimierung von Details und Anschlüssen komplexe Software anzuwenden. In der Bauphysik hingegen wird von den Planern weitestgehend ein sehr vereinfachtes Berechnungsverfahren, das sogenannte Glaser-Verfahren [1-2], verwendet. Dafür reichen einzelne hygrothermische Kennwerte aus [3-5]. Wie bei allen vereinfachten Verfahren, liegen dieses in der Regel auf der sicheren Seite. Bei vielen Wand- und Dachaufbauten hat sich das Glaser-Verfahren durchaus bewährt. Allerdings kommt es vor, dass Konstruktionen in der Praxis funktionieren, aber mit den vereinfachten Berechnungsregeln nicht nachweisbar sind.

Infolge dessen wurden solche Konstruktionen in der Norm als nachweisfrei definiert [1][6]. Umgekehrt konnten Konstruktionen berechnet werden, die in der Praxis zu Bauschäden geführt haben [7], [8]. Daher wurden bestimmte Aufbauten aus den Konstruktionskatalogen ausgeschlossen. Hinzu kommt, dass man mit dem Glaser-Verfahren keine Aussagen über die tatsächlichen Feuchte-

verhältnisse im Bauteil erhält. Somit ist eine Bewertung der Konstruktion nur begrenzt möglich.

Durch die angesprochenen Aspekte werden u.a. neue innovative Baumaterialien ausgeschlossen, da sie bei Erscheinen der Normen (bspw. DIN 68800-2: 1996 [6]) noch nicht existierten bzw. nicht verbreitet waren. Dies ist aktuell z.B. bei ökologischen Dämmstoffen sowie bei der Verwendung von Holzwerkstoffen und bestimmten Folienmaterialien (z.B. OSB; feuchteadaptive Dampfbremsen) der Fall. Allerdings können die Eigenschaften dieser Baustoffe dazu beitragen, dass sichere Holzkonstruktionen entstehen und auch auf chemischen Holzschutz verzichtet werden kann.

So weisen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Gegensatz zu mineralischen Fasern sorptive Eigenschaften auf. Kurzzeitige erhöhte Feuchten innerhalb der Konstruktion werden abgepuffert. Holzwerkstoffplatten und Dampfbremsen mit feuchtevariablen Eigenschaften reduzieren im Winter den Dampfdiffusionseintritt in die Konstruktion und erhöhen durch ihr diffusionsoffenes Verhalten im Sommer das Austrocknungspotenzial des Bauteils [9].

Aus all den Punkten wird ersichtlich, dass Vereinfachungen in der Berechnung und die damit einhergehenden Begrenzungen in der Normung zu teils unbefriedigenden Ergebnissen führen und für neue Entwicklungen im Holzbau ein Hemmnis darstellen.

Eine Alternative zu der vereinfachten Nachweisführung stellen hygrothermische Simulationsprogramme dar [10], [11].

Allerdings fehlt es an einer ausreichenden Anzahl von hygrothermischen Kennwerten für Holzwerkstoffe. Zwar liegen bereits Kennwerte für Holz und Holzwerkstoffe vor [13], sie stellen aber nur

einen Teil der auf dem Markt befindlichen Werkstoffe dar bzw. sind bereits wieder verändert worden. Hinzu kommt, dass z.B. OSB-Platten von Hersteller zu Hersteller teils stark unterschiedliche hygrothermische Eigenschaften aufweisen.

Mit den vorhandenen Daten konnte bereits an einigen Stellen aufgezeigt werden, dass die Begrenzungen aus der Normung teils ungerechtfertigt sind. Um bspw. auf einen vorbeugenden chemischen Holzschutz verzichten zu können, müssen laut DIN 68800-2 „besondere bauliche Maßnahmen als Voraussetzung für die Zuordnung von Holzbauteilen zur Gefährdungsklasse (GK) 0“ ergriffen werden. Für geneigte Dächer bedeutet dies den zwingenden Einsatz einer diffusionsoffenen „oberen Abdeckung“ mit einem  $s_{d,e}$ -Wert von maximal 0,20 m. Die Einstufung in die GK 0 gilt nach dieser Norm jedoch nur dann, wenn mineralische Faserdämmstoffe nach DIN 18165-1 eingesetzt werden oder für alle anderen Dämmstoffe ein Verwendbarkeitsnachweis z.B. im Rahmen ihrer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung vorliegt. Die Hersteller ökologischer Dämmstoffe mussten daraufhin ein teures und teils nicht nachvollziehbares Prüfverfahren für die Zulassung beantragen bzw. aufwendige und langwierige Freilandversuche durchführen [14]. In anderen Fällen ergaben sich ebenfalls Diskrepanzen zwischen normativen Einschränkungen und aktuellen Entwicklungen [15].

Simulationen mit den passenden bauphysikalischen Kennwerten können helfen, Konstruktionen zu berechnen und zu analysieren, da bei der Simulation realistische Temperaturen, Luft- und Materialfeuchten innerhalb des Bauteils ermittelt werden. Ein Kritikpunkt an den Simulationen ist allerdings, dass sie optimal konstruierte Bauteile voraussetzen und die Ergebnisse daher keinerlei Sicherheiten gegen unplanmäßige Feuchte durch Konvektion oder Baufeuchte aufweisen. In den aktuellen Simulationsprogrammen sind allerdings

solche „Feuchtequellen“ implementiert. Es fehlt hingegen an weitreichenden Erkenntnissen, welche Größenordnung diese Feuchteinträge haben.

Erste Ansätze bei Holzkonstruktionen [16] basieren nur auf einer Untersuchung. Ergänzend dazu wäre es hilfreich, ein Bewertungskriterium der relativen Holz- und Holzwerkstofffeuchte sowie der Oberflächenfeuchte innerhalb der Konstruktion festzulegen. Vielmals werden heute die 20 M-% relative Holzfeuchte als Begrenzung für die Zerstörung durch Pilze oder Insekten gesehen. Schulze schreibt dazu: „Da aber - ebenso wie die übrigen Eigenschaften des Holzes - auch die Holzfeuchte innerhalb desselben Holzteils stark streuen kann, wird aus Sicherheitsgründen unterstellt, dass die Holzfeuchte  $u \leq 30\%$  an jeder Stelle als eingehalten gilt, wenn die Einzelmessung (z.B. mit Einschlagelektrode und möglichst an ungünstig erscheinender Stelle) einen Wert  $u \leq 20\%$  ergibt. Pilzwachstum wird vermieden, wenn dieser Zustand dauerhaft gegeben ist“ [8]. Daraus wird ersichtlich, dass Feuchten bis zur Fasersättigung von ca. 30 % toleriert werden. Unberücksichtigt bleiben bei der Betrachtung der Materialfeuchte der Temperatureinfluss und die Zeitdauer auf den Befall. Für Schimmelpilze im Innenraum wurde ein zuverlässiges Modell entwickelt [17], was aber nicht auf das Bauteilinnere und holzerstörende Pilze übertragbar ist.

### 3 Forschungsbedarf

Um sowohl heute als auch zukünftig den stetig veränderten Konstruktionen und Werkstoffen im Bauwesen gerecht zu werden, ist es daher sinnvoll, hygrothermische Simulationen anzuwenden. Aus den oben genannten Gründen besteht daher an verschiedenen Stellen folgender Forschungsbedarf:

### 3.1 Hygrothermische Kennwerte

Hygrothermische Materialkennwerte für Holz und Holzwerkstoffe liegen nur begrenzt vor, wodurch bauphysikalische Optimierungen bzw. Risikobewertungen von Bauteilen nicht durchgeführt werden können. Um diese Lücke zu schliessen, ist es erforderlich solche Kennwerte von verschiedensten Holz und Holzwerkstoffen zu ermitteln. Erst dadurch können die genannten Simulationsprogramme genutzt werden. Die Ermittlung soll außerdem dazu dienen, bisher zum Teil kaum erklärbare festgestellte Eigenschaften, wie sie z.B. in Massivholzplatten oder OSB-Platten vorkommen, besser analysieren und auswerten zu können. Ein Augenmerk sollte daher u.a. auf die Erforschung dieser Vorgänge gelegt werden. Die gewonnen Erkenntnisse kann man nutzen, neue maßgeschneiderte bauphysikalische Produkte zu entwickeln.

### 3.2 Hygrothermische Bauteilsimulationen

Die ermittelten Kennwerte ermöglichen es hygrothermische Simulationen durchzuführen. Zur Kontrolle sollten sie zunächst mit Freilandversuchen aus der Vergangenheit und parallel laufenden Untersuchungen validiert werden. So können z.B. unbelüftete flach geneigte und voll gedämmte Dächer, aussen dampfdichte Steildächer, wie sie im Altbau (Bitumenbahn) oder Neubau (Zinkblech) vorkommen simuliert und analysiert werden. Auch Innendämmung von historischen Massivbauten wird simulierbar, um nur einige zu nennen.

### 3.3 Risikobewertung der Konstruktionen

Da innerhalb von Simulationen i.d.R. von optimal gebauten Zuständen ausgegangen wird, ist es erforderlich, dass Feuchteinträge durch Konvektion und Baufeuchte berücksichtigt werden. Mittels der Auswertung von Literatur und Freilandversuchen kann es möglich werden, Randbedingungen für die Simulationen festzulegen, die zu sicheren und fehlertoleranten Konstruktionen

führen, so dass auf den chemischen Holzschutz verzichtet werden kann. Dazu zählt auch ein flexibles Bewertungskriterium für die relative Holzfeuchte, je nach Temperatur und Zeitdauer.

### Quellen

- [1] DIN 4108-3: 2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [2] DIN EN ISO 13788: 2001-11: Raumseitige Oberflächentemperatur zu Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [3] DIN V 4108-4: 2007-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Beuth Verlag, Berlin 2007
- [4] DIN EN 12524: 2000-07: Baustoffe und -produkte, Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte, Beuth Verlag, Berlin 2000
- [5] DIN V 20000-1: 2005: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken, Holzwerkstoffe, Beuth Verlag, Berlin 2005
- [6] DIN 68800: 1996-05: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Beuth Verlag, Berlin 1996
- [7] Schulze, H.: Holzbau – Wände, Decken, Bauprodukte, Dächer, Bauphysik, Holzschutz, Teubner Verlag, Wiesbaden 2005
- [8] Hrsg. DGfH Innovations- und Service GmbH: Schriftenreihe des Informationsdienst Holzes: Reihe 3 - Teil 5 - Folge 2: Holzschutz, Eigenverlag, Düsseldorf 1997
- [9] Borsch-Laaks, R., Walther, Wilfried: Wärmetechnische Sanierung von außen, Artikelserie aus der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Kastner Verlag, Wolznach 2008



- [10] WUFI: Simulationsprogramm zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte-Transports in Bauteilen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, basierend auf [12]
- [11] DELPHIN: Simulationsprogramm zur Berechnung des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salz-Transports in Bauteilen, Institut für Bauklimatik, TU Dresden
- [12] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zwei-dimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte-Transports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten; Dissertation Universität Stuttgart 1994
- [13] Künzel, H.M.; Fitz, C.; Krus, M.; Zillig, W.: Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen, IBP-Bericht HTB-10/2004
- [14] H.M. Künzel: Einfluss des Dämmstoffs auf die Austrocknung von Leichtbauteilen, IBP-Bericht HTB-8/1996, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen 1996
- [15] Borsch-Laaks, R.; Wagner, G.: Alles Öko oder was? - Holzschutz bei Naturdämmstoffen, Beitrag in der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 2-2004, Kastner Verlag Wolznach 2004
- [16] Künzel, H.M.: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - Quo vadis?, IBP Mitteilung 355, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen 1999
- [17] Sedlbauer, K. Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart 2001
- [18] Krus, M.: Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte und Berechnung des Feuchtehaushalts von Holz-Prüfkörpern bei natürlicher Bewitterung; Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Gertis; IRB-Verlag, Stuttgart 1998, S. 345-370
- [19] Krus, M., Holm, A.: Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte. Proceedings 10. Bauklimatisches Symposium Dresden, 27.-29. September 1999, S. 423-432
- [20] DIN EN 15026: 2007-07. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [21] Künzel, H.M.: Außen dampfdicht, vollgedämmt? Beitrag in der Zeitschrift bauen mit holz, 1998, Bruder Verlag Karlsruhe 1998.
- [22] Künzel, H.M.; Kehrer, M.: Einfluss der Hinterlüftung auf das Feuchteverhalten von Holzbauwänden, Beitrag in Umweltbewusstes Bauen, IRB Verlag, 2008
- [23] Winter, St.; Bauer, P.; Kehl, D.: Freilandbewitterungsversuche von Holztafelbauwänden mit Mauerwerkvorsatzschale ohne zusätzliche Feuchteschutzschicht auf der Außenbekleidung der Holztafelelemente und mit hinterlüfteten, kleinformatischen Holzbekleidungen, gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn 2006

## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Außendämmung aus Holz

**Norbert Rüter**

### 1 Allgemeines

Im Holzbau gelten Dämmungen, die auf der Außenseite der tragenden Konstruktion sind, als „Außendämmungen“. Gemäß DIN 4108 Teil 10 sind dies Dämmungen in den Anwendungsgebieten DAD, DAA, WAB, WAP (Tab.1). Die Anwendungsgebiete DUK, WAA, PW und PB sind für Dämmungen aus Holz praktisch nicht geeignet. Neben diesen gibt es noch die sogenannten „Gefachdämmungen“, die sich innerhalb der tragenden Holzkonstruktion befinden (im Massivbau würde der Begriff der „Kerndämmung“ verwendet, wobei keine Analogiebildung möglich ist) und die sogenannten „Innendämmungen“. Diese sind jedoch im reinen Holzbau relativ unüblich und werden vorrangig zur nachträglichen thermischen Ertüchtigung von Altbauten, besonders im Denkmalschutz, verwendet. In den Anforderungen unterscheiden sich die Dämmungen dahingehend, dass die Außendämmungen mit hohen Temperaturschwankungen und ggf. erhöhter relativer Luftfeuchte beansprucht werden, als Gefach- oder Innendämmungen. Die Übergänge sind jedoch fließend. So ist z.B. die äußere Schicht einer Gefachdämmung, die z.B. ausschließlich mit einer Unterspannbahn abgedeckt ist, wesentlich höher beansprucht, als die mittlere Schicht einer z.B. 6 cm dicken Außendämmung. Dennoch werden an Gefachdämmungen und Außendämmungen erheblich unterschiedliche Anforderungen gestellt. So werden z.B. gemäß DIN 4108-10 an Außendämmungen Anforderungen an die kurzzeitige Wasseraufnahme (WS) gestellt, an Gefach- und Innendämmungen hingegen nicht. Aus Sicht des Autors ist es ausreichend, wenn bei Außendämmungen aus Holzfasern (WF gemäß DIN EN 13171) mit größeren Dämmdicken, die äußeren Lagen des Dämmpaketes die Anforderungen gemäß DIN 4108-10, Anwendungsgebiet DAD, DAA, WAB oder WAP, erfüllen.

Mit Ausnahme von Perimeterdämmungen (Kontakt mit Erdreich) sowie der Dämmung von Umkehrdächern (Dämmung oberhalb einer Flachdachabdichtung) sind Dämmstoffe aus Holz/ Holzfasern in allen Hochbauanwendungen einsetzbar.

Tab. 1: Anwendungsgebiete, Kurzzeichen und Anwendungsbeispiele von Außendämmungen gem. DIN 4108-10

Anwendungsgebiet	Kurzzeichen	Anwendungsbeispiel
Dach	DAD	Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen
	DAA	Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Abdichtungen
Wand	WAB	Außendämmung der Wand hinter Bekleidung
	WAP	Außendämmung der Wand unter Putz

Während die Außendämmungen grundsätzlich auf der Außenseite der tragenden Struktur angebracht sind, wird vorrangig nur noch unterschieden zwischen Dämmungen, die z.B. über eine Hinterlüftung direkt mit der Außenluft in Verbindung stehen (Anwendungsgebiete DAD und WAB, Aufsparrendämmung, Unterdeckplatten, hinterlüftete Fassade) und Dämmungen, die

durch eine direkt aufgebrachte Schicht vor Witterungseinflüssen geschützt sind (Anwendungsgebiete DAA und WAP, Flachdach, Wärmedämmverbund-Systeme). Alle Anwendungen haben jedoch wiederum gemeinsam, dass sie die Holzkonstruktion und deren Nutzer vor klimatischen Einwirkungen schützen.

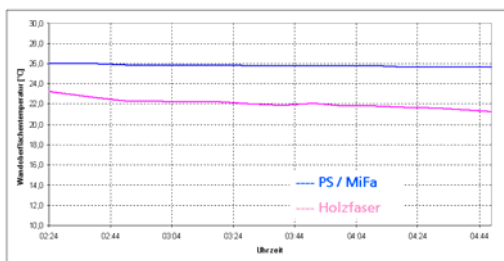


Abb. 1: Raum-Oberflächentemperaturen eines Daches mit unterschiedlichen Dämmungen in einer heißen Sommernacht unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens

## 2 Hinterlüftete Konstruktionen

### 2.1 Dach, Anwendungsgebiet DAD

#### 2.1.1 Unterdeckungen

Für den Anwendungsbereich im Steildach, unter einer belüfteten Dacheindeckung werden seit über 50 Jahren hydrophobierte Holzfaserdämmplatten als Unterdeckplatten eingesetzt. Während früher in der Regel die als „Bitumen-Holzfaserplatten“ in DIN 68752 genormten Platten zur Anwendung kamen, sind diese bituminierten Platten heute eher die Ausnahme, da üblicherweise andere Hydrophobierungsmittel wie z.B. Latex verwendet werden. Platten in diesem Anwendungsbereich müssen als zusätzliche wasserableitende Schicht unter der Eindeckung von geneigten Dächern eine Zusatzmaßnahme für die Regensicherheit des Daches darstellen. Der Begriff „Unterdeckung“ ist im Regelwerk des Zentralverbandes des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZVDH) definiert. Die Ausführung von Unterdeckungen mit Unterdeckplatten wird wiederum im ZVDH-Merkblatt „Unterdächer, Unterdeckungen und Unterdeckungen“ beschrieben. Die Eigenschaf-

ten, Anforderungen und Prüfverfahren von Unterdeckplatten aus Holzfasern werden in DIN EN 14964 beschrieben. Holzfaser-Unterdeckplatten, die mit Latex, Naturharz, Paraffin o.ä. hydrophobiert sind, werden auf Grundlage von Prüfungen gemäß DIN EN 14964 als „wasserdurchlässig“ eingestuft. Die Hersteller der Unterdeckplatten geben für ihre eigenen Produkte jeweils die möglichen Freibewitterungszeiten an, die häufig sogar bis zu einem Freibewitterungszeitraum von drei Monaten ausgelobt werden. Wichtig bei der Verarbeitung der Unterdeckplatten, zur Sicherstellung der geforderten Zusatzmaßnahme (Unterdeckung) ist die Art der Verarbeitung der Platten. So wird z.B. hinsichtlich der Verlegetechnik unterschieden, ob die Unterdeckplatten über die Verfalzung der Plattenkanten, in der Regel eine Nut- und Feder-Profilierung, verbunden werden, oder ob eine zusätzliche Verklebung oder Abklebung der Plattenfugen mit Systemzubehör erfolgt. Dabei sind die produkt- und herstellerspezifischen Mindestdachneigungen zu beachten. Unterdeckungen dürfen die Regeldachneigung des Eindeckungsmaterials um höchstens sechs Grad unterschreiten.

Holzfaser-Unterdeckplatten werden zunächst mit Klammern, Breitkopfnägeln o.ä. auf der Unterkonstruktion (Sparren) fixiert und später mit Hilfe der Konterlatte befestigt. Die Konterlatten werden jedoch erst montiert, nachdem eventuell erforderliche Abklebungen der Anschlüsse an First, Kehlen, Graten, Durchdringungen usw. durchgeführt wurden. Die schub- und sogssichere Befestigung der Konterlatten – und somit auch der Unterdeckplatten – erfolgt mit üblichen stiftförmigen metallischen Verbindungsmitteln wie z.B. maschinengängige Nägel oder Klammern durch die Platten hindurch in den Sparren. Da die Unterdeckplatten nicht über die Holzbaunorm, DIN 1052 geregelt sind, ist bei der Bemessung der Verbindungsmittel der Abstand der Latten zum Sparren zu berücksichtigen. Die neue

DIN 1052 (ab Ausgabe 2004) zeigt entsprechende Möglichkeiten über die Theorie von Johansen auf. Die Hersteller der Unterdeckplatten haben jedoch für ihre Produkte in der Regel entsprechende Bemessungstabellen vorbereitet. Neben den vorhandenen Nachweisen der Hersteller gibt es eine produktneutrale Bemessungstabelle für Holzfaser-Unterdeckplatten bis 60 mm Dicke, herausgegeben vom Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ) als „Merkblatt Unterdeckplatten aus Holzfaserdämmplatten“. Die Befestigung größerer Dämmstoffdicken erfolgt mit entsprechend allgemein bauaufsichtlich zugelassenen Schrauben für sogenannte Aufsparrendämmungen (s.a. 2.1.2).

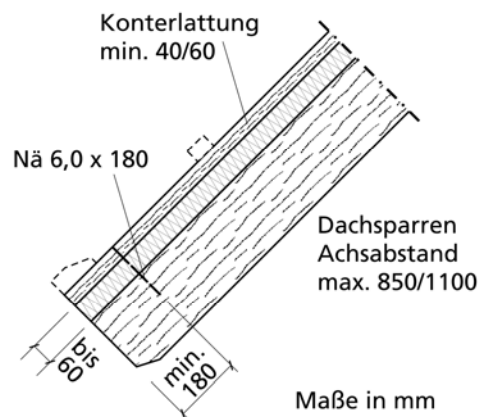


Abb. 2: Befestigung von Unterdeckplatten bis zu einer Dicke von 60 mm gemäß Herstellerangaben

### 2.1.2 Aufsparrendämmung

Die Definitionen von Unterdeckplatten und Aufsparrendämmung zeigen ganz klare Grenzen der beiden Systeme auf. Der Übergang kann jedoch auch hier wiederum fließend sein. Eine ganz klare, jedoch weitestgehend willkürliche Grenze ist bei der Dicke zu sehen. Während die Lastabtragung bei Unterdeckplatten bis ca. 60 mm Dicke gemäß DIN 1052 berechnet wird, sind für Dicken ab 80 mm allgemein bauaufsichtlich zugelassene Schraubensysteme für Aufsparrendämmungen zu verwenden. Bei weichen Dämmplatten (< 50 kPa

Druckfestigkeit) kann diese nicht mit zum Lastabtrag herangezogen werden, so dass die Befestigung mit Doppelgewindeschrauben in V-förmiger Anordnung durchgeführt wird. Das Unterkopfgewinde trägt die Konterlattung und damit die Eigen- und Schneelasten des Daches. Einzelne Schrauben zur Windsogsicherung werden senkrecht zu den Sparren eingeschraubt. Dämmplatten mit mindestens 50 kPa Druckfestigkeit können mit Einfachgewindeschrauben in sogenannter „kontinuierlicher Verschraubung“ befestigt werden. Hierbei trägt der Dämmstoff die Belastung aus Druck rechtwinklig zur Plattenebene, und es werden auch einige Schrauben zur Windsogsicherung senkrecht eingeschraubt. Bei beiden Befestigungstechniken werden die Konterlatten in den Bereichen zwischen den Schrauben als elastisch gebettete Balken gerechnet. Die Schraubenhersteller stellen jeweils Typenstatiken zur Verfügung, und die objektbezogene Statikempfehlung wird in der Regel als kostenloser Service angeboten.

Aufsparrendämmungen weisen den Vorteil auf, dass die innenliegenden, tragenden Bauteile kontrollierbar bleiben und nicht mit den Temperatur- und Feuchteschwankungen des Außenklimas beansprucht werden und sind damit der Gefährdungsklasse 0 zuzuordnen. Aufsparrendämmungen weisen üblicherweise auf den sichtbar bleibenden Sparren zunächst eine tragende und aussteifende Schalung aus gespundeten Brettern oder aus Holzwerkstoffplatten auf, auf welcher dann als luftdichte Ebene eine Schalungsbahn mit verklebten Stößen verlegt wird. Die Anschlüsse an Durchdringungen, Traufe und Ortgang werden mit entsprechendem Systemzubehör luftdicht angeschlossen. Die Hersteller von Aufsparrendämmsystemen und DIN 4108-7 geben praktische Beispiele zur Verarbeitung an. So gibt z.B. DIN 4108-7 im Traufbereich einen zusätzlichen Kontersparren bzw. Aufschieblingen an, damit die ansonsten zahlreichen, fehlerträchtigen Bah-

nendurchdringungen vermieden werden. Auf dieser sauber verlegten Schalungsbahn wird dann das Dämmpaket verlegt. Für die ein- oder mehrlagige Dämmschicht, die bei der Aufsparrendämmung nicht durch Sparren in ihrer Dämmwirkung geschwächt wird, kommen Holzfaserdämmplatten des Anwendungsbereiches DAD zum Einsatz. Auch wenn es normativ noch nicht sauber geregelt ist, so kann es doch sinnvoll sein, die Dämmpakete in ihrer Dicke den Anforderungen anzupassen. Während die äußerste Lage thermisch, hygrysch und mechanisch am stärksten beansprucht wird, sind die Beanspruchungen der innersten Lage direkt auf der Schalung wesentlich geringer. Die Druckfestigkeit der Platten hat dabei Einfluss auf die spätere Ausführung der Konterlattenbefestigung. Die Dämmschicht wird üblicherweise vorrangig mit einer Unterdeckung aus Holzfaser- Unterdeckplatten abgedeckt, wobei jedoch auch diffusionsoffene Unterdeckbahnen zur Abdeckung möglich sind. Bei Dächern mit Dachüberstand ist die Verlegung der Holzfaser- Unterdeckplatten bis über die Vordachschalung vorteilhaft. Neben der ungestörten, übergangslosen Wasserableitung wird damit die starke nächtliche Auskühlung des Dachüberstandes durch die Dämmwirkung der Holzfaserplatten wirksam reduziert. Dadurch reduziert sich die Gefahr der Schimmelpilzbildung an der Unterseite des Dachüberstandes erheblich. Aufsparrendämmungen aus Holzfaserdämmplatten kommen bei Neubaumaßnahmen und Altbausanierungen gleichermaßen zum Einsatz und überzeugen durch ihre hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften.

So wirken die natürlichen Dämmstoffe besonders ausgleichend hinsichtlich Wärme, Feuchte und Schall. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Materialfeuchte hinter einer Außendämmung aus Holzfasern in einem konsequent diffusionsoffenen Bauteil. Die hohe Speicherfähigkeit und das gute Diffusionsvermögen bewirken selbst bei extremen klimatischen Bedingungen eine kontinuierlich

niedrige Materialfeuchte. Die Mineralfaserdämmung und die PE-Foile (Abb. 4) können hingegen keine Feuchte puffern, so dass sich hier Kondensat an der PE-Folie bilden kann (Lastfall Umkehrdiffusion).

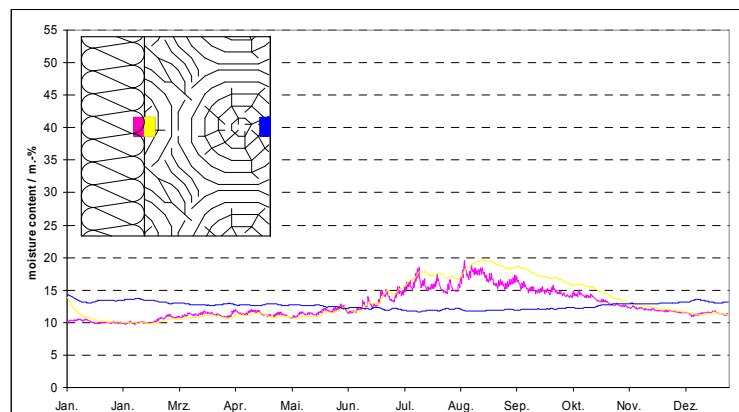


Abb. 3: In und hinter der Holzfaserdämmung ist permanent eine niedrige Feuchte

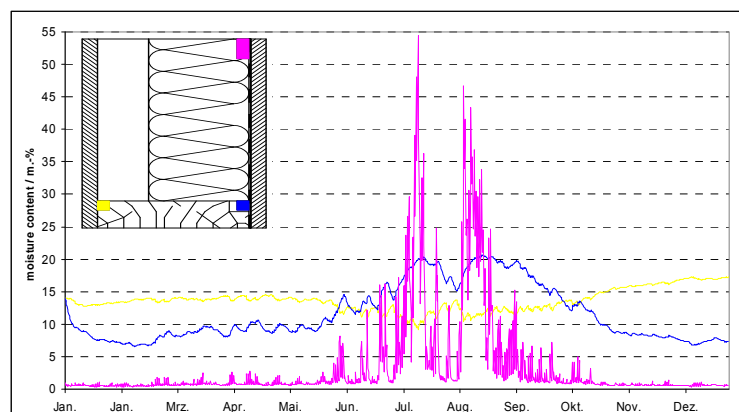


Abb. 4: Bei nicht sorptionsfähigen Dämmstoffen und Dampfsperren kann es schon mal zu Kondensatbildung kommen

## 2.2 Wand, Anwendungsgebiet WAB

Bei Außenwänden in Holzständer-, Holztafel- oder Holzrahmenbauweise kann die Gefachdämmung (Typ WH) gleichermaßen mit Holzfaserdämmplatten, -dämmkeilen oder flexiblen Holzfaserdämmplatten erfolgen wie bei Außenwänden mit WDVS-Fassade. Während aber bei den Wärmedämmverbundsystemen der dauerhafte

Wetterschutz durch das auf die Dämmplatte abgestimmte Putzsystem erfolgt (Anwendungsgebiet WAP), besteht der Wetterschutz bei Außenwänden mit Vorhangfassade aus der eigentlichen Fassade sowie der gegebenenfalls erforderlichen dahinter liegenden „wasserableitenden Schicht“ (Anwendungsgebiet WAB). Diese sogenannte wasserableitende Schicht kann bei Fassaden, die nicht regendicht sind, erforderlich werden. Besonders die Mauerwerkvorsatzschalen („Klinker“) lassen bei Schlagregen viel Wasser durchdringen. Während bei den Mauerwerkvorsatzschalen zusätzlich die Problematik besteht, dass diese faktisch nicht belüftet sind, sind andere Fassaden aus Fassadentafeln oder Holz bei korrekter Ausbildung in der Regel gut belüftet. In diesen Fällen kann die notwendige Funktion der „wasserableitenden Schicht“ sehr gut von vergüteten Holzfaser-Unterdeckplatten bzw. Holzfaserdämmelementen (Typ WAB) mit Unterdeckplattenfunktion übernommen werden. Praktisch ergeben sich die gleichen bauphysikalischen Vorzüge wie bei der Anwendung auf dem Dach. Auch hier kann für die Tragkonstruktion aus Holzständern und Wandbausystemen aus massivem Holz oder Holzwerkstoffen die GK 0 erreicht werden. Bei Mauerwerkvorsatzschalen wird wegen der fehlenden Belüftung in der Regel eine zusätzliche Schalungsbahn erforderlich, die die Holzfaserdämmung vor der hohen Luftfeuchte im Zwischenraum schützt. Die Meinungen gehen hier jedoch weit auseinander, da die Anwendung von Holzfaser-Unterdeckplatten als „wasserableitende Schicht“ bei Wänden in Holzständer-, Holztafel- oder Holzrahmenbauweise mit Mauerwerkvorsatzschalen derzeit bauaufsichtlich noch nicht geregelt ist.

Bei den üblichen Vorhangfassaden wie z.B. Bretterschalungen, Schiefer, Schindeln und andere kleinformatige Bekleidungen, sowie bei großformatige Fassadentafeln und hinterlüfteten Putzträgerplatten ist die Sachlage jedoch vollkommen

klar. Hier sind Holzfaserdämmplatten des Typs WAB sehr gut geeignet. Neben der Anwendung in der Holztafel-, Holzständer- und Holzrahmenbauweise kommen Holzfaserdämmplatten und Holzfaser-Unterdeckplatten auch als Fassadendämmung bei flächigen Wandbausystemen aus massiven Holz- und Holzwerkstoffelementen zum Einsatz. Dabei wird die Dicke der Dämmplatten den Erfordernissen des Wärmeschutzes angepasst und die Dämmschicht anschließend mit einer wasserableitenden Schicht aus Holzfaser-Unterdeckplatten abgedeckt. Die lastabtragende Befestigung erfolgt wie bei Aufsparrendämmungen über entsprechend dimensionierte Grundlatten, die mit bauaufsichtlich zugelassenen Holzbauschrauben befestigt werden. Mit Fassadendämmungen auf Mauerwerkswänden erschließt sich dem Zimmererhandwerk ein weiteres interessantes Tätigkeitsfeld, vor allem, wenn anschließend Vorhangfassaden angebracht werden.



Abb. 5: Holzfaserdämmplatten als Außendämmung in der Wand; oben als WDVS (Typ WAP), unten hinter einer (noch nicht montierten) hinterlüfteten Fassade (Typ WAB).

### 3 Nicht hinterlüftete Konstruktionen

#### 3.1 Dach, Anwendungsgebiet DAA

Bei der Verwendung von Holzfaserdämmplatten in Dächern mit Abdichtungen (Anwendungsgebiet DAA) werden verschärfte Forderungen hinsichtlich der Wasseraufnahme (WS 1,0) gestellt. Zudem kommen nur Holzfaserdämmstoffe mit einer Druckfestigkeit von 70 oder 100 kPa (CS(10/Y)70 oder CS(10/Y) 100) und einer Querkzugfestigkeit von 7,5 kPa (TR7,5) zur Anwendung. Dieser Anwendungsbereich wurde erst vor einigen Jahren erschlossen und in das Regelwerk des ZVDH aufgenommen. Hinsichtlich des Schall- und Hitzeschutzes können vor allem Dächer in Leichtbauweise mit Dämmschichten aus Holzfaserdämmplatten deutlich aufgewertet werden. Damit keine durchgehenden Fugen entstehen, wird die Dämmung entweder in mehreren Lagen mit versetzten Fugen verlegt oder es kommen profilierte Dämmplatten zur Anwendung. Alle Bahnenmaterialien, die in den Flachdachrichtlinien des ZVDH aufgeführt sind, können als Dachabdichtung verwendet werden. Die notwendige Lage- und Windsogsicherung des gesamten Dachaufbaus kann durch Verkleben, mechanische Befestigung oder Auflast aus Kies, Betonplatten usw. erfolgen.

#### 3.2 Wand, Anwendungsgebiet WAP

Das Anwendungsgebiet WAP ist ausschließlich in Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) gegeben. WDVS werden im Holzbau, zusätzlich zur Reduzierung von Heizenergie, auch zum Schutz der Holzkonstruktion vor schädigenden Umwelteinflüssen eingesetzt. Dabei wird der Schutz der Holzkonstruktion durch das gesamte System gewährleistet, das neben seinen Komponenten wie Dämmstoff, Putzsystem, Gewebe, Verbindungsmittel und Anschlussprofilen auch die Qualität der Ausführung, vor allem der Detailausbildung beinhaltet. Der Dämmstoff wird wiederum nur durch das Putzsystem geschützt. Seit der Markteinführung von WDVS mit Holzfaserdämmplat-

ten, in etwa Mitte der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts, hat diese innovative Anwendung von Holzfaserdämmplatten (Typ WAP) vor allem im Holzbau in den letzten Jahren einen beachtlichen Zuwachs erfahren, da sie insbesondere dem Zimmererhandwerk zusätzliche Märkte erschlossen hat. Erstmals konnten bauaufsichtlich zugelassene WDVS direkt auf die tragenden Holzständer montiert werden; ein vollflächiger Untergrund aus einer Plattenbekleidung ist nicht mehr erforderlich. Abb. 6 zeigt einen typischen Wandaufbau eines WDVS, jedoch mit einem vollflächigen Untergrund aus einer Holzwerkstoffplatte, die für das WDVS aber nicht erforderlich ist.

Holzfaserdämmplatten bis 160 mm Dicke können direkt auf den Holzständern befestigt werden, größere Dicken nur auf flächigen Untergründen wie z.B. Massivholzelementen (z.B. Lignotrend®, LenoTec®), Brettstapelwänden usw.. Diese Einschränkungen existieren, da von Seiten der Bauaufsicht die Befürchtung besteht, dass die relativ schmalen Rippen einer Holztafelwand durch ein dickeres Dämmpaket nicht mehr sicher mit den Verbindungsmitteln der Dämmung getroffen werden können.



Abb. 6: Querschnittsaufbau einer Holztafelwand mit WDVS; hier mit einer Spanplatte zwischen WDVS und Holzrippen

Kleinformatige, profilierte Ein-Mann-Platten, die im Verband ohne Bezug zu den Holzrippen verlegt und geschosshohe Platten, die ohne Kantenprofilierung auf den Rippen gestoßen werden, finden im Holzbau Anwendung. Die geschosshohen Platten werden dabei in der Regel bei der werkseitigen Vorfertigung von Wandelementen verwendet. Die jeweils für das System gültige allgemeine bauaufsichtliche Zulassung ist hinsichtlich Anwendung, Verarbeitung, Bemessung, Systemkomponenten, Putzbeschichtung, Befestigungsmittel und Zubehör zu beachten und es sind ausschließlich die Systemkomponenten der jeweiligen Hersteller zu verwenden und die Verarbeitungsrichtlinien zu beachten. Die Systemanbieter stellen dem Verarbeiter und Planer umfangreiche Detailinformationen zur Verfügung.

#### Quellen

- [1] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 3, Teil 3, Folge 3
- [2] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 4, Teil 5, Folge 2
- [3] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 3, Teil 4, Folge 1
- [4] Informationsdienst Holz – holzbau handbuch Reihe 4, Teil 5, Folge 2
- [5] Lange, U.; Rüter, N.: Natürlich. Holzfaserdämmplatten als Unterdeckungen im Dach. in Bauhandwerk 3/2008, S. 42 ff
- [6] Rüter, N.: Rechnerischer Nachweis der Randverformungen bei WDVS mit Holzfaserdämmplatten und großer Dämmdicke bis ca. 200 mm. Bauphysik 29 (2007) Heft 5, S. 323ff
- [7] Herlyn, J.W.; Rüter, N.: Gefährdung von Holzkonstruktionen bei Verzicht auf wasserableitende Schichten in Außenwänden ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz nach DIN 68800-2. Abschlussbericht 2006. Fraunhofer IRB-Verlag
- [8] Schliesing, S.: Numerische Simulation des Feuchteverhaltens moderner Wand- und Dachkonstruktionen in Holzbauart unter Variation der Bauteilgeometrien, Materialkennwerte und Klimarandbedingungen zur Ableitung repräsentativer experimenteller Bewitterungsversuche. Diplomarbeit, Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI u. Fachhochschule Eberswalde, 2003
- [9] Rüter, N.: Wärmedämmverbundsysteme mit Holzfaserdämmplatten. Vortrag, Bau Symposium Braunschweig, 04.11.2008, Braunschweig
- [10] DIN EN 13171:2001-10 Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF)
- [11] DIN 4108-10:2008-06 Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe
- [12] DIN EN 14964:2007-01 Unterdeckplatten für Dachdeckungen
- [13] ZVDH-Fachregeln für Dächer mit Abdichtungen, 2003-09, Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerkes, Bonn
- [14] ZVDH-Hinweise Holz und Holzwerkstoffe, 2005-09, Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerkes, Bonn
- [15] BDZ-Merkblatt Unterdeckplatten aus Holzfaserdämmplatten, 2006-01, Bund Deutscher Zimmermeister im ZDB, Berlin
- [16] Schlussbericht „Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Wohngebäuden durch Holzfaserdämmplatten“, Ingenieurbüro Prof. Dr. Gerd Hauser, 2005-04, Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V., Wuppertal
- [17] Schlussbericht „Neue Einsatzmöglichkeiten von Holzfaserdämmplatten im Holzbau“. VDI/VDE-IT Verbundprojekt Nr. IN-5027. Fraunhofer WKI und Universität Karlsruhe. Dezember 2008.





## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz

### Balkendurchdringungen in historischen Außenwänden

**Robert Borsch-Laaks**

#### 1 Einleitung

In historischen Holzbauten (Fachwerkhäusern) gehören Balkendurchdringungen zum Erscheinungsbild des Konstruktionsprinzips. Vielfach fordern der Denkmalschutz oder die Ortssatzungen die Erhaltung von Sichtfachwerk oder gar dessen Freilegung. Dabei werden oft feuchte-technische Gefahren missachtet.

Bei Sanierungen in Kombination mit Innendämmungen kommen durch die Wasserdampfkonvektion neue Risiken hinzu. Dies wird auch für alte Massivbauten mit Holzbalkendecken (z.B. Gründerzeithäuser) befürchtet. Dieser Beitrag will Lösungen präsentieren, die die Anwendung von Innendämmungen in Wänden mit Balkenanbindungen feuchtetechnisch sicher umsetzbar machen.

#### 2 Schlagregen, der Feind des Holzes

Gravierende Schädigungen an Sichtfachwerken sind nahezu immer auf mangelhaften Schlagregenschutz zurückzuführen. Die Wetterseiten von historischen Fachwerkgebäuden waren daher schon seit alters her meist mit einer zusätzlichen Wetterschale bekleidet (Vorhangfassade mit ortstypischem Behang oder Verputz auf Trägerplatte). Die DIN 4108 Teil 3 erlaubt daher nur in Gebieten der Schlagregengruppe (SRG) 1 allseitiges Sichtfachwerk. Wird in SRG 2 eine Freilegung dennoch vorgenommen, so ist der Nachweis zu erbringen, dass es sich um eine besonders geschützte Lage handelt oder das Gebäude selber (z.B. durch große Dachüberstände) den Fassadenschutz übernimmt.

Aber auch die weniger betroffenen Gebäudeseiten sollten keinen Schlagregendurchtritt nach innen zulassen. Dies wird in der Regel durch eine innen durchlaufende Putzschicht gewährleistet. Beidseitig sichtbare Fachwerke sind grundsätzlich

zu vermeiden. Wird eine Innendämmung angebracht, so ist deren Dampfsperrwert zu begrenzen ( $s_{d,i} \leq 2,0 \text{ m}$ ) [1]. Der Grund: In den unvermeidlichen Fugen zwischen Holz und Gefachen eingedrungene Regenfeuchte soll auch nach innen hin verdunsten können.

#### 3 Dampf- und Wärmetransport durch Luftströmung

Insbesondere die Vielzahl der Balkendurchdringung führt bei Fachwerkgebäuden nahezu zwangsläufig zu großen Luftundichtheiten (Abb. 1). Die Folge sind gravierende Wärmeverluste und ungemütliche Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit im Raum. Aus feuchte-technischer Sicht sind diese Luftleckagen in der Regel unproblematisch. Kurze Strömungswege entlang des Balkens führen meist nicht zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur der vorbeiströmenden Raumluft. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten, die für diese Leckagen ebenfalls typisch sind, führen nach Untersuchungen der Uni Kassel sogar zu einer Erwärmung der Oberflächen in den Fugen [2].

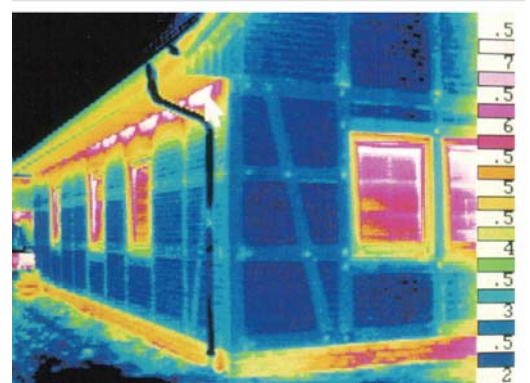


Abb. 1: Luftströmung am Anschluss der Deckenbalken eines Fachwerkhouses durch Thermografie bei Überdruck sichtbar gemacht..  
Bildquelle: Dr. Specht, Taunusstein.

Aber in Kombination mit Innendämmungen können neue Strömungsmuster entstehen, die feuch-

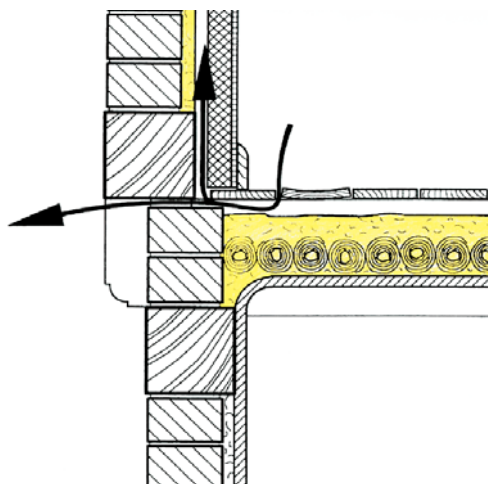


Abb. 2: Luftströmungspfade am Deckenanschluss mit Innendämmung [3].

tetechnisch riskant sind. Angesichts der Maßtoleranzen der alten Wände können auf der kalten Seite der Dämmung durchströmbare Hohlräume entstehen (vgl. Beitrag Innendämmung). Wenn z.B. im Bereich des Bodenanschlusses oder von Installationen innerhalb der Vorsatzschale Raumluft in diese Hohlräume eintreten kann, entstehen lange Strömungspfade, bis hin zu den Leckagen der alten Wandkonstruktion, insbesondere den Balkendurchdringungen, s. Abb. 2. Führen diese Strömungspfade an der nunmehr kalten Oberfläche der Wand entlang, so hat die Luft genügend Zeit, abzukühlen und dabei ihre Taupunkttemperatur zu unterschreiten.

#### 4 Beispielhafte Lösung am Deckenanschluss

Eine solide innenseitige Ertüchtigung der alten Fachwerkwand kann die Anwendung moderner Holzbauweisen bei der Sanierung sein. Eine Innendämmungsschale aus Konstruktionsvollholz vorgestellt und ggfs. punktweise mit dem alten Fachwerk verankert, bietet den Untergrund für eine doppelte innere Bekleidung: Eine Holzwerkstoffplatte übernimmt die Funktion von Dampfbremse und (quasi unzerstörbarer) Luftdichtheits-

ebene. Eine darauf angebrachte Gipsbekleidung stellt die raumseitige Oberfläche dar.

Das Ständerwerk kann u.U. auch statische Hilfsfunktionen übernehmen, wenn dies erforderlich ist. Der besondere Charme dieser Lösung liegt darin, dass sowohl in der Fläche als auch bei den Balkendurchdringungen ein solider Untergrund vorhanden ist, um die notwendigen Abklebemaßnahmen zur Sicherstellung der Luftdichtheit ausführen zu können. Abb. 3 zeigt dies am Beispiel eines Deckenanschlusses.

Um die Strömungspfade an der kritischen, kalten Seite zwischen Dämmung und altem Putz sicher auszuschließen, ist der Einsatz von Einblasdämmungen (insbesondere Zellulose-Dämmstoff) vorteilhaft. Bei Verwendung von faserförmigen Dämmstoffmatten sollten diese auf die maximale vorkommende Hohlraumtiefe dimensioniert werden und fest eingepresst werden, so dass ein Kontakt zur Altsubstanz hergestellt wird. Eventuelle Hohlräume innenseitig der Dämmung sind feuchtetechnisch unkritisch.

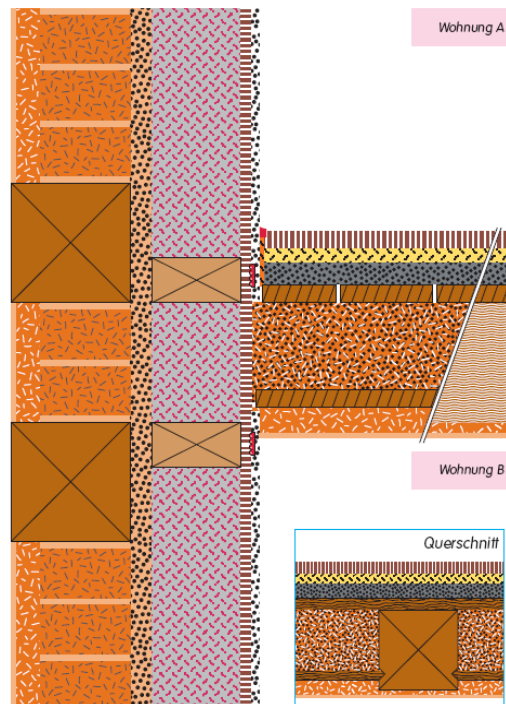


Abb. 3: Deckenanschluss Fachwerk mit Innendämmung (condetti® Detail) [4].

### 5 Holzbalkenköpfe im Massivmauerwerk

In nahezu allen Wohngebäuden, die bis zum ersten Weltkrieg gebaut wurden, finden wir im Bestand Holzbalkendecken – auch bei massivem Mauerwerk. Bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde diese Deckenkonstruktion zumindest im Bereich von Siedlungshäusern und z.T. auch bei obersten Geschossdecken mehrgeschossiger Gebäude weiter fortgeführt.

Schädigungen im Bereich dieser eingemauerten Balkenköpfe gehören zum Alltagsgeschäft der Holzschutzgutachter. Ursache für das Verfaulen von Balkenköpfen ist in aller Regel eindringendes (flüssiges) Wasser, z.B. durch mangelhaften Schlagregenschutz auf der Außenseite, oft auch durch Undichtheiten an Kastenrinnen auf den Mauerwerksköpfen und durch den unsachgemäßen Einbau von Bädern in die Altbausubstanz.

In diesem Anschlussbereich sind Feuchtebelastungen durch Dampfkonvektion in Folge von Luftströmungen im Bereich der Balkenaufleger denkbar. Diesbezüglich diagnostizierte Schäden sind bisher jedoch nicht bekannt geworden. Die Ursache hierfür mag sein, dass zum einen die Undichtheiten wesentlich geringer sind, als z.B. bei Fachwerkwänden, da die Balken nicht bis nach außen durchdringen. Nennenswerte Strömungen können nur dann entstehen, wenn das Mauerwerk vor Kopf der Balken stark luftdurchlässig ist. Dies kann jedoch nur bei unverputztem Sichtmauerwerk oder stark geschädigtem Außenmauerwerk eintreten. Aber auch in diesem Fall ist das Befehungsrisiko durch Schlagregen von außen sicherlich der dominante Einflussfaktor.

### 6 Deckenanschluss bei Innendämmung

Der Einbau einer Innendämmung vor einer alten Massivwand ist bei vorhandenen Holzbalkendecken mit Zusatzaufwand verbunden, wenn größtmögliche Feuchtesicherheit gewährleistet werden soll.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen die Decken im Anschlussbereich zu öffnen. Nach Herausnahme von 2 - 3 Dielenbrettern kann der Zustand der Balkenköpfe geprüft und ein ggfs. vorhandener Feuchteschaden entdeckt und beseitigt werden. Des Weiteren ist es in diesem Bauzustand möglich, mit Hilfe der Blower-Door festzustellen, ob Konvektionsströme am Balkenanschluss überhaupt vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall (Regelsituation bei durchgehendem Außenputz), so sind Sondermaßnahmen zur Luftdichtung bei der Innendämmung überflüssig.

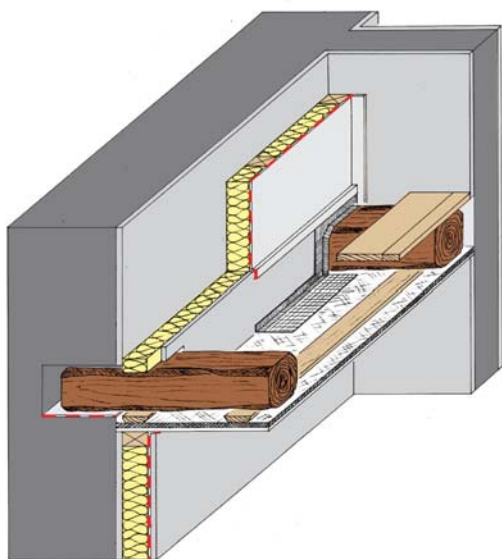


Abb. 4: Innendämmung bei Holzbalkendecke in Massivmauerwerk.

Bildquelle: Energieagentur NRW

In jedem Falle sollte jedoch die Wärmedämmung in den Deckenbereich hineingeführt werden. Dies vermeidet kalte Oberflächen, die Quelle von Schimmelpilzbildung im Deckenhohlraum sein können. Diese Gefahr besteht auch dann, wenn Anschlussbereich zwischen den Balken mit diffusionsoffenen Faserdämmstoffen ohne weitere Bekleidung ausgestopft wird. Unproblematischer wäre hier der Einsatz von Dämmstoffen mit einem  $\mu$ -Wert  $> 10$ .

Um den Dämmraum optimal vom Innenklima abzukoppeln, ist eine Konstruktionswahl entsprechend Abb. 4 zu empfehlen. Zwischen die Balken werden Stellbretter aus Holzwerkstoffplatten grob eingepasst, um den Dämmraum zu begrenzen. Je nach Anforderung an die Nachbesserung der Luftdichtheit kann zwischen dieser Abstellung und den Balkenköpfen bzw. der Oberseite der Deckenbekleidung abgedichtet werden. Für den Balkenanschluss eignen sich hier am Besten spe-

zielle Eckklebebänder, die sich gut anformen lassen (bei staubigem Untergrund ggf. primern).



Abb. 5: Luftdichtung bei geöffneter Holzbalkendecke: Abstellung und Abdichtung mit Gips-schlämme gegenüber Unterdecke, aus: [7].

Zwischen den Balken ist der Putzträger unter der Decke eine höchst schwierige Kleboberfläche. Hier hat sich der Einsatz von mineralischen Spachtelmassen bewährt (vgl. Abb. 5). Die Bewegungen in alten Holzbalkendecken sind in aller Regel so gering, dass die Spachtelungen auch langfristig weitgehend rissfrei bleiben können.

## 7 Fazit

Balkendurchdringungen in alten Außenwänden bedürfen der besonderen Beachtung, insbesondere beim Einbau von Innendämmungen. Die Hohlräume in den Deckengefachen sollten mit unverminderter Dämmstärke gefüllt werden. Risiken durch Dampfkongvektion lassen sich am besten eingrenzen, wenn vor der Sanierungsmaßnahme die Luftdichtheit der Anschlüsse kontrolliert wird. Hiernach kann ein abgestufter und den Verhältnissen angepasster Dichtungsaufwand geplant und ausgeführt werden.

### Quellen

- [1] Helmut Künzel: Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 1996
- [2] Gerd Hauser, Christoph Kempkes: Der Einfluss von windinduzierten Druckschwankungen auf das thermisch-hygrische Verhalten von durchströmten Leckagen, ZUB e.V., Kassel 2005, AIF - Forschungsvorhaben Nr. 13625N.
- [3] Reinhard Lamers, Innendämmung von Fachwerkwänden. In: die neue quadriga 1/2003.
- [4] Autorenteam: Deckenanschluss – Fachwerk mit Innendämmung. In: HOLZBAU 5-2005.
- [5] Robert Borsch-Laaks / Paul Simons: Wie dick darf die Innendämmung sein? In: WTA-Journal 3-2006.
- [6] Paul Simons, Fachwerksanierung mit 12 cm Innendämmung, in: die neue quadriga 1/ 2000.
- [7] Robert Borsch-Laaks und Wilfried Walther: Wärmetechnische Dachsanierung von außen (Teil 3). In: HOLZBAU 2-2007.



## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Innendämmung - eine Chance für den Holzbau?

**Robert Borsch-Laaks**

### 1 Einleitung

Angesichts der wachsenden Nachfrage nach wärmetechnischer Sanierung von Bestandsgebäuden ist ein Thema verstärkt auf der Tagesordnung der bautechnischen und bauphysikalischen Diskussion: Die Innendämmung von schützenswerten Fassaden. Um dieses Thema haben viele Planer und Handwerker lange Zeit einen großen Bogen gemacht, weil die Innendämmung generell als äußerst riskante Sanierungsmaßnahme angesehen wurde, wegen der „Verlagerung des Taupunktes in die Wand“.

Andererseits hat die mittlerweile 30 Jahre andauernde Bauforschung den eindeutigen Nachweis erbracht, dass problembewusst geplante und ausgeführte Innendämmungsmaßnahmen eine feuchtetechnisch beherrschbare Konstruktionsweise sind.

### 2 Feuchtetransport in der Innendämmung

Die im Lande weit verbreiteten Vorbehalte gegenüber der Innendämmung werden verursacht durch die Anwendung der Dampfdiffusionsberechnung (Glaser-Verfahren) gem. DIN 4108-3. Diese Berechnungen führen bei Innendämmungen vor massiven Altbauwänden stets zur Tauwasserbildung an der Grenzschicht zwischen dem Innenputz der alten Wand und der vorgesetzten Innendämmung. Bei diffusionsoffenen Innendämmungen ohne Dampfbremse (z.B. verputzte Mineralfaserplatten) können rechnerisch durchaus 3.000 g/m<sup>2</sup> Tauwasser anfallen. In manchen Fällen ist auch die rechnerische Austrocknung nicht gewährleistet, so dass ein Aufschaukeln der Feuchtigkeit befürchtet werden kann, vgl. [4].

Schon Laboruntersuchungen des FIW aus der Mitte der 80er Jahre, bei denen innen gedämmte Massivwände in einer Doppelklimakammer dem Blockklima nach Berechnungsnorm ausgesetzt

wurden, machten deutlich, dass sich die Wandkonstruktionen praktisch ganz anders verhalten [1]. Nach Öffnung der Konstruktionen wurde in keinem Fall der rechnerisch ermittelte Tauwasserfilm an der Grenzschicht festgestellt – auch nicht bei diffusionsoffenen Dämmungen vor hygroskopischem Mauerwerk nach DIN 1053. Ursache hierfür ist die kapillare Saugfähigkeit und das Sorptionsvermögen der historischen Wandbaustoffe. Bevor es zur Tauwasserbildung kommen kann, werden die Feuchteerhöhungen an der kalten Seite der Dämmschicht durch die Fähigkeit der Baustoffe zum kapillaren Flüssigtransport weiterverteilt. Von daher ist nicht verwunderlich, dass einzig bei den untersuchten Innendämmungen, die ohne Dampfbremse vor Betonwände angebracht wurden, der befürchtete Tauwasserfilm festgestellt werden konnte.

Diese kapillaren und sorptiven Feuchtetransportprozesse werden von der Glaser-Berechnung nicht berücksichtigt. Deshalb ist dieses Verfahren zur feuchtetechnischen Bewertung dieser Dämmmethode nicht empfehlenswert [4]. Mit den zwischenzeitlich entwickelten und vielfach validierten hygrothermischen Simulationsverfahren gem. [5] sowie neuerdings nach DIN EN 15026 [8] können feuchtetechnische Nachweise für Innendämmungen realitätsgerecht unter Berücksichtigung aller Feuchtetransportprozesse und mit realen Klimadaten kalkuliert werden.

Im Entwurf zum WTA-Merkblatt 6.4:2008 D [6] sind die wesentlichen Einflussfaktoren in einem Diagramm zusammengefasst (Abb. 1). Hierin wird auch die oft diskutierte Frage geklärt, ob und wie weit eine Begrenzung der Dämmdicke bei Innendämmungen sinnvoll ist. In der zitierten Grafik wird der erforderliche innere Dampfbremswert des Innendämmungsaufbaus für verschiedene Untergründe (Putzschicht und / oder Mauerwerk, das an die Innendämmung grenzt) dargestellt.



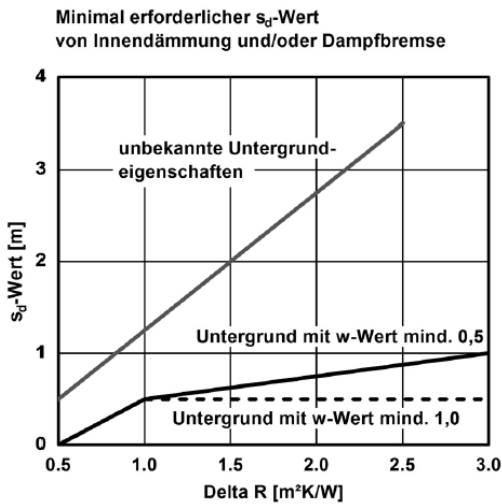


Abb. 1: Zusammenhang zwischen wärmeschutz-technischer Verbesserung  $\Delta R$  und erforderlichem Diffusionssperwert des Innendämmsystems für verschieden kapillaraktive Untergründe [6]

Der Kurvenverlauf zeigt, dass mit steigender Dämmdicke die erforderlichen Dampfbremswerte zunehmen. Bis zu einer Dämmdicke von 100 mm (WLS 040) können Innendämmungen auf beliebigem Untergrund ausgeführt werden, wenn deren  $s_d$ -Wert die Anforderungen der Grafik erreicht.

Hat der Untergrund aufsaugende Eigenschaften, so können Innendämmungen bis 120 mm Stärke auch mit geringeren Sperrwerten realisiert werden. Der Mindestwert ( $s_{d,i} \geq 0,5$  m) entspricht den Anforderungen für nachweisfreie Konstruktionen aus der DIN 4108-3:1981 [7].

### 3 Hinterströmung: Das besondere Risiko

Jenseits der Feuchteberechnungen, ob nun nach Glaser oder mit modernen Methoden, gibt es ein feuchtetechnisches Problem von Innendämmungen, das äußerst unberechenbar ist. Wenn

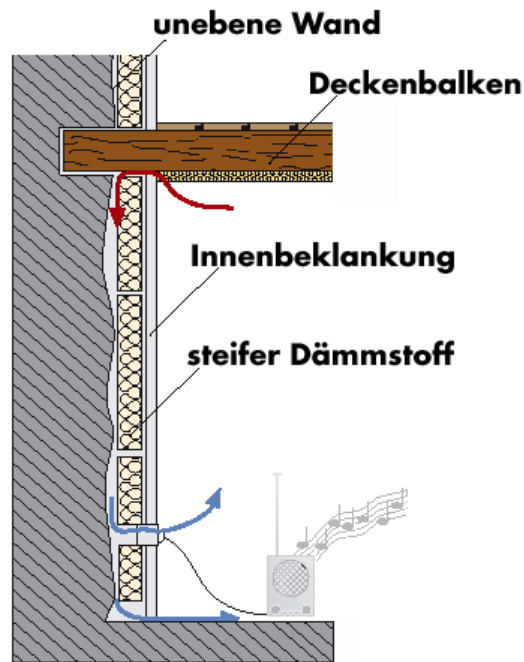


Abb. 2 Hinterströmung einer Innendämmung mit Hohlräumen.

Innendämmungen so ausgeführt werden, dass zwischen alter Wand und Dämmstoff Hohlräume verbleiben, so kann es durch Warmlufteintritt in Folge von Luftundichtheiten zur Hinterströmung der Dämmschicht kommen (Abb.2).

Insbesondere dann, wenn die feuchtwarme Raumluft auf längeren Strömungspfaden entlang der kühleren Wandoberfläche streicht, ist eine Feuchteerhöhung, die zur Schimmelbildung führen kann, möglich. Diese Gefahr besteht insbesondere, wenn die Bestandswände größere Unebenheiten aufweisen und steife Dämmstoffplatten eingesetzt werden, oder Verbundplatten mit der Mörtelbatzentechnik angesetzt werden (Abb. 3).

Die Höhe der hieraus resultierenden Feuchtebelastungen lassen sich nicht durch Nachweisrechnungen abschätzen. Hier kann nur die Vermeidungsstrategie weiterhelfen. Von Vorteil sind

Hohlraum füllende Dämmverfahren (z.B. Einblasdämmung). Bei Gefahr der Durchströmung, z.B. bei Balkendurchdringung, Luftundichtheiten bei Sichtmauerwerk) sind zusätzlich Luftdichtungsmaßnahmen an allen Anschlüssen anzuraten.



Abb. 3: Nach Entfernung einer Innendämmung aus EPS-Verbundplatten: Schimmelbildung ringsum die Gipsbatzen.

#### 4 Übliche Innendämmungen und die Holzbaualternative

Übliche Innendämmungsmethoden bestehen bislang vorherrschend als Verbundplatten aus EPS-Hartschaum und Gipskarton oder Metallständerwerken mit eingelegter Mineralfaserdämmung, Dampfsperre und innenseitiger Gipsbauplatte. Beide Methoden sind unter Fachleuten feuchte-technisch umstritten – insbesondere wegen der o.g. Gefahr der Hinterströmung (Dampfkongvektion). Bei Verwendung von Stahlblech-Trockenbauprofilen, die am alten Mauerwerk anliegen, werden Wärmebrückenwirkungen befürchtet, die zum einen die erhoffte Wärmeschutzwirkung herabsetzen und zum anderen zu niedrigen Oberflächentemperaturen auf der Innenseite führen.

Weiterhin ist die Akzeptanz dieser Maßnahmen bei Hauseigentümern und Mietern nicht besonders hoch, da „hohle Wände“, an denen nur mit Spezialdübeln Regale, Wandschränke etc. montiert werden können, als eine Verschlechterung der Nutzbarkeit der Räume empfunden wird. Vor diesem Hintergrund erfreut sich eine Innendämmungsmethode wachsender Beliebtheit, die dem Holzrahmenbau entlehnt ist. Hierbei wird ein wärmebrückenfreies Holzständerwerk vor die alte Wand gestellt und innen mit Holzwerkstoffplatte (z.B. OSB) und direkt darauf montierter Gipskartonplatte bekleidet (Abb. 4).

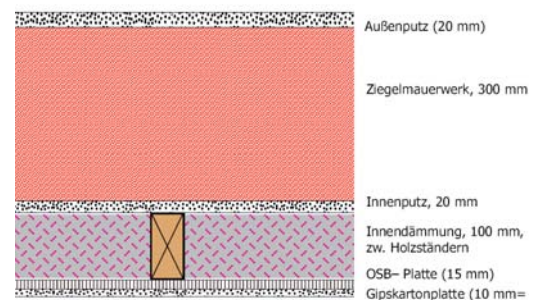


Abb. 4: Innendämmung á la Holzrahmenbau

Die Holzwerkstoffplatte übernimmt hierbei analog zum heutigen Holzrahmenbau nicht nur mechanische Aufgaben (z.B. als Befestigungsgrund für das Aufhängen von Schränken etc.), sondern wirkt auch als moderate Dampfbremse. Je nach Anforderungen an die Herstellung einer zusätzlichen Luftdichtheitsebene kann diese Platte mit den aus dem Holzbau bekannten Methoden zur luftdichten Schicht ertüchtigt werden. Sofern keine besonderen Undichtheiten in der alten Wandkonstruktion vorliegen, (z.B. beidseitig verputzte Wände und Massivdecken) sind zusätzliche Abklebungsmaßnahmen nicht erforderlich. Eine Hohlraumfüllende Dämmung und eine rissfreie Verarbeitung der Gipsbauplatten können Hinterströmungen ausschließen.

## 5 Hygrothermischer Nachweis der Holzbauinnendämmung

Die hier vorgeschlagene Innendämmungskonstruktion in Holzbauweise wurde vom Autor auch durch hygrothermische Simulation mit dem Berechnungsprogramm WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Holzkirchen, auf ihre bauphysikalische Tauglichkeit untersucht. Abb. 5 zeigt den Verlauf des Wassergehaltes der innenseitigen OSB-Platte über drei Jahre. Es ergibt sich eine jahreszeitliche Schwankung zwischen knapp 40 und gut 60 kg/m<sup>3</sup> (= 8 – 13 M.-%). Das Maximum des Holzfeuchtegehaltes tritt im Spätsommer auf und ist Folge der Diffusion von Mauerwerksfeuchtigkeit in Richtung Innenraum. Die Größenordnung der Auffeuchtung bleibt aber weit unterhalb der Holzschutzgrenze nach DIN 68800 ( $u_m = 20$  M.-%).

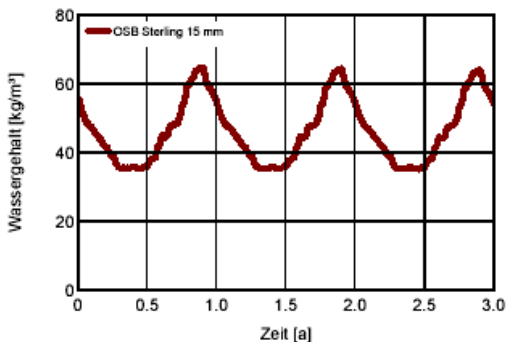


Abb. 5: Jahreszeitliche Schwankungen der Holzwerkstofffeuchte (10 kg/m<sup>3</sup> = 1 Vol.-%).

Abb. 6 zeigt die relative Luftfeuchte in den Porenhöhlräumen von Baustoffschichten, an denen es kritisch werden könnte. Der oben beschriebene Wassergehalt der inneren Holzwerkstoffplatte korrespondiert mit einer Porenluftfeuchtigkeit an der OSB-Oberfläche zum Dämmraum hin und liegt zwischen 40 und 70 % rel. Feuchte. Demgemäß ist dieser Holzwerkstoff an dieser Stelle der Nutzungsklasse 1 (Trockenbereich) zuzuordnen.

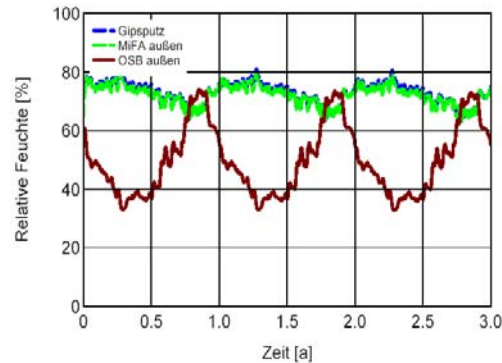


Abb. 6: Relative Luftfeuchte in den Baustoffporen an den kritischen Grenzschichten

An der Grenzschicht zwischen Dämmung und vorhandenem Gipsputz schwanken die rel. Luftfeuchten zwischen rd. 60 % rel.F. im Sommer und einem Wintermaximum von knapp 80 % rel.F. Tauwasserbildung (= 100 % rel.F.) tritt nicht auf. Auch Schimmelbildung ist an dieser Grenzschicht praktisch ausgeschlossen. Wird überdies ein Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen mit der hierbei üblichen Schimmelpilzschutz-ausrüstung eingesetzt, so kann auch ausgeschlossen werden, dass an der alten Wandoberfläche und den dort verbliebenen Tapeten oder anderen Nährböden eine Schimmelpilzbildung erfolgt.

### Fazit 1

Durch Innendämmungen in „Holzbauweise“ können feuchtesichere und energetisch wirksame Innendämmungen in Trockenbauweise konstruiert werden, die kostengünstig und vor allem sicher zu kalkulieren sind. Für die Nutzer hat die doppelte Innenbekleidung einen besonderen Charme einer festen, tragfähigen Oberfläche.

### 6 Innendämmung mit Holzfaserstoffen

Eine neue Generation von Innendämmungsmaterialien setzt auf eine andere Methode zur Begrenzung des Tauwasserproblems. Kapillaraktive Innendämmungen können die Feuchteerhöhungen an der Grenzschicht zur alten Wand über Flüssigwassertransport in den Materialhöhlräumen von

der kritischen Stelle weg in Richtung Innenraum hin zurücktransportieren. Antriebskraft für diesen Transportweg ist das Sorptionsgefälle. Bekanntlich ist die Ausgleichsfeuchte von hygroskopischen Materialien abhängig von der relativen Luftfeuchte ihrer Umgebung. Dieses Feuchtespeicher- und Transportverhalten ist bei Holz von Natur aus stark ausgeprägt. Diese Eigenschaft kann auch bei „hölzernen“ Dämmstoffen (Holzfaserdämmplatten) beobachtet werden.

Zurzeit wird von verschiedenen Herstellern diese Dämmmethode propagiert. Ein bauphysikalischer Nachweis kann hierfür nur über hygrothermische Simulation geführt werden.



Abb. 7: Innendämmung mit Holzfaserplatten (Pavadentro) mit Lehm als Ansetzmörtel, aus [3].

Im Rahmen einer Langzeituntersuchung wurde ein solches System im Herbst 2007 beim öffentlichen Baulabor am Energie- und Umweltzentrum am Deister, Springe, ausgeführt (vgl. Abb. 7). Mit Messtechnik der TU Dresden ausgestattet, sollen über eine dreijährige Messperiode die Feuchteverhältnisse untersucht werden. Erste publizierte Ergebnisse aus der Trocknungsphase belegen den Kapillareffekt (vgl. Abb. 8). Die Dämmkonstruktion wurde durch hohe Einbaufeuchte beaufschlagt (Untergrundaustausch und Ansetzmörtel

aus Lehmörtel). Dennoch erfolgte schon in der ersten Winterperiode eine rasche Abtrocknung an der Grenzschicht zwischen Dämmplatte und alter Wand. Der hiermit verbundene Feuchteabtransport war um ein Vielfaches höher, als dies aus reiner Diffusionsbetrachtung hätte sein können. Die Messergebnisse aus dem ersten „Normalwinter“ werden in der Zeitschrift HOLZBAU – die neue quadriga, Heft 3-2009 publiziert.

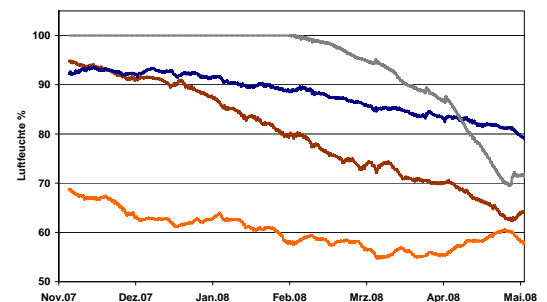


Abb. 8: Relative Luftfeuchte an der Grenzschicht zwischen Innendämmung und alter Wand im ersten Winter nach Ausführung im Herbst 2007. [3]

## Fazit 2

Innendämmungen aus kapillaraktiven Dämmstoffen, die dem Holz entstammen, sind eine viel versprechende Option. Gerade für den historischen Holzbau, spricht: Fachwerkhäuser, wird diese Dämmmethode gerne verwendet und auch in den Fachwerk-Merkblättern der WTA empfohlen. Die wissenschaftliche Auswertung solcher Vorhaben ist nach Meinung des Autors noch nicht ausreichend erfolgt. Insbesondere fehlen den Planern vielfach die herstellereigenen Kennwerte, um hygrothermische Simulationen für diesen Anwendungsfall durchführen zu können. Diese sind aber notwendig, da Kapillaritätseffekte von der klassischen Glaserberechnung nicht berücksichtigt werden können.

## Quellen

- [1] Joachim Achtziger: Praktische Untersuchung der Tauwasserbildung im Innern von Bauteilen mit Innendämmung. In: wksb Sonderausgabe 1985.
- [2] Robert Borsch-Laaks: Innendämmung – Wo ist das Risiko? In: WTA- Journal 3-2006, München.
- [3] Robert Borsch-Laaks und Wilfried Walther: Innendämmung mit und ohne Dampfbremse, Teil 1 und 2. In: HOLZBAU, Heft 2 und 4/2008, Verlag Kastner, Wolnzach.
- [4] Kurt Kießl. Wärmeschutzmaßnahmen durch Innendämmung. Beurteilung und Anwendungsgrenzen aus feuchtetechnischer Sicht. In: wksb 31/1992.
- [5] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. - WTA - WTA-Publications (Hrsg.): WTA-Merkblatt 6-1-und 6-2:2001. Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. München: 2001
- [6] WTA (Hg.): WTA-Merkblatt E 6-4. Innendämmung im Bestand – Planungsleitfaden. München: 2008:10
- [7] DIN 4108-3:1981, Normenausschuss Bauwesen im DIN: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz,. Beuth Verlag, Berlin August 1981.
- [8] DIN EN 15026: 2007, Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Beuth Verlag Berlin, 2007-07

## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Holzfaserplatten für die Innendämmung

**Stefan Müller, Karl-Heinz Knedlitschek**

Die Innenwanddämmplatte mit Funktionsschicht für die raumseitige Dämmung von Außenwänden speziell für die Altbausanierung.

### 1 Anwendung

Anwendungsbereich ist die raumseitige Anordnung bei Außenwänden im Trockenbereich. Räume mit konstant hoher Feuchte sind ausgeschlossen.

Eine ausreichende Schlagregendichtheit der Außenwand ist zwingend erforderlich.

Die Installationsebene sollte in die bestehenden Bauteile bzw. ggf. in die Absorberschicht (Abdichten!), in den Aufputz oder in den Fussboden bzw. Sockel verlegt werden.

### 2 Vorteile

- Wirksamer, nachträglicher Wärmeschutz für Gebäude mit denkmalgeschützten oder erhaltenswerten Fassaden.
- Verzicht auf Dampfsperren dank innovativer Funktionsschicht und Feuchtepufferung.
- Hervorragende Basis für kapillar leitfähige Lehm- und Kalkputze.
- Spürbare Verbesserung der Schalldämmung gegen Außenlärm.
- Angenehmes Raumklima auch im Sommer durch hohe Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit.
- Die Außenfassade kann belassen werden
- Die Montage ist einfach
- Bei temporär genutzten Räumen erfolgt ein schnelles Aufheizen

Die Holzfaserdämmplatte ist eine diffusionsoffene, ökologische, Innendämmung, die die kapillare Leitfähigkeit sowie die hygroskopischen Eigen-



Abb. 1: Ausgangsmaterial Holzfaser



Abb. 2: Wohnhaus, stark sanierungsbedürftig, Ansicht, Buetzberg CH



Abb. 3: Wohnhaus, stark sanierungsbedürftig, Innenseite Außenwand, Buetzberg CH



schaften von Holzfasern aktiv nutzt und so eine zerstörende Kondensatbildung vorbeugt. Das Trocknungspotenzial der kapillaraktiven Innendämmung bleibt erhalten. Dadurch kann unter Umständen sogar eine längerfristige Trocknung bereits vorgeschädigter Bauteile erreicht werden.

Dadurch wird der Wasserdampftransport schon in der Dämmebene abgebremst und Feuchtespitzen werden in der Holzfaserplatte gepuffert. Durch die nach innen gerichteten Kapillarkräfte wird ein Großteil des Kondensats wieder an die Raumluft abgegeben. Deshalb muss die HF- Platte stets mit kapillar leitfähigen Putzen auf Lehm- oder Kalkbasis kombiniert.



Abb. 4 Systemaufbau Pavadentro

### 3 Wirkungsweise der Holzfaserplatte

Jeder kennt die Vorzüge von atmungsaktiver Funktionsbekleidung. Diese Materialien schützen vor Regen sowie Wind und transportieren die Feuchtigkeit von der Haut weg. Eine raumseitige Dämmung von Außenwänden muss ähnlich funktionieren. Einerseits soll die Dampfdiffusion von innen nach außen gewährleistet sein. Andererseits darf es jedoch nicht zu Kondensat im bestehenden Bauteil kommen

Die hygroskopische Speicherfähigkeit der diffusionsoffenen, kapillaraktiven Innendämmung puffert Feuchtespitzen der Innenraumluft und trägt zur Regulierung des Innenklimas bei. Die Kapillaraktivität sorgt für eine schnelle und großflächige Verteilung der Feuchte in der Dämmung während der Winterperiode, d. h. die Feuchte bleibt im Faserverbund nicht an der kalten Stelle (Taupunkt), wie z. B. bei mineralischen Fasern, sondern verteilt sich im Medium und verdunstet dann an der Oberfläche. Dadurch wird die Trocknung beschleunigt und die Dämmwirkung verbessert.

In untenstehender Abbildung ist das Wirkprinzip der kapillaraktiven HF- Innendämmung dargestellt:

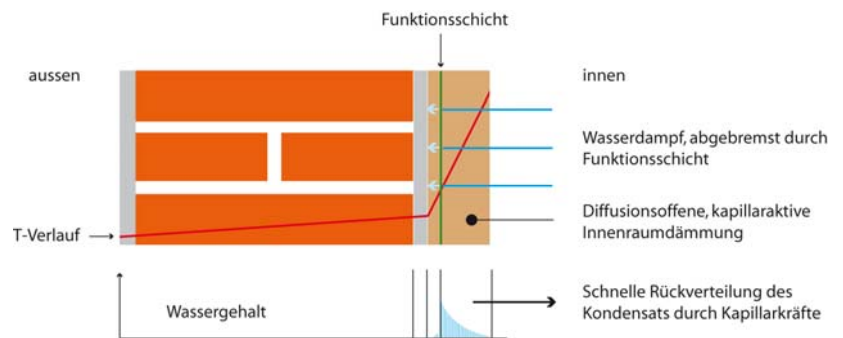


Abb. 5 Feuchteverlauf mit Funktionsschicht, Die Kondensatebene liegt in der kapillaraktiven Dämmung.

Aufgrund der bestehenden Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand diffundiert Wasserdampf in die Konstruktion. An der grünen Funktionsschicht akkumulieren sich die Wasserdampfmoleküle im Porenraum des Dämmstoffes. Die nach innen gerichteten Kapillarkräfte und mit dem Vermögen Wasser in seinen Poren zu leiten, transportiert die HF- Platte einen Teil des Kondensats zurück an die Oberfläche, von wo aus die Feuchtigkeit in den Raum zurückverdunstet.

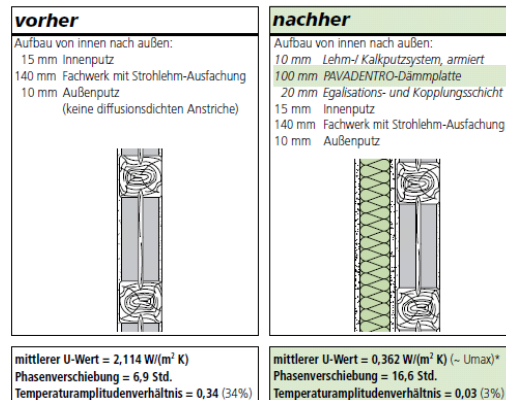


Abb. 6 Konstruktionsbeispiele Fachwerk-Außenwand

#### 4 Bauphysikalische Besonderheiten

Die Sanierung von Gebäuden, deren Fassaden sichtbar bleiben sollen, kann wegen der Kondensatbildung im Bauteil problematisch sein.

Unschlagmäßige Innendämmung kann zu bedenklichen Zuständen der Gebäudehülle führen. Durchfeuchtungen und biologischer Abbau sind häufige Schadensbilder in alten Bauteilen.

Der Einsatz üblicher dampfsperrender Innendämmsysteme kann in dieser Hinsicht risikoreich, fehleranfällig und für historische Bauwerke mit erhaltenswerten Fassaden ungeeignet sein.

Da bei dieser HF-Platte durch den Nichtgebrauch einer Dampfsperre ein Arbeitsschritt wegfällt, direkt auf Platte verputzt werden kann und somit weniger Material benötigt wird, besitzt die Holzfaserdämmplatte Vorteile beim Kosten- und Arbeitsaufwand. Die klassische Variante mit Dampfsperre kann allein beim U-Wert punkten. Doch kann dies nicht wirklich ein Vorteil sein, da immer ein hohes Gefahrenpotenzial besteht, dass die Hauswand in kurzer Zeit feucht und die Mauer deshalb zerstört wird sowie das Raumklima unangenehm ist.

Die im bewährten Nassverfahren hergestellte Holzfaserdämmplatte besitzt eine hohe Speicherkapazität für Feuchte und kann anfallenden Wasserdampf aus der Raumluft aufnehmen. Das Nassverfahren erlaubt es aber auch, eine spezielle mineralische Funktionsschicht in die Holzfaserdämmplatte einzubringen. Diese Funktionsschicht sorgt für eine kontrollierte Akkumulation der Feuchte, welche dann kapillar rückverteilt und an das Raumklima abgegeben wird, was die Wandkonstruktion bauphysikalisch sicher macht.

Wie bei Innenraumdämmsystemen üblich, ist eine vollflächige Kopplungsschicht zwischen Wandkonstruktion und Dämmplatte zwingend erforderlich. Bei der HF-Platte muss diese Kopplungsschicht zusätzlich noch kapillarleitfähig sein; Rotkalk und Lehm sind Materialien, die diese Anforderung erfüllen und sich deshalb sehr gut eignen. Wärmebrücken gilt es unbedingt zu beachten, wenn Bauteile wie Decke oder Innentrennwände eingebunden werden.

#### 5 Feuchtegehalt

Mit Pavadentro ist die durchschnittliche Feuchte im bestehenden Bruchsteinmauerwerk und dem Holzriegel um  $0,03 \text{ kg/m}^2$  niedriger verglichen mit der Dampfsperrevariante. Somit erreicht die Holzfaserdämmplatte bei der Kondensatmenge wesentlich bessere Werte: Dieser liegt stationär bei  $1,524 \text{ kg/m}^2$ . Die Dampfsperrevariante kommt mit  $14,19 \text{ kg/m}^2$  auf einen fast zehnfach höheren Wert. Bei der Einstellzeit – bis diese stationäre Feuchte erreicht wird – zeichnen sich ebenfalls sehr deutliche Unterschiede ab: Die Variante mit der Dampfsperre erreicht bereits nach 17,7 Jahren die maximale Kondensatmenge, während mit Pavadentro sich diese erst nach 268 Jahren einstellt. Das heißt, dass im Fall der Variante mit Dampfbremse die sehr hohe Feuchte von über  $10 \text{ kg/m}^2$  nach sehr kurzer Zeit bereits erreicht wird, während es mit dieser HF-Platte



sehr lange dauert, bis das wesentlich kleinere Maximum von  $1,524 \text{ kg/m}^2$  erreicht ist.

### 6 Eigenschaften, Abmessungen

Die wandseitige Funktionsschicht der HF-Platte im Format von  $60 \times 102 \text{ cm}$  ist in den Dicken 40, 60, 80 und 100 mm erhältlich.

Die Funktionsschicht der Platte muss immer wandseitig sein, bzw. bei 40 mm Platte befindet sich diese in der Plattenmitte.

Die mit umlaufender Nut-Feder ausgestattete Holzfaserdämmplatte hat eine Rohdichte von  $180 \text{ kg/m}^3$  und einen Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von  $0,045 \text{ W/mK}$ .



Abb. 7 Schematischer Wandaufbau

### 7 Sonstige Anwendungen

Die HF-Platte eignet sich für die raumseitige Anwendung, wobei auch ein Einsatz in Räumen wie Dusche/Bad zulässig ist, wenn nach der Benutzung für genügend Lüftung bzw. Ablüftung gesorgt wird. Eine Anwendung in Räumen mit konstant hoher Luftfeuchte wie Hallenbädern etc. ist nicht zulässig. Die Außenwand muss eine ausreichende Schlagregendichtigkeit aufweisen und aufsteigende Feuchtigkeit muss sicher verhindert werden.

### 8 Befestigung

Zur Befestigung sind mindestens vier Tellerdübel pro Platte oder mindestens 13 Breitückenklammern notwendig.

### 9 Bauphysikalische Berechnung

Die Berechnungsergebnisse setzen eine absolut einwandfreie Montage voraus. Erfahrungsgemäß gestaltet sich die exakte Montage von Dampfsperren als schwierig. Die Holzfaserdämmplatte ist hier durchaus toleranter. Diese Toleranz beweist die Platte auch bei den einzubindenden Bauteilen, was bei der Innendämmung oft heikel ist. Bei dieser HF-Platte kann der Dampf kontrolliert über die gesamte Fläche diffundieren und rückverteilt werden. Bei einer Dampfsperre besteht die Gefahr, dass sich die Feuchtigkeit an einem einzubindenden Bauteil, wie z.B. einem Holzbalken, ansammelt und diesen entsprechend durchfeuchtet.

Unter Berücksichtigung, dass es sich bei Pavadentro um eine hygroskopische, kapillaraktive Dämmung handelt, liefern Berechnungen mit Programmen, die diesem Umstand nicht Rechnung tragen, nur teilweise korrekte Resultate. Deswegen erfolgte die Berechnung nach Jenisch mit dem Programm Dämmwerk.

Die wichtigsten Punkte:

- Wenn eine Pavadentro- Konstruktion die DIN 4108 nach Jenisch erfüllt, gibt es grundsätzlich noch viel Reserven
- Berechnungen können deshalb mit Jenisch durchgeführt und bis an die Grenzwerte der Norm bedenkenlos freigegeben werden
- Wenn eine Konstruktion die Norm mit Jenisch nicht erfüllt, kann/soll COND oder ein ähnliches Programm verwendet werden
- raumseitige Dämmung von Außenwänden
- nach Herstellervorschrift auf das vorhandene Mauerwerk mit Kalk- / Kalk-Zement Klebemörtel, MG P II / CS II nach DIN V 18550/DIN EN 998-1
- Klebemörtel mit 10er Zahntraufel auf die HF-Dämmplatten auftragen und vollflächig im Leibungsbereich verkleben
- anschließend gleich verdübeln.
- Vor Weiterarbeit mind. 48 Std. Standzeit einhalten.

**Material**

Die Holzfaserdämmplatten entsprechen:

- DIN EN 13171, Baustoffklasse B2, WDV 045
- speziell entwickelte mit Funktionsschicht für
- Dämmstoffdicken: 40 / 60 / 80 / 100 mm
- Dämmplatten: z.B. Marmorit pavadentro (1002 x 600 mm)

Kennwerte	Einheit	Wert
Dichte $\rho$	kg m <sup>3</sup>	180
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D$	W (mK) <sup>-1</sup>	0.045
Druckspannung bei 10 % Stauchung	N mm <sup>-2</sup>	≥ 0.7
Zugfestigkeit senkrecht zur Ebene	N mm <sup>-2</sup>	≥ 0.005
Spez. Wärmekapazität c	J (kgK) <sup>-1</sup>	2100
Längenspezifischer Strömungswiderstand	kPa s m <sup>-2</sup>	≥ 100
Brandkennziffer	BKZ	4.3 – B2 – E
Dampfdiffusion bei 50 % RLF $W_{data}$	g m <sup>2</sup> (24 h) <sup>-1</sup>	ca. 45.5
S-Werte (40, 60, 80 und 100 mm Pavadentro)	m	0.65 – 0.75 – 0.85 – 0.95
Holzfaserdämmplatte gemäss DIN EN 131 171		WF – EN 13 171 – T4 – CS(10W)70 – TR5,0 – AF100
Anwendungstypen gemäss DIN V 4108-10, Tabelle 13		DI-dm, WI-dm
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429

Abb. 8: Kennwerte

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		DIN EN 13171
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429
Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert $\lambda$	W/(m K)	0,045
Rohdichte $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	ca. 180
Spez. Wärmekapazität c	J/(kgK)	2.100
$s_R$ -Wert PAVADENTRO 40 / 60 / 80 / 100 mm		0,65 / 0,75 / 0,85 / 0,95 m
Baustoffklasse DIN 4102-1		B2
Euroklasse DIN EN 13501-1		E

Abb. 9 Technische Daten

Ausführung	Einheit	Wert
Breite/ Länge	cm	60 x 102
Dicke	mm	40 / 60 / 80 / 100
Deckmaß	cm	59 x 101
Kante	-	Nut+Feder umlaufend

Abb. 10: Lieferform

**Inhaltsstoffe:**

Schweizer Nadelholz  
Zusatzstoffe:  
max. 4,0 % Silikate  
max. 2,0 % Weissleim  
(PVAc zur Schichtenverklebung)

**Anwendungstypen/ Deklaration:**

**Gemäß DIN 4108-10**  
DI-zk/-zg, WI-zk/-zg  
**Gemäß DIN EN 13171**  
T4-CS(10\Y)70-TR5,0-AF100

Abb. 11: Inhaltsstoffe, Anwendungstypen, Deklaration

## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Passivhaus

### Till Schaller

Als ob es wirklich noch dieses weiteren Hinweises bedurft hätte: Im Verlauf der Entwicklung der "Princess Elisabeth", der weltweit ersten „Zero-Emission Polarforschungsstation“ für die Antarktis kam man mit dem Baumaterial Aluminium bei der Entwicklung der wärmedämmenden Hüllkonstruktion einfach nicht mehr weiter. Selbst die wenigen, die Hülle durchdringenden Befestigungen aus Metall verschlechterten den U-Wert erheblich.

Ein tragfähiger, leichter Werkstoff mit gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit wurde für die hochgedämmte Außenwand immer noch gesucht, und schließlich entschied man sich für ... Holz.

Als autarke und nach dem Prinzip des Passivhauses konzipierte Station versorgt sie sich ausschließlich aus erneuerbaren Energien und ermöglicht den Forschern gleichzeitig in der Antarktis Klimaforschung zu betreiben. Zudem soll sie demonstrieren, dass selbst unter antarktischen Bedingungen eine nachhaltige Energieversorgung möglich ist.

Die komplett in Belgien vorgefertigten Gebäudeteile wurden für den Transport zerlegt, in Containern verschifft und im Februar 2008 in der Antarktis installiert.

Als ob es also noch eines weiteren Hinweises bedurft hätte, dass das Bauprinzip Passivhaus und der Baustoff Holz wirklich vorzüglich zusammen passen – selbst unter den denkbar härtesten Bedingungen auf der Erde, in der Antarktis.

### 1 Baukonzept Passivhaus

Gleich ob im Neubau oder in der energetischen Sanierung von Altbauten: Der U-Wert für Außenwände im Passivhausstandard verbessert sich entsprechend der erhöhten Dämmstärken auf et-

wa  $U = 0,12 - 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  und ist damit um den Faktor 10 besser als der von Häusern der 60er und 70er Jahre mit etwa  $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Abb. 1: Dämmständerfassade, Allensbach

Dies bedeutet nichts anderes, als dass durch jeden Quadratmeter der Außenhülle des Passivhauses nur noch ein Zehntel der Wärme verloren geht, die durch die gleiche Fläche eines, heute vielleicht erst 40 Jahre alten Hauses vergedet wird.

Eine sehr gut gedämmte und möglichst luftdicht ausgeführte Gebäudehülle und eine 3-fach Verglasung sind also obligatorisch. Die geringe Wärmemenge, die das Haus nun als Wärmebedarf noch benötigt, wird diesem über eine Lüftungsanlage zugeführt.

Die Wärme der Abluft, wird dieser zusätzlich noch vor Verlassen des Hauses über einen Wärmetauscher der Lüftungsanlage weitgehend entzogen.

Erst durch diese konsequente Verlustvermeidungsstrategie - ein Passivhaus benötigt nur noch etwa 20 % der Heizenergie eines typischen heutigen Neubaus - kann deshalb, über eine Wärmeverteilung durch Lüftung hinaus, auf ein herkömmliches Heizungssystem im Prinzip verzichtet werden.

Allerdings ist ein Passivhaus in der Errichtung derzeit erfahrungsgemäß etwa 6 – 8 % teurer als herkömmliche Gebäude, hat aber dafür während seiner gesamten Standzeit im Betrieb verschwindend geringe Betriebskosten für Heizung und Warmwasser - vor dem Hintergrund weiter steigender Energiepreise ein nicht zu unterschätzender Vorteil, der eine größtmögliche Zukunftssicherheit bietet.

Diese etwas höheren Kosten für den zusätzlichen Wärmeschutz, die Dreifachverglasung der Fenster und die Lüftungsanlage können jedoch zum Teil noch durch den Wegfall der herkömmlichen Heizungsanlage wieder kompensiert werden.

Die Investition in den erhöhten Dämmstandard wird sich auf jeden Fall je nach Steigerungsrate der zukünftigen Energiepreisentwicklung in nur wenigen Jahren amortisiert haben.

Um eine bessere Leistungsreserve zur Verfügung zu haben und unter dem Motto „ Passivhaus meets Romantik“ entstehen jedoch auch vermehrt Passivhäuser, in denen noch ein kleiner im Wohnraum aufgestellter Holzpelletofen für die Bereitstellung des Restwärmebedarfs sorgt. Holz sorgt dort also nicht nur als Baustoff für eine sehr gut gedämmte Gebäudehülle, sondern liefert auch noch den regenerativen Brennstoff dazu.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang unseren großen Gebäudebestand, so könnten überschlägig von den über 35 Millionen Wohnungen in Deutschland mit einem durchschnittlichen Heizwärmebedarf von 150 kWh/m<sup>2</sup> im jetzigen unsanierten Zustand nur etwa 5 % theoretisch ihre modernen Holzheizungen mit dem Brennstoff Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft versorgen. Sollte uns jedoch in den kommenden Jahrzehnten die Sanierung aller Gebäude auf den durchschnittlichen Standard von Drei-Liter-Häusern gelingen, so könnte dann immerhin ein Vier-

tel aller Wohnungen nachhaltig mit Holz beheizt werden. Das Ziel der zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien erfordert also grundsätzlich die Steigerung der Energieeffizienz durch die Verbesserung unserer Gebäudehüllen im Bestand.

Die Wohnqualität im Passivhaus aus Holz ist durch eine große Behaglichkeit geprägt. Warme Innenoberflächen der Außenwand und geringe Temperaturdifferenzen zwischen diesen oder den hochwärmegeprägten Fenstern, sowie der Lufttemperatur im Wohnraum führen zu einem angenehmen Wohnklima, auch im Winter. Durch die Lüftungsanlage wird das ganze Jahr immer ausreichend Frischluft zur Verfügung gestellt. Zugserscheinungen und Geräusche gibt es bei den erforderlichen geringen Luftgeschwindigkeiten bei korrekt dimensionierten Anlagen praktisch keine.

Bei der Verwendung von Luft als Heizmedium wird jedoch im Winter kalte trockene Außenluft erwärmt und in das Gebäude eingebracht. Dies führt bei großen Luftmengen fallweise auch zu relativ trockener Raumluft. Deshalb wird neuerdings teilweise auch wieder mit Wasser als Heizmedium in Fußboden- oder Wandheizflächen im Passivhaus gearbeitet. Der Vorteil ist dabei, dass vermehrter Wärmebedarf nicht durch größere Luftmengen, als für den Frischluftbedarf eigentlich erforderlich, eingebracht werden muss.

## **2 Bauteile und Komponenten eines Passivhauses**

Heute werden schon viele für Passivhäuser geeignete Komponenten aus Holz in großen Serien hergestellt. Architekten und Bauherren können inzwischen unter vielen konkurrierenden Anbietern beispielsweise für Holzdämmständer, Holzweichfaserplatten oder auch Passivhausfenster aus Holz auswählen.

Zu den vielen bereits vom Passivhaus-Institut zertifizierten Produkten und Komponenten kommen

mindestens noch einmal so viele, die wegen der Gebühren für die Zertifizierung von den Firmen dort nicht zur Prüfung vorgelegt werden.

Dazu trägt derzeit auch die rasche Folge der Innovationsschritte in vielen mittelständischen Unternehmen bei, denn jede Veränderung einer einzelnen Komponente, beispielsweise eines Fensters, würde jedes Mal wieder eine erneute Zertifizierung erfordern.

### 2.1 Bodenplatte / Kellerdecke

Um die sehr guten U-Werte von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu erreichen, sind in der Regel Dämmpakete erforderlich, die vor ein paar Jahren noch für großes Aufsehen gesorgt haben. Dämmstärken von ca. 30 cm mit den heute üblichen Dämmstoffen sind hier einzuplanen. Im Bereich der Bodenplatte sind dabei vor allem aber auch die Themen der Wärmebrückenfreiheit und die Systemlage der beheizten Hülle anzusprechen.

Bodenplatten, auf denen massive Wände aufsitzen und die von oben gedämmt sind, haben ein erhebliches Problem mit der Wärmebrücke entlang der aufgehenden Wand, wo der Systemprung der Dämmebene stattfindet. Was im Niedrigenergiehaus noch tolerierbar ist, wird durch zu große Wärmeabflüsse im Passivhaus zum Leck.

Dämmung unterhalb der Bodenplatte ist deshalb für das Passivhaus, vor allem im Massivbau zur Regel geworden. Im Holzbau dagegen gibt es den Vorteil, wärmebrückenfrei auf der ebenerdigen und unterseitig nicht gedämmten Bodenplatte (bei Häusern ohne Keller) oder auf der Kellerdecke aufzubauen. In diesem Zusammenhang ist es entscheidend, dass der Keller als unbeheiztes Volumen errichtet wird oder ganz entfällt und beispielsweise durch ebenerdige Abstellräume ersetzt wird.

### 2.2 Außenwand

Auch bei den Außenwänden sind die sehr guten U-Werte von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu unterschreiten, heute spricht man sogar oft schon von  $0,12 - 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Dies kann am einfachsten im modernen Holzbau erreicht werden. Ausgeklügelte Dämmständer, die nur noch wenige Stegverbindungen zwischen statisch nutzbarem Tragständer und der Fassade aus verschiedenen Holzwerkstoffplatten haben, bilden Kammern in der Fassade, die entweder mit Zellulosedämmstoff oder Schüttungen aus Holzspänen ausgeblasen oder mit Mineralwolle ausgefüllt werden können. Die U-Werte liegen hier je nach Produkt in den Wärmeleitfähigkeitsgruppen WLG 035 und WLG 040. Dämmstärken von 32 – 40 cm sind dabei die Regel. Diffusionsoffene Bauweisen ermöglichen auf Dauer, dass selbst beim Eindringen von Feuchtigkeit durch Leckagen, diese immer wieder nach außen abgeführt werden kann.



Abb. 2: Dämmständer Wandaufbau

Dicker werden die Wände gleicher Dämmqualität eindeutig im Massivbau. Die Wandstärken addieren sich hier auf 45 - 50 cm.

Die im Holzbau als innere Schale fungierende Holzwerkstoffplatte, soll gleichzeitig dampfbremsend und luftdicht sein. Hier wird derzeit häufig eine OSB-Platte eingesetzt. Deren Qualität und Ausdehnungsverhalten ist für das Haus von zentraler Bedeutung. Hier sollten nach unserer Erfahrung nur noch OSB 4 Platten zum Einsatz kommen, weil an OSB 3 Platten bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit von weit über 80 %, wie sie auf Baustellen in der kalten Jahreszeit vorkommen kann, eine bis zu zehnfach höhere Längenausdehnung zu beobachten ist.

Diese großen Längenausdehnungen führen aber dann fallweise zu Rissen in der Innenoberfläche aus Gipsplatten, die meist direkt mit der OSB verschraubt werden. Außerdem könnten durch daraus resultierende Verschiebungen im Baukörpergefüge Leckstellen in der Luftdichtheitsebene entstehen, die es zu vermeiden gilt.

In letzter Zeit ist bei Luftdichtheitsmessungen auch erstmals von Kollegen der Verdacht geäußert worden, dass selbst OSB 4 Platten in der Fläche, also nicht am verklebten Stoß, punktuell nicht luftdicht sein könnten. Dieser Vermutung sollte zumindest einmal nachgegangen und die Qualität der auf dem Markt angebotenen Platten in dieser Hinsicht geprüft werden.

### 2.3 Dach

Die Dachkonstruktionen von Passivhäusern müssen ebenfalls U-Werte von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  oder besser erzielen. Gerade beim Dach ist es sinnvoll, falls möglich, diese Werte noch weiter in Richtung von  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu unterschreiten. Je nach Bauform hat es etwa ein Viertel bis ein Drittel Flächenanteil an den Hüllflächen und damit auch an den Gesamtverlusten. Da sich für Raumluft wegen ihrer temperaturabhängigen unterschiedlichen Dichte bei nur schwach bewegten Luftströmen Temperaturschichtungen ergeben, bleibt die etwas kühlere Luft eher unten, die etwas wärme-

re Luft eher oben. Da Verluste immer auch abhängig von der Differenz der Innen- und Außentemperaturen sind, sind deshalb etwas höhere Verluste über das Dach zu erwarten.

Da Dächer meistens in Holz konstruiert werden, herrschen hier verschiedene Sparrenkonstruktionen aus schmalen hohen Hölzern, oder mit Nebenträgerlagen in Querrichtung vor, damit Wärmebrückenübergänge über das Holz minimiert werden können. Durchgehende Dämmstoffschichten aus kaschierten Elementen sind hier ebenfalls sehr sinnvoll, für sie ist jedoch eine Unterkonstruktion mit Schalung oder Plattenwerkstoffen erforderlich.

Im Unterschied zum bereits erheblich breiteren Angebot an Dämmständern für die Wandkonstruktion, ist das Angebot an geeigneten Holz-Dämm-Sparren für das Dach derzeit leider noch sehr dünn und passivhaustaugliche Entwicklungen wünschenswert.

### 2.4 Fenster und Türen

Den Fenstern und Fenstertüren sowie Haustüren kommt im Passivhausbau eine besonders wichtige Rolle zu. Erst durch die Entwicklung der extra gut gedämmten Holzrahmenkonstruktionen mit Zwischenlagen aus druckfesten Schaumdämmstoffen oder mehreren hintereinander geschalteten Luftkammern war es möglich, Rahmen zu fertigen, die für die Anforderungen des Passivhausbaus geeignet sind. Die Glasanteile sind auf eine dreifache Isolierverglasung angewiesen, sonst können U-Werte für die gesamte Fensterkonstruktion von höchstens  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  nicht eingehalten werden. Darüber hinaus kommen in diesem Bereich jährlich neue Entwicklungen auf den Markt, schon sind U-Werte von  $0,5 - 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei passablen g-Werten (Maß der Lichtdurchlässigkeit) in greifbare Nähe gerückt. Schon beim ersten Passivhaus in Darmstadt wurden übrigens zum Begrenzen der nächtlichen



Verluste zusätzliche spezielle Außendämmblenden entwickelt, die die ermittelten Werte nochmals nach unten verbessern können. Da die beweglichen Teile, wie Schiebe-, Klapp-, oder Rollläden jedoch derzeit nicht für die U-Wertberechnungen der Fenster herangezogen werden dürfen, entsteht in dieser Hinsicht leider jedoch noch kein ausreichender Innovationsdruck.

Da sich Dämmblenden als nächtlicher und winterlicher Wärmeschutz besonders gut eignen würden, die Gesamtbilanz des derzeit schwächsten Bauteils am Passivhaus, des Fensters, noch deutlich zu verbessern, ist eine Anpassung der Berechnungsverfahren an die technischen Möglichkeiten anzustreben.

### 2.5 Konstruktives Detail



Abb. 3: Dämmständer mit Ortgang

Dem konstruktiven Detail ist im Gesamtkonzept des Passivhauses eine nicht zu unterschätzende Rolle zugewachsen. So ist allein das Thema der Vermeidung von Wärmebrücken in der Summe

entscheidend für das Einhalten der Gesamtkriterien. Diese Wärmebrücken drohen bei falscher Planung an den bereits angesprochenen Anschlusspunkten der Bodenplatte zur aufgehenden Wand, an den Außenecken, an den Durchstoßpunkten für Medien und Rohre, sowie an den Anschlüssen der Wand zum Dach. Hauptziele der Detaillierung sind die Herstellung einer größtmöglichen Luftdichtheit und die Reduzierung der Holzanteile in der Wand.

### 2.6 Luftdichtheit

Um den unkontrollierten Luftwechsel in befriedigender Weise unter die definierte Schwelle von weniger als dem 0,6-fachen des eingeschlossenen Luftvolumens pro Stunde zu drücken, sind an allen Bauteilübergängen und Durchstoßpunkten eine sorgfältige Planung und vor allem auch eine gewissenhafte Bauleitung erforderlich. Überlappende Stöße von Baupapieren oder Folien müssen mit den jeweils für das System geeigneten Klebebändern oder Dichtschnüren verschlossen werden. OSB-Platten mit verklebten Stößen dienen als luftdichte Ebene auf der Wandinnenseite. Wand-Dach-Anschlüsse sind dabei nicht mehr auf herkömmliche Weise ausreichend luftdicht zu lösen, denn das fehlerfreie Umkleben eines jeden einzelnen über die Außenwand auskragenden Sparrenkopfes ist nahezu unmöglich. Das ist auch ein Grund für die häufig knappen Traufen und Ortgänge von Passivhäusern.

### 3 Vor- und Nachteile der Holzbauweise gegenüber anderen Bauweisen

Am augenfälligsten unterscheidet sich die Passivhausbauweise natürlich durch die großen Dämmstärken. Außenwände mit U-Werten von 0,12 – 0,15 W/m<sup>2</sup>K können dabei auf völlig unterschiedliche Weise und im Prinzip mit allen herkömmlichen Baustoffen errichtet werden.

Der Baustoff Holz ist hier jedoch im Bezug auf die notwendigen Mindestwandstärken eindeutig im



Vorteil. Die im Vergleich dünnste Wandkonstruktion mit insgesamt 30 – 35 cm ist dabei derzeit nur mit Hilfe von besonderen Holzständerkonstruktionen möglich, die innen- und außenseitig mit Holzwerkstoffplatten beplankt werden. Alle etwa 60 cm wird ein so genannter Holz-Dämmständer gestellt, der meist aus einem vorderen und hinteren Tragprofil (Querschnitte 6/6 bis 6/12 und Ständerbreiten z.B. 24-30-36 cm), und je nach Hersteller unterschiedlichen horizontalen Verbindungselementen aus Holz oder Holzwerkstoffen besteht. In die zwischen den Dämmständern entstehenden, teilweise geschosshohen Kammern wird als Wärmedämmung Zellulose aus ungebrauchten, zerkleinerten Tageszeitungen geblasen. Alternativ kommen auch noch andere, idealerweise nachwachsende Rohstoffe für die Füllung in Frage: Holzfaserdämmung, Holzspäneschüttungen, Flachs oder Schafwolle.

Der Regel einer von innen nach außen zunehmenden Diffusionsoffenheit folgend, wird die innere Schale möglichst luftdicht und diffusionsbremsend durch eine OSB-Platte (Oriented-Strand-Board) gewährleistet, deren Stöße sorgfältig verklebt werden müssen; die äußere Beplankung bildet meist eine nur winddichte und diffusionsoffene Holzweichfaserplatte, DWD-Platte oder andere Holzwerkstoffplatte, die entweder als Putzträgerplatte dienen kann oder selbst wiederum durch eine Unterkonstruktionslattung mit einer hinterlüfteten Schale aus Holz oder anderen Plattenwerkstoffen geschützt wird.

Theoretisch könnten die Ständer jedoch auch aus herkömmlichen Holzquerschnitten bestehen, allerdings erhöht sich mit steigendem Holzanteil dann auch die notwendige Mindeststärke des Wandaufbaus rapide. Da eben auch Holz Wärme leitet, wird deshalb versucht den durchgehenden Holzanteil in der Wand so gering wie möglich zu halten. Gleichzeitig muss jedoch die Maßhaltigkeit und Verwindungssteifigkeit der Konstruktion

auch unter den wechselnden Feuchtebelastungen während des Bauzustands gewährleistet sein.

Vergleichbare Dämmqualitäten sind mit einschichtigen Massivwandkonstruktionen aus den neuesten Wärmedämmziegeln mit Kammerfüllungen oder auch sehr leichten Porenbetonsteinen derzeit nicht realisierbar. Mit einem 36,5 cm breiten Dämmstein einschließlich Putz kommen diese bei Gesamtwandstärken von etwa 40 cm auf U-Gesamtwerte von etwa 0,18 - 0,20.

Nur durch weitere Dämmschichten oder Schalen kann dieser Wert weiter in Richtung 0,15 gesenkt werden. Im Massivbau wird die Wand dadurch mit ca. 45 cm jedoch noch deutlich stärker.

Im Einfamilienhausbau bedeuten jedoch 10 cm Unterschied bei der Außenwandstärke und einer angenommenen Abwicklung bei 100 m<sup>2</sup> von 40 m ringsum, einen Gewinn an Wohnfläche von etwa 4 m<sup>2</sup> bei gleichen Außenmaßen des Gebäudes.

Dieser Aspekt ist angesichts der immer kleiner werdenden Grundstücke ein echter Wettbewerbsvorteil für den Holzbau.

Eine Variante des Wandaufbaus, die sich als Mischkonstruktion auch für die energetische Gebäudesanierung bis hin zum Passivhausniveau anbietet, besteht darin, auf einer neuen oder bestehenden Massivwand außenseitig Holzunterkonstruktionen aus vorgehängten Holzrippen oder Dämmständern zu befestigen, in die Kammern dazwischen die weichen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder auch Schüttungen aus Zellulose einzubringen, mit einer Fassadenbahn vor Schlagregen zu schützen und mit hinterlüfteten Holzwerkstoffen oder Tafeln zu bekleiden. Eventuell notwendige Befestigungspunkte aus Metall senken auch hier allerdings die Dämmqualität erheblich, was dann mit einer

Mehrstärke an Dämmung kompensiert werden muss. Interessant sind hier daher auch neue Entwicklungen mit Holzverbindungselementen, die auf eine geringst mögliche Wärmeübertragung vom Massivbau auf die aufgeschraubten Holzträger oder Massivholzrippen setzen.

Vergleicht man identische gut gedämmte Gebäude in Massivbauweise mit Leichtbaukonstruktionen, wie beispielsweise dem Holzrahmenbau, werden beide am Jahresende einen ähnlichen Energieverbrauch ausweisen, mit allenfalls kleinen Nachteilen für den Leichtbau - ein überraschendes Ergebnis.

Natürlich neigt der Holzbau wegen der geringeren Speichermassen schneller zur Überhitzung bzw. Auskühlung. Bei effektiven, außenliegenden Sonnenschutzmaßnahmen ist dieser Unterschied aber marginal. Der Effekt einer sehr gut gedämmten Hülle mit präzise zur Sonne ausgerichteten Öffnungen (das ganze Haus als Kollektor) scheint zudem in der Jahresbilanz der eigentlich bestimmende Faktor zu sein, weil die großen Speichermassen ja auch erst aufgeheizt werden müssen.

Auch die Bauteildicke ist für die Abpufferung von Temperaturspitzen nicht so wichtig.

Wirksam für das kurzzeitige Abpuffern des Raumklimas sind eigentlich nur die wenigen ersten Zentimeter einer Innenwand. Damit kann man aber auch einen modernen Holzleichtbau ausstatten: massive Estriche und Bodenbeläge, massive flächige Deckenelemente oder Wandverkleidungen aus Holz etwa, dickere Bauplatten aus Gips und viele weitere Bauteile könnten hier herangezogen werden. Bei neuen Entwicklungen sind Gips-Bauplatten zusätzlich mit eingekapselten „Latentwärmespeichern“ ausgestattet, kleinsten Paraffinkügelchen, die beim Phasenwechsel von fest nach flüssig kurz über die Raumtempera-

tur viel passiv gewonnene Wärme einlagern können (PCM = phase change materials), um sie später wieder bei gesunkener Innentemperatur an den Raum abzugeben.

Schließlich zeigen erste Versuchsbauten mit den extrem dünnen Vakuum-Isolationspaneelen, dass mit der Verfügbarkeit besserer und auch wirtschaftlich einsetzbarer Dämmstoffe in der Folge die Gesamtwandstärken wieder kleiner werden können. Fraglich ist nur, wo hier eine sinnvolle Untergrenze liegen wird. Der sommerliche Wärmeschutz von Holzhäusern konnte nämlich auch durch den vermehrten Einsatz von immer dickeren Holzweichfaserplatten oder auch Holzspäneschüttungen in Wänden kontinuierlich verbessert worden. Auch in dünneren Wandaufbauten müssen noch die Speichermassen für die Temperaturamplitudendämpfung ihren Platz finden.

Hinsichtlich der Bauzeit ist der moderne Passivhausbau mit Holz und Holzwerkstoffen angesichts seines hohen Vorfertigungsgrades und witterungsunabhängiger Arbeitsvorbereitung ebenfalls deutlich im Vorteil.

Die Zeit während auf der Baustelle der Aushub erfolgt, sowie die Fundamente und die Bodenplatte gegossen werden, genügt bei guter Planung häufig bereits als Vorlauf für die Holzbaufirma, um die Wand- und Deckenelemente in der Halle vorzufertigen und nach Fertigstellung der Gründungsarbeiten nahtlos den Bauablauf fortzusetzen. Ein Einfamilienhaus in Holz kann dabei bereits nach zwei Tagen unter der regendichten Dachhaut aus Holzweichfaserplatten stehen. Wir stellen immer wieder fest, dass diese Vorstellung bei noch unentschlossenen Bauherren schließlich den Ausschlag für die Entscheidung zugunsten des Holzbaus geben kann.

Daraus ergibt sich für Passivhäuser ein weiterer wichtiger Systemvorteil des Holzbaus: der gerin-

gere Feuchteintrag in das Gebäude während der Bauzeit. Bei Passivhäusern wird der zusätzliche Energiebedarf, der für das so genannte „Trockenheizen“ in der ersten Heizperiode benötigt wird, mehr und mehr zum bestimmenden Kriterium für die von der Gebäudetechnik vorzuhaltenden Leistungsreserven. Sind bei einem herkömmlichen Neubau in Massivbauweise etwa 30 % mehr Energiebedarf in der ersten Heizperiode zu veranschlagen, kann dieser Anteil bei einem Haus mit nur noch 20 % des Energiebedarfs in der normalen Heizperiode, zu einem um Faktor 5 höheren Mehrverbrauch von bis zu 150 % in der Anfangszeit führen. Bei der typischerweise sehr geringen Leistungsreserve der Gebäudetechnik der Passivhäuser, wird genau dieser Umstand zu einem Hauptargument für den Holzbau, kombiniert mit Ausbaumaterialien im Trockenbau und nur noch sparsam eingesetzten Massivbauteilen im Sockelbereich.

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten betrachtet, kann das Bauen von Passivhäusern mit Holz noch zusätzliche Pluspunkte sammeln.

Holz schneidet dabei schon grundsätzlich sehr gut ab, weil der Baustoff selbst, als nachwachsender Rohstoff regenerativ ist, lokal oder regional verfügbar ist, mit relativ kurzen Transportwegen zwischen den Verarbeitungsschritten und beim Abbruch die Wiedereinführung in die Ressourcenkreisläufe ermöglicht.

Holz hat darüber hinaus hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bindung noch eine Sonderstellung unter den Baustoffen, Holzkonstruktionen speichern das CO<sub>2</sub> in der Masse des verbauten Materials. Dieses CO<sub>2</sub> wird erst wieder bei Rückbau des Gebäudes, beispielsweise durch Verbrennung der Holzwerkstoffe wieder an die Umwelt abgegeben.

In der Gesamtbetrachtung, die ja zunehmend bei allen Bewertungen in den Vordergrund rückt,

geht also das nachhaltige und CO<sub>2</sub> Emissionen vermeidende Baukonzept Passivhaus mit dem Baustoff Holz eine sinnfällige und auch überzeugende Verbindung ein.

#### 4 Gesetzliche Regelungen

Über die letzten Jahre sind die bautechnischen Anforderungen an die Gebäudehülle, und deren Mindeststandards in immer schnelleren Schritten verschärft worden. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007 ist nach der ersten EnEV von 2001 und der Novelle von 2004, gerade erst in Kraft getreten und schon steht die EnEV 2009 kurz vor dem Inkrafttreten. Die weitere Verschärfung der Anforderungen um etwa 30 % wird damit kommen und eine zukünftige „Bodenbildung“ dieser Entwicklung, lässt sich auf einem Niveau nahe des Passivhausstandards bereits am Horizont absehen.

Da ein Passivhaus die derzeit geforderten Mindeststandards im Bereich Wärmedämmung und Energieverbrauch weit übertrifft, sind im Unterschied zu Festlegungen in der Energieeinsparverordnung (EnEV) die Kennwerte des Passivhauses derzeit jedoch in keiner Weise gesetzlich geregelt und auch nicht rechtlich bindend. Die Kriterien wurden bisher einzig und allein vom Passivhaus-Institut (PHI) in Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr. Feist erarbeitet und festgelegt. Selbst der Nachweis für ein Passivhaus wird mit anderen Berechnungsmethoden, nämlich dem Passivhaus-Projektierungs-Paket des Passivhaus-Instituts, kurz PHPP erstellt, als die Nachweise entsprechend der Energieeinsparverordnung (EnEV).

Allerdings sind kommende Verschärfungen der Anforderungen für Gebäude mit der EnEV 2009, die voraussichtlich zum 1. September 2009 in Kraft treten wird, bereits auf dem Weg. Auch wenn das Passivhausniveau für Neubauten in dieser neuen Verordnung noch nicht als verbindlich

festgelegt wird, so wird doch ein weiterer großer Schritt dahin bereits vollzogen.

Darüber hinaus wird auch im EU Rahmen bereits über eine weitere Verschärfung der Anforderungen für Neubauten bis hin zum Passivhausniveau nachgedacht.

Eine dringend notwendige Vergleichbarkeit der Bewertungsverfahren ist dennoch auf absehbare Zeit noch nicht zu erwarten.

Damit die Gesamtbilanz eines Hauses die als Grenzwerte erkannten Kennwerte für ein Passivhaus erreicht, sind laut Passivhaus Institut gleich mehrere Anforderungen zu erfüllen:

Diese Kennwerte definieren das Passivhaus-Prinzip:

#### **4.1 Jahresheizwärmebedarf < 15 kWh/m<sup>2</sup>a**

Der gesamte Energiebedarf zur Gebäudebeheizung muss geringer sein als 15 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr.

Also die Wärmemenge, die durch die Außenwände und die Lüftungsanlage dem Haus in einem Jahr noch verloren geht, abzüglich der Gewinne aus solarer Einstrahlung durch die Fenster und der internen Wärmegevinne durch Abwärme von Geräten und Bewohnern.

Diese Wärmemenge muss dem Haus in Form von Nachheizung wieder zugeführt werden. Sie darf pro Quadratmeter beheizter Fläche bei normierten Außentemperaturbedingungen, nur noch bis zu 15 kWh betragen, das entspricht etwa der Wärmemenge, die man mit 1,5 Litern Heizöl erzeugen kann. Das Passivhausniveau wird jedoch wegen des unterschiedlichen Klimas in Europa nicht überall mit den gleichen Dämmstärken erreicht. Es leuchtet einem sofort ein, dass diese Schwelle dabei in Malmö oder Mailand, jeweils etwas höher oder niedriger liegen muss.

#### **4.2 Maximale Heizlast < 10 W/m<sup>2</sup>**

Es müssen weniger als 10 Watt Heizleistung pro Quadratmeter beheizter Grundrissfläche ausreichend sein. Die kältesten Tage des Jahres, meist im Januar und Februar, bestimmen die so genannte maximale Heizlast, die erforderlich ist, um die Verluste zu ersetzen, damit die als angenehm empfundene Innentemperatur noch aufrecht erhalten werden kann. Der Wert dafür muss hier unter 10 W/m<sup>2</sup> bleiben. Die Energie, die für die Warmwasserbereitung benötigt wird, ist dabei jedoch noch nicht eingerechnet. Bei einem Gebäude mit z.B. 150 m<sup>2</sup> beheizter Fläche sind dies 150 m<sup>2</sup> x 10 W/m<sup>2</sup> = 1.500 W = 1,5 kW.

#### **4.3 U-Werte opaker Bauteile < 0,15 W/(m<sup>2</sup>K)**

Der Wärmedurchgang durch alle geschlossenen, lichtundurchlässigen Außenbauteile darf im rechnerischen Mittel nicht mehr als 0,15 W/m<sup>2</sup> Bauteilfläche betragen, wenn eine Temperaturdifferenz von einem Kelvin zwischen Innen- und Außenraum zugrunde gelegt wird.

Für einen Gesamt U-Wert von max. 0,15 W/m<sup>2</sup>K von geschlossenen, nicht lichtdurchlässigen und nicht beweglichen Bauteilen, also Bodenplatte, Wand, Decke und Dach benötigt man mindestens 30 cm Dämmung der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040, also zum Beispiel Zellulose.

#### **4.4 U<sub>w</sub> -Werte von Fenstern < 0,8 W/(m<sup>2</sup>K)**

U<sub>w</sub>-Werte – w steht für window – bezeichnen den definierten Wärmedurchgang der gesamten Fensterkonstruktion. Diese U<sub>w</sub>-Werte setzen sich zusammen aus den einzelnen U<sub>g</sub>-Werten der eingebauten Gläser – wobei g für glass steht -, der U<sub>f</sub>-Werte der „frames“, der Fensterrahmen, sowie den Werten der Wärmebrücken am Glas-Randverbund und der Einbausituation der Fenster. Ein U<sub>w</sub>-Wert von 0,8 W/m<sup>2</sup>K verlangt eine Dreifach-Verglasung und besonders gedämmte Rahmenkonstruktionen, hier stehen inzwischen

viele verschiedene Holz-Komposit-Rahmen zur Verfügung.

#### 4.4 Wärmebrückenfreie Konstruktionen ( $\phi < 0,01 \text{ W}/(\text{mK})$ )

Mit der heutigen Bautechnik ist es bei vorausschauender Planung durchaus möglich praktisch wärmebrückenfrei zu bauen. Die Anschlusspunkte verschiedener Bauteile müssen im Passivhaus so gelöst werden, dass der Wärmedurchlasskoeffizient in den Bereichen der schwächsten Punkte kleiner als  $0,01 \text{ W}/\text{mK}$  ist. Sind einzelne Wärmebrücken dennoch nicht vermeidbar, muss in der Berechnung der wärmebrückenbezogene Verlust ermittelt und eingerechnet werden.

#### 4.5 Luftdichtheit $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$

Mit dem so genannten Druckdifferenztest, häufig auch als „Blower-Door-Test“ bekannt, wird die Luftdichtheit von Gebäuden kontrolliert. Bei diesem Verfahren erzeugt ein, in die Türöffnung des zu messenden Gebäudes integrierter Ventilator Überdruck und Unterdruck, dabei misst man die Verluste über die Gebäudehülle. Darf bei normalen Neubauten mit Lüftungsanlage noch maximal ein 1,5-facher Luftaustausch des gesamten Innenvolumens des Gebäudes pro Stunde bei 50 Pascal Differenzdruck (dem so genannten  $n_{50}$ -Wert) stattfinden, muss dieser Wert für Passivhäuser mit 0,6 deutlich kleiner sein. Die hohe Luftdichtheit wird benötigt, um Schäden durch eindringende Feuchte aus Kondensat im Wandaufbau zu vermeiden und um den Transportweg des unkontrollierten Luftaustauschs für Wärmeverluste weitgehend auszuschließen.



Abb. 4: Druckdifferenz-Test

#### 4.6 Abluft-Wärmerückgewinnung mit Wirkungsgrad $> 75 \%$

Der Wirkungsgrad von Lüftungswärmerückgewinnungsanlagen in Passivhäusern muss mindestens 75 % betragen, bei einem gleichzeitigen Stromverbrauch von höchstens  $0,4 \text{ Wh}/\text{m}^3$ . Die Kennwerte für Wärmepumpen sind nochmals extra festgelegt. Effizientere Anlagen führen die Zuluft in der Heizperiode durch einen Luftkanal im Erdreich oder über einen zwischengeschalteten Solewärmetauscher der die angesaugte Frischluft bereits vorerwärmt. Die Temperaturdifferenz zur Zieltemperatur des Heizmediums Luft sollte dabei natürlich möglichst gering sein.

#### 5 Ausbildungs- und Wissensstand der Bauteiligten

Waren Passivhausarchitekten noch vor wenigen Jahren nur ein paar Exoten, hat sich die „Wissenslandschaft“ in diesem Bereich nun bereits erkennbar verändert. Parallel mit den rapide ansteigenden Energiekosten und der stark wachsenden

Klientel von Bauherren, die für die Zukunftssicherheit ihres eigenen Projekts den derzeit bestmöglichen Energiestandard wünschen, entstand eine noch kleine „Szene“ von Passivhausarchitekten, Holzbauunternehmen und Fensterbauern, sowie Gebäudetechnikspezialisten, die sich des Themas Passivhaus in Holz angenommen haben. Ein Beispiel dafür ist die deutsch-schweizer Architektengruppe „Architos“, deren 20 Mitgliedsbüros seit über zehn Jahren energieeffiziente Holzhäuser und Passivhäuser bauen. Weit mehr als 200 Wohneinheiten im Passivhausstandard sind von diesen Büros in den letzten Jahren allein in Deutschland realisiert worden. Die beteiligten Büros, die bisher vor allem im süddeutschen Raum vertreten sind, intensivieren seit Jahren ihren fachlichen Austausch untereinander und haben sich gemeinsame Standards gesetzt. Auch in der Fortbildung für Architekten sind die Mitglieder von „Architos“ seit einigen Jahren über die Architekten- und Ingenieurkammern tätig. In diesem Jahr leiten sie nun bereits zum zweiten Mal einen Passivhausplaner-Lehrgang und geben dort ihr Wissen und ihre praktische Erfahrung an Kollegen weiter. Weitere Kurse und Fortbildung bietet auch das „Passivhaus Institut“ in Darmstadt

selbst an. Hier wird seit kurzem auch die Zertifizierung zum „Passivhaus Fachplaner“ durchgeführt. Erfreulicherweise sind viele der engagierten Holzbauunternehmen im Südwesten bereits kompetente Partner im Passivhausbau. Viele der Innovationen entstehen tatsächlich auch erst durch die Zusammenarbeit der Passivhausarchitekten mit den Holzbauunternehmen.

Als interessanter Marktplatz für den Passivhausbau hat sich neben der jährlichen „Passivhaustagung“, die an wechselnden Standorten stattfindet, auch die Messe „Clean Energy Power“ CEP mit ihrem „Passivhaus-Forum“ in Stuttgart etabliert, die vor zwei Jahren aus der bisherigen Passivhausmesse in Böblingen hervorgegangen ist.

Öffentlichkeitswirksam sind darüber hinaus die Veröffentlichungen des „Passivhausinstituts“, der „IG Passivhaus“ und das jährlich erscheinende „Passivhaus-Kompendium“. Diese Zeitschrift und der jährlich im November stattfindende „Tag des Passivhauses“, mit Besichtigungsmöglichkeiten vieler realisierter Passivhäuser, sind derzeit Schau- fenster und Transformator für interessierte Bauherren.



## 11.1 Wärme- und Feuchteschutz Flachdächer in Holzbauweise

**Daniel Schmidt**

### 1 Einleitung

Holz ist das klassische Konstruktionsmaterial für Dächer. Für flache oder flach geneigte Dächer werden Holzbaukonstruktionen im Neubau als oberer Abschluss energetisch optimierter Gebäudehüllen im Wohnungsbau, bei Schulen, Kindergärten und bei Verwaltungsbauten eingesetzt. Darüber hinaus birgt die nachträgliche Verdichtung des städtischen Raumes ein großes Marktpotential für Flachdächer, so zum Beispiel für Aufstockungen oder Anbauten. Der Verunsicherung in Bezug auf Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Dachabdichtungen wurde durch die Entwicklung neuer, dauerhafterer Materialien und alternativer Dachdeckungssysteme begegnet.

Während sich Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise bei kleineren und mittleren Baumaßnahmen seit langem etabliert haben, sind sie dagegen bei großen Bauwerken, z.B. im Industrie- und Gewerbebau, völlig unterrepräsentiert. Dabei besteht gerade hier für den Holzbau ein großes Marktpotential, welches aufgrund von baurechtlichen Anforderungen derzeit nicht genutzt werden kann. Diese Hemmnisse gegen den Einsatz von Holz als Konstruktionsmaterial werden nachfolgend benannt und es werden Anforderungen für die Weiterentwicklung der Bauweise beschrieben.

Eine Weiterentwicklung ist auch dahingehend erforderlich, dass die Nutzung der Oberflächen von flachen und flach geneigten Dächern hinsichtlich des Feuchte- und des Holzschutzes genauer bewertet werden kann. Hierzu zählt der Einfluss von Dachbegrünungen, die aufgrund ihres ökologischen Nutzens einen Ausgleich zur Flächenversiegelung ermöglichen und gleichzeitig eine Verbesserung des Wärmeschutzes bewirken. Flache und flach geneigte Dächer sind darüber hinaus wertvolle Flächen zur Energiegewinnung durch Pho-

tovoltaikamente, was zu einer Verschattung der Oberflächen führt. Und mit der Nutzung als Erholungsfläche wird ein Oberflächenschutz (z.B. Dachterrassen aus Holzbohlen oder Betonplatten) hergestellt, der ebenfalls wesentliche Auswirkung auf das Feuchteverhalten des Bauteils hat.

### 2 Bauliche Aspekte von Holzkonstruktionen als Flachdach

Die Holzbauweise findet gerade im Dachbereich bevorzugte Anwendung, weil damit hoch wärmegeämmte Bauteile vorgefertigt auf die Baustelle geliefert und in kurzer Zeit ein vor Bewitterung geschützter Bauteilabschluss hergestellt werden kann. Holz als Konstruktionsmaterial zeichnet sich dabei durch eine hohe Tragfähigkeit bei geringem Eigengewicht und eine geringe Wärmeleitfähigkeit aus. Im Gegensatz zu anderen Baustoffen ist es dadurch möglich, Tragkonstruktion und Wärmedämmung in einer Bauteilebene anzuordnen. Durch die Verfügbarkeit moderner Holzwerkstoffe kann der Anteil der Wärmedämmung in den Bauteilen maximiert werden und es werden Dämmdicken realisiert, die zeitgemäße Anforderungen an eine Minimierung der Wärmeverluste durch die Gebäudehülle erfüllen.

Besonders wirtschaftliche Konstruktionen liegen in Form nicht belüfteter Bauteile mit Dämmung in der Tragebene vor. Die stabförmige Tragkonstruktion wird ober- und unterseitig beplankt, wodurch eine gegenüber mechanischen Beanspruchungen robuste Konstruktion entsteht, die eine flächenfertige Untersicht aufweisen kann. Mit Spannweiten bis zu 10 m liegen für den Wohnungs-, Bildungs- und Verwaltungsbau ausreichende Elementtragfähigkeiten vor. Im Bereich großflächiger Sport-, Industrie- und Gewerbehallen werden die Holzelemente als Sekundärtragwerk auf einer weitspannenden Tragkonstruktion montiert. Durch eine schubfeste Verbindung der Elemente können komplette Hallendächer ausgesteift werden.



Wesentliche Merkmale nicht belüfteter Flachdächer mit Dämmung in der Tragebene sind (Abb. 1):

- effektive Querschnittsnutzung durch Dämmung in Ebene der aufgelösten Tragkonstruktion
- vorelementierbar als Holztafelbauelement
- einfache Anschlussdetails, da keine Be- und Entlüftungsöffnungen erforderlich
- Einstufung zum Verzicht auf chemischen Holzschutz derzeit nur durch gesonderten rechnerischen Nachweis
- wärmespeichernde Deckschichten reduzieren das Rücktrocknungsvermögen
- bauphysikalische Nachweise sind in Verbindung mit wärmespeichernden Deckschichten derzeit nicht eindeutig möglich

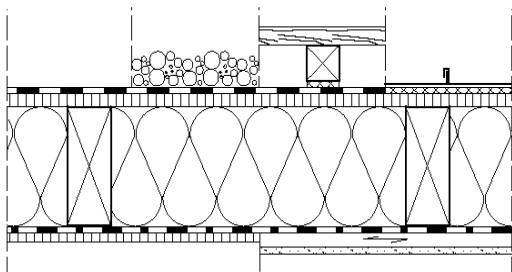


Abb. 1: Nicht belüftetes Flachdach, vollgedämmt

### 3 Hemmnisse aus brandschutztechnischer Sicht

Einschränkungen für die Umsetzung von Dachkonstruktionen in Holzbauweise bestehen derzeit für Bedachungen (Sekundärtragwerk) von Gebäuden, die nach Industriebaurichtlinie [2] und Versammlungsstättenrichtlinie [3] zu bewerten sind.

### 3.1 Anforderungen nach Muster-Industriebaurichtlinie (M IndBauRL)

Während die Tragkonstruktion (Primärtragwerk) z.B. bei erdgeschossigen Hallentragwerken in Holzbauweise bis 10.000 m<sup>2</sup> Grundfläche für Sicherheitsklasse K4 nach Industriebaurichtlinie unter Einhaltung einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten im Regelfall ohne besondere Brandschutzkonzepte möglich ist, gelten für Bedachungen ab 2.500 m<sup>2</sup> besondere Anforderungen. Danach müssen Brand- bzw. Brandbekämpfungsabschnitte ab einer Dachfläche von mehr als 2.500 m<sup>2</sup> so ausgebildet werden, dass eine Brandausbreitung über das Dach behindert wird.

Als maßgebende Anforderung gilt eine Prüfung nach DIN 18234-1 „Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer, Brandbeanspruchung von unten, Teil 1: Anforderungen an Prüfungen; geschlossene Dachflächen“. Alternativ können tragende Schalen aus mineralischen Baustoffen oder Bedachungen aus nichtbrennbaren Materialien verwendet werden. Die DIN 18234-1 legt hierbei brandschutztechnische Anforderungen und Prüfungen für großflächige Dächer mit großformatigen Deckungswerkstoffen bis 20° Neigung fest. Nach dieser Norm geprüfte oder klassifizierte Dächer müssen das Schutzziel einer Begrenzung der Brandweiterleitung im Bereich der geschlossenen Dachfläche bei unterseitiger Brandbeanspruchung durch einen begrenzten Entstehungsbrand erfüllen.

Holzbauteile sind bisher nicht nach DIN 18234-1 geprüft worden. Es existieren derzeit in Deutschland und Europa auch keine Brandöfen, mit denen die entsprechenden Prüfungen durchgeführt werden können. Eine Beurteilung des Brandverhaltens von Holzkonstruktionen kann derzeit nur auf der Grundlage von Prüfungen in Anlehnung an DIN 18234-1 zusammen mit einer auf der Erfahrung aus anderen Brandprüfungen resultierenden erweiterten gutachterlichen Beurteilung

erfolgen. Die baurechtliche Anwendbarkeit muss danach über eine Zustimmung im Einzelfall erfolgen. Oftmals werden zusätzlich aufwändige bauliche Maßnahmen zur Umsetzung einer Holzbauweise gefordert, z.B. eine Sprinklerung.



Abb. 2: Dachelemente einer Industriehalle bei der Zwischenlagerung und Montage (Bild: Schwörer Haus)

### 3.2 Anforderungen nach Muster-Versammlungsstättenverordnung (M VStättV)

Nach dieser Verordnung müssen Bedachungen für Brandabschnitte ab 1.000 m<sup>2</sup> aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, wodurch der Einsatz von Holzkonstruktionen z.B. in großen Hallen mit Publikumsverkehr ab 200 Personen nicht möglich ist. Diese Regelung findet allerdings nicht in allen

Bundesländern uneingeschränkt Anwendung (Ausnahme ist derzeit Baden-Württemberg) und sie ist anhand einer jahrzehntelangen Baupraxis u.a. wegen fehlender Schadensereignisse nicht nachvollziehbar. Der Einsatz von Holz im Dachbereich bringt gegenüber anderen Baustoffen kein erhöhtes Risiko, zumal Konstruktionen verfügbar sind, die durch Kapselung der brennbaren Baustoffe über ein hohes Maß an Brandsicherheit verfügen.

Dieser planerische und bauliche Mehraufwand ist ein wesentliches Hemmnis für die Etablierung von Holzkonstruktionen bei großen Dachflächen im Industrie- und Hallenbau.

### 3.3 Erkenntnisse aus Brandversuchen

Anhand durchgeführter Versuche an der TU München konnte festgestellt werden, dass vorelementierte Dachelemente in Holzbauweise mit unterseitiger OSB-Bekplankung das in DIN 18234-1 formulierte Schutzziel einer Begrenzung der Brandweiterleitung im Bereich der geschlossenen Dachfläche erreichen können. Die Brandversuche zeigten, dass der Brand nach Bildung der Kohleschicht auf der Holzwerkstoffplatte in sich zusammenfällt, so dass ein selbstständiges Weiterbrennen oder Glimmen innerhalb der Konstruktion nicht beobachtet werden konnte. Durch umlaufende Rippen und die zusätzlichen Füllrippen kann zudem davon ausgegangen werden, dass eine selbstständige Brandweiterleitung über Einzelgefache hinaus nicht stattfindet. Entsprechende Prüferfahrungen wurden an vergleichbaren Decke-Wand-Anschlüssen im Rahmen eines Forschungsvorhabens [4] vorgelegt.

Darüber hinaus können in Bezug auf die Erkenntnisse gekapselter Holzbauteile [5] Konstruktionen entwickelt werden, welche die gestellten Anforderungen erfüllen. Weiterhin ist zu überprüfen, ob die in DIN 18234-1 aufgestellten Randbedingungen zur Erfüllung des Schutzzieles

auf Holzkonstruktionen uneingeschränkt übertragbar sind - erforderlichenfalls sind diese anzupassen.

#### 4 Forschungsbedarf hinsichtlich des Feuchteverhaltens

Wesentliches Merkmal für die Funktionstüchtigkeit nicht belüfteter Flachdachkonstruktionen ist aus Sicht des Feuchte- und des Holzschutzes die Möglichkeit einer Rücktrocknung zur Raumseite bei ungewollt eingedrungener Feuchte. Deshalb stellt nach heutigen Erkenntnissen eine beidseitig diffusionsdichte Ausführung keine ausreichend sichere Konstruktion dar, die einen Verzicht auf chemische Holzschutzmaßnahmen der tragenden Holzbauteile ermöglicht. Maßgebende Voraussetzung für eine Rücktrocknung ist die Verwendung einer diffusionsfähigen inneren Bekleidung und die Möglichkeit einer Erwärmung der Dachoberflächen, um die sogenannte Umkehrdiffusion anzuregen (Abb. 3). Mit Hilfe moderner Rechenwerkzeuge kann das Feuchteverhalten der Konstruktionen unter realistischen Randbedingungen simuliert und bewertet werden. Hierbei ist jedoch noch unzureichend der Einfluss von Deckschichten auf die äußeren Klimabedingungen erforscht.

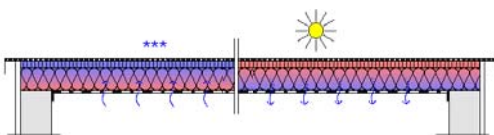


Abb. 3: Wirkungsprinzip von Dampfbremsen in nicht belüfteten Flachdächern (im Winter Diffusion ins Bauteil hinein; im Sommer Umkehr- bzw. Rückdiffusion)

#### 4.1 Laufende Forschungsvorhaben

Derzeit werden an verschiedenen Institutionen Forschungen durchgeführt, um Erkenntnisse zum hygrothermischen Verhalten von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung zu erhalten. Hierbei geht es ins-

besondere darum, Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Deckschichten auf das Feuchteverhalten der Konstruktion zu erlangen. Die Forschungsvorhaben beinhalten im Regelfall experimentelle Freilandversuche an verschiedenen Teilaufbauten sowie eine hygrothermische Simulation nach DIN EN 15026. Teilweise erfolgt zusätzlich eine Abfrage zur Funktionstüchtigkeit bestehender Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise. Nachfolgend erfolgt eine kurze Darstellung der Forschungsziele.

- TU München mit MFPA Leipzig - Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise: Das von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e. V. koordinierte und bis Frühjahr 2009 laufende Vorhaben hat zum Ziel, anhand von Freilandversuchen und numerischen Bauteilsimulationen sichere und schadensfreie Flachdachkonstruktionen zu entwickeln. Dabei soll geklärt werden:
  - a) inwieweit durch den Einsatz feuchtevariabler Dampfbremsen und Holzwerkstoffe sowie diffusionshemmender Abdichtungsbahnen das Gefährdungsrisiko der Konstruktion gesenkt wird,
  - b) unter welchen Randbedingungen eine Gefährdung der Holzbauteile ausgeschlossen und auf chemischen Holzschutz verzichtet werden kann,
  - c) welche Kriterien zum Einsatzes von ökologischen Gefachdämmstoffen zu erfüllen sind.

Das Forschungsvorhaben wird gefördert aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

- Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern: Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB, Kassel) untersucht verschiedene Gründachaufbauten hinsichtlich des thermischen

und hygrischen Verhaltens der verwendeten Materialien. Anhand von Messungen soll eine praxisgerechte Bewertung von Gründachaufbauten hinsichtlich ihrer positiven Wirkung auf den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz sowie das Feuchteverhalten ermöglicht werden. Förderer: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Weitere Untersuchungen erfolgen z.B. durch das Fraunhofer Institut für Bauphysik an der Außenstelle Holzkirchen durch Freilandversuche an Gründächern mit Begleitung durch wissenschaftliche Arbeiten. Ziel ist es, die Forschungsergebnisse zusammenzuführen, diese in die Normung einfließen zu lassen, um Planern und Ausführenden eindeutige Regelungen und Randbedingungen für schadensfreie Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise geben zu können.

#### **Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

Auf diesem Weg gibt es eine ganze Reihe weiterer Forschungslücken zu schließen, die insbesondere wichtig für die anzusetzenden Randbedingungen zur Bauteilsimulation und Berechnung des Feuchteverhaltens nicht belüfteter Flachdächern sind:

1. Es gibt bislang keine Felduntersuchung, welche die Bewährung von begrünten Flachdachkonstruktionen an praktischen Objekten systematisch geprüft hat.
2. Es fehlt eine Parameterstudie, welche die Zusammenhänge der wesentlichen Einflussgrößen auf das Feuchteverhalten darstellt. Hierzu zählen die inneren und äußeren Klimabedingungen, der Einfluss von Deckschicht, Dämmdicke, Dämmstoff, Diffusionswiderstand der Dampfbremse und die Bauteilfeuchte im Anfangszustand.
3. Es fehlen weiterhin Kennwerte für die hygrothermische Simulation des Einflusses von

- extensiver Begrünung bei größeren Schichtdicken, insbesondere von ökologischen Begrünungssystemen mit hohem Feuchtespeichervermögen,
- Bekiesung als Oberflächenschutz, z.B. bei Anforderung für harte Bedachungen,
- Holzrosten oder Steinbelägen als Terrassenkonstruktion,
- Dachaufbauten mit geringem Abstand zur Dachfläche, z.B. Photovoltaikanlagen,
- Teilverschattungen durch Nachbarbebauung oder Bäume.

#### 4. Untersuchung zur Quantifizierung des Feuchteintrags durch Leakageströme.

- Die bislang diskutierte Feuchtemenge von  $250 \text{ g/m}^2$  welche bei hygrothermischen Berechnungen als erforderliche Verdunstungsreserve zur Beurteilung der Feuchtesicherheit hinzugezogen wird, wurde bisher nicht durch Untersuchungen an mitteleuropäischen Baukonstruktionen und dem vorherrschenden Klima belegt.

- Es wird derzeit diskutiert, dass diese Feuchtemenge für hinsichtlich der Luftdichtheit geprüfte Bauteilaufbauten eine zu ungünstige Annahme ist, weil diese bei Untersuchungen an Holzbauwänden in Holzhäusern der USA ermittelt wurde. Im Gegensatz zu dem weit entwickelten Holzbau Mitteleuropas werden Holzbauteile in den USA meist auf der Baustelle hergestellt und eine Übertragung auf das Bauteil Dach ist nicht unmittelbar möglich.

#### 5. Des Weiteren sollen durch In-Situ-Messungen von Baustellenfeuchte und die Reaktion von Hölzern und Holzwerkstoffen hierauf Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Baustellenrandbedingungen einzuhalten sind, um feuchtetechnisch fragile Konstruktionsaufbauten über die bekannt schwierige Anfangsphase schadensfrei in einen eingeschwungenen Zustand zu bekommen.

6. Zum Abgleich der Vor- und Nachteile nicht belüfteter Dachkonstruktionen sind darüber hinaus Untersuchungen der Belüftung flacher und flach geneigter Dachkonstruktionen erforderlich. Hierbei geht es insbesondere um die Qualifizierung des Einflusses der Belüftungsquerschnitte, der Zu- und Abluftöffnungen und der Belüftungslängen.

### 5 Zusammenfassung

Flachdächer in Holzbauweise haben ein erhebliches Entwicklungspotential. Konstruktionen aus dem einzig verwendbaren nachwachsenden Baustoff Holz finden derzeit im wesentlichen im Bereich kleiner und mittlerer Bauvorhaben Anwendung. Der mit dem Industrie- und Gewerbebau größte Anteil an Dachflächen ist aufgrund der baurechtlichen Anforderungen für den Baustoff Holz derzeit nur vereinzelt mit erheblichem zusätzlichem Aufwand zu erschließen. Die Funktionstüchtigkeit von Holzelementen in Bezug auf die Begrenzung der Brandweiterleitung im Bereich der geschlossenen Dachfläche konnte durch Versuche nachgewiesen werden. Es ist nun erforderlich, die baurechtlichen Randbedingungen in Bezug auf die Musterrichtlinien für Industriebauten und Versammlungsstätten zu schaffen, um die Leistungsfähigkeit dieser Konstruktionen anwendbar machen zu können.

Weiterhin liegt Entwicklungsbedarf in Bezug auf die hygrothermische Funktionstüchtigkeit nicht belüfteter Flachdächer mit verschiedenen Deck- bzw. Schutzschichten vor. Hierbei ist insbesondere der Einfluss von Dachbegrünungen von Bedeutung, die zur Kompensation versiegelter Flächen von zunehmender Bedeutung sind. Teilweise

können hierfür Erkenntnisse aus laufenden Forschungsvorhaben zusammengeführt und bewertet werden.

Die Größenordnung der allein in Deutschland gebauten Flachdächer beträgt nach Schätzungen über 100 Mio. m<sup>2</sup>. Eine Steigerung des hierbei bisher verschwindend geringen Holzbauanteils hätte erhebliche Auswirkung auf das Holzbaugewerbe. Ein willkommener Nebeneffekt ist hierbei die Stärkung regionaler Strukturen u.a. aufgrund kürzerer Transportwege. Die durch Holzkonstruktionen mögliche Verbesserung des Wärme- und Schallschutzes gegenüber anderer Leichbauweisen hat darüber hinaus eine nachhaltig positive Auswirkung auf die Umwelt.

### Quellen

- [1] Schmidt, D.; Winter, S.: Flachdächer in Holzbauweise. Informationsdienst Holz spezial, Oktober 2008, Holzabsatzfonds, Bonn.
- [2] M IndBauRL: Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie), Fassung März 2000; [www.is-argebau.de](http://www.is-argebau.de)
- [3] MVStättV: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung), Fassung Juni 2005; [www.is-argebau.de](http://www.is-argebau.de)
- [4] Winter, S.; Stein, R.: High-Tech-Offensive Zukunft Bayern - Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 11 - Brandweiterleitung bei Gebäuden in Holzbauweise, TU München 2008
- [5] Musterrichtlinie über brandschutztechnische Anforderungen für hochfeuerhemmende Holzbauteile - M-HFHolzR, Fassung Juli 2004; [www.is-argebau.de](http://www.is-argebau.de)

## 11.2 Schallschutz, Schwingung

### Schall- und schwingungsoptimierte Holzdecken

#### Bemessungs- und Konstruktionshilfen für die Praxis

**Andreas Rabold, Patricia Hamm**

#### 1 Einleitung

Die Holzbauweise wird zunehmend auch in öffentlichen Gebäuden wie Verwaltungsgebäuden, Schulen und Kindergärten eingesetzt. Gerade bei Schulen und Kindergärten werden dadurch bereits junge Menschen mit dem natürlichen Baustoff Holz durch seine angenehme Optik und Haptik in positiver Weise vertraut gemacht.

Diesen „Wohlfühlkriterien“ vorangestellt sind natürlich gerade in öffentlichen Gebäuden die Sicherheitsaspekte der Statik und des Brandschutzes. Auch die Anforderungen an die Raumakustik, den Schallschutz und das Schwingungsverhalten der Decken sind zu berücksichtigen. Hierbei beziehen sich die Anforderungen an das Schwingungsverhalten auf spürbare Schwingungen, die in einem Frequenzbereich unterhalb des menschlichen Hörbereichs liegen. Die Anforderungen an den (Tritt-) Schallschutz beziehen sich hingegen auf abgestrahlte Körperschallschwingungen innerhalb des Hörbereichs.

Während die Kriterien des Brandschutzes und der Statik bereits bei der Entwicklung eines Holzbauelements zur Marktreife berücksichtigt werden und auch für die Raumakustik optimierte Holzbaulemente mit integriertem Schallabsorber zur Verfügung stehen, liegen zum Schwingungsverhalten weitgespannter Holzdecken und dem entsprechenden Nachweis nach DIN 1052 [2] noch zu wenige allgemein gültige Aussagen bzw. Konstruktionsregeln vor. Auch Decken mit geringen Trittschallübertragungen bei den subjektiv dominanten tiefen Frequenzen sind bislang nur vereinzelt zu finden. Diese Ausgangssituation wurde von zwei aktuellen Forschungsprojekten der TU München, des ift-Rosenheim und des IBP Stuttgart (Fraunhofer Institut für Bauphysik), unter Koordination der DGfH aufgegriffen. Nachfolgend wird der bisherige Stand der z.T. noch

laufenden Projekte dargelegt, konstruktive Lösungsansätze aufgezeigt und eine gelungene Umsetzung an einem Schulgebäude in Rosenheim vorgestellt.

#### 2 Ausgangssituation

Obwohl in der Fachwelt schon sehr lange bekannt ist, dass ein Schwingungsnachweis bei Wohnungsdecken sinnvoll ist und durch Kreuzinger und Mohr [6] viele Grundlagen erarbeitet worden sind, herrscht immer noch Unsicherheit darüber, wie genau der Schwingungsnachweis geführt werden und wie eine Holzdecke inkl. Aufbau ausgeführt sein soll, so dass sie nicht zu unangenehmen Schwingungen angeregt werden kann. In [5] wurde ein möglicher Weg für den Schwingungsnachweis aufgezeigt, der sich v.a. an DIN 1052 und den zugehörigen Erläuterungen zur DIN 1052 [4] anlehnt, allerdings schon mit dem Hinweis, dass „selbst bei erfolgreichen Nachweisen ein leichtes Vibrieren nicht ganz ausgeschlossen werden kann und Schwingungen für empfindliche Personen spürbar sein können“. Da tatsächlich immer wieder Beschwerden seitens der Bauherrn und Nutzer über unangenehm schwingende Decken aufgetreten sind, startete im Herbst 2007 an der TU München das AiF-Forschungsvorhaben „Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken“ [7].

Bereits 2006 startete an der TU München ein Kooperationsprojekt [8] mit dem IBP Stuttgart und dem ift Rosenheim, das die Wechselwirkungen der einzelnen Funktionsschichten bei der Trittschallübertragung von Holzdecken detailliert untersucht. Der Fokus dieses Projektes liegt auf den Einflussparametern der tieffrequenten Trittschallübertragung, um daraus ein besseres Verständnis für die Ursachen der tieffrequenten Trittschallübertragung und Maßnahmen zur Reduzierung ableiten zu können.

Die übergeordnete Zielsetzung der Projekte liegt in der Entwicklung von Konstruktionshilfen und Bemessungsregeln für Holzdecken mit geringer Schwingungsanfälligkeit und guter Trittschalldämmung. Hierzu waren zunächst die Zielwerte der Bauteilentwicklung festzulegen.

### 3 Zielwerte der Bauteilentwicklung

Zur Festlegung der Zielwerte für eine geringe Schwingungsanfälligkeit und eine gute Trittschalldämmung ist das subjektive Empfinden des Bewohners bzw. Nutzers zu berücksichtigen.

Bei Umfragen zum subjektiven Empfinden des Schallschutzes wird in der Regel die Trittschallübertragung aus fremden Wohnbereichen als die störendste Geräuschquelle genannt [9], [10]. Während in der Praxis die Trittschallübertragung meist durch das Begehen einer Decke erzeugt wird, erfolgt die Überprüfung durch die Messung mit einem mechanischen Norm-Hammerwerk. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass gerade bei leichten Decken eine ausreichende Korrelation zwischen der realen Trittschallübertragung und der Messung mit dem Norm-Hammerwerk nur dann gegeben ist, wenn der bewertete Norm-Trittschallpegel inklusive des erweiterten Spektrumsanpassungswerts ( $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ ) ausgewertet wird.

Abb. 1 zeigt diesen Zusammenhang zwischen Messergebnissen mit dem Norm-Hammerwerk und der realen Anregung beim Begehen der Decke. Aus diesen Darstellungen lassen sich die Zielwerte für die Bauteilentwicklung ablesen. Die in einigen Europäischen Länder bereits umgesetzte Anforderung an den  $L_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 53$  dB [9] entspricht in Abb. 1 in etwa einem  $L_{A,F,max} \leq 35$  dB(A). Erfahrungsgemäß ist oberhalb dieser Grenze mit störenden Trittschallübertragungen zu rechnen [11]. Für einen  $L_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 46$  dB beträgt der A-bewertete Trittschallpegel in etwa

$L_{A,F,max} \leq 30$  dB(A) und ist, je nach Umgebungsgeräusch, kaum noch wahrnehmbar.

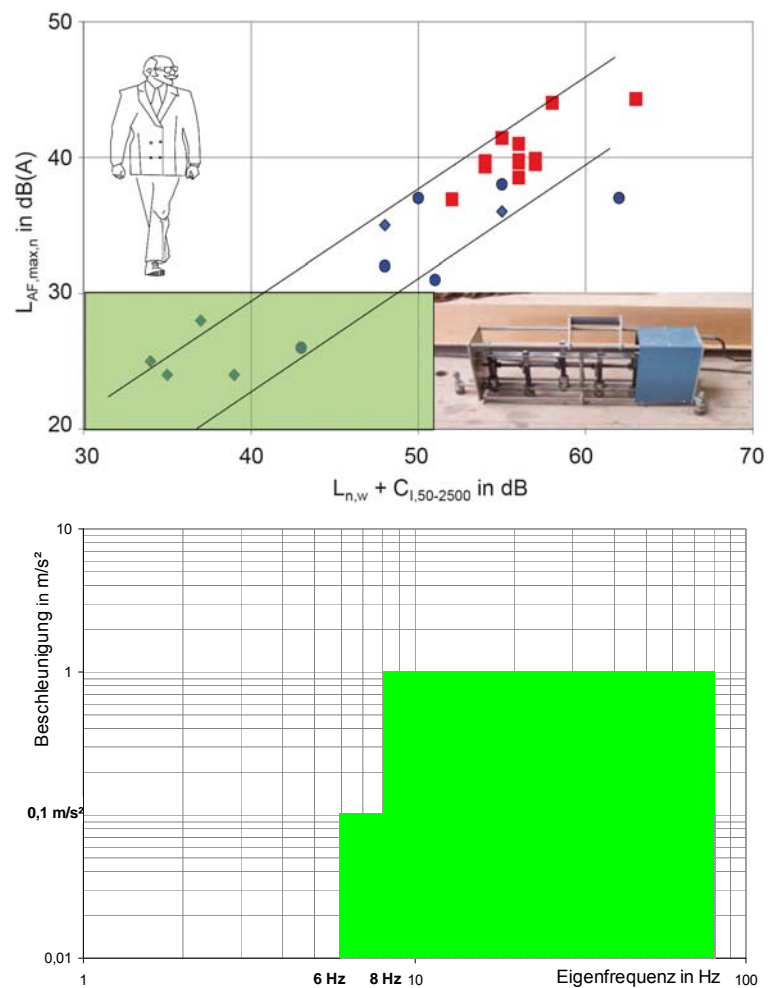


Abb. 1: Zielwerte für Trittschall- und Schwingungsbegrenzung. Der anzustrebende Bereich ist grün unterlegt. Links Zusammenhang Norm-Messung und Trittschallübertragung beim Begehen der Decke. Rechts maximale Beschleunigung in Abhängigkeit der Eigenfrequenz

Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens einer Decke ist nach [2] die Eigenfrequenz maßgebend, ausgedrückt über eine Durchbiegungsbegrenzung. Die bisherigen Untersuchungen des aktuellen Forschungsvorhabens [7] zeigen jedoch, dass eine Mindesteigenfrequenz als alleiniges Kriterium zu unbefriedigenden Ergebnissen führen

kann. Die Ausführungen in DIN 1052 gehen von „relativ schweren“ Decken aus, d.h. Decken mit einem Aufbau, die auch die Schallschutz- Anforderungen an eine Wohnungstrenndecke erfüllen. Schwingungsnachweise „leichter“ Decken, die nicht als Wohnungstrenndecken konzipiert wurden, sind mit diesem vereinfachten Nachweis nach DIN 1052 nicht abgedeckt.

In Erläuterungen zur DIN 1052 ist eine Fülle von weiterführenden Nachweisen angegeben. Ein mögliches Kriterium stellt die Begrenzung der maximalen Beschleunigung dar, wie sie in Abb. 1 angegeben ist. Im aktuellen Vorhaben werden Messungen und Berechnungen ausgewertet und die Ergebnisse mit der subjektiven Bewertung der Bewohner verglichen, um einfache Konstruktions- und Bemessungsregeln für angenehme Decken angeben zu können.

#### 4 Bemessungsregeln und Konstruktionshilfen

In den folgenden Abschnitten werden Bemessungsregeln für den Schwingungsnachweis und Konstruktionshilfen für den Schallschutz aufgezeigt. Sie geben den aktuellen Stand aus den beiden genannten Forschungsvorhaben wieder.

##### 4.1 Bemessungsregeln für den Schwingungsnachweis

Für den Schwingungsnachweis gibt es in den Normen und in der Literatur mehrere Kriterien.

Tab. 1: Grenzwerte für die Untersuchung des Steifigkeitskriteriums

Grenzwert für Steifigkeit	Durchlaufräger mit	Einfeldträger mit
$w(1\text{ kN}) \leq 1,0\text{ mm}$	-	geringer Anforderung
$w(1\text{ kN}) \leq 0,5\text{ mm}$	geringer Anforderung	höherer Anforderung
$w(1\text{ kN}) \leq 0,25\text{ mm}$	höherer Anforderung	sehr hohe Anforderung

Die wichtigsten werden hier kurz genannt. Im Beitrag „11.2 Schallschutz, Schwingung – Schwingungstechnische Optimierung von Holzdecken“ werden sie ausführlich beschrieben und

ihre Bedeutung im Rahmen des Schwingungsnachweises aufgezeigt.

##### 4.1.1 Frequenzkriterium

Das auf Holzdecken angewendete Frequenzkriterium zielt auf die Vermeidung von Resonanz aus Gehen. Dafür soll die Eigenfrequenz der Decke so hoch gewählt werden, dass Resonanz mit der dritten Harmonischen vermieden wird. Die aktuellen Grenzwerte für die Eigenfrequenz sind abhängig von der zugrunde gelegten Norm. Sie liegen zwischen 6 Hz nach [4] und 8 Hz nach EC 5 [12].

##### 4.1.2 Steifigkeitskriterium

Im Rahmen der Untersuchungen in [6] und [7] wurde festgestellt, dass das Steifigkeitskriterium mindestens ebenso wichtig einzustufen ist wie das Frequenzkriterium. Dabei sollte die Steifigkeit der Decke so hoch sein, dass die Durchbiegung unter einer Kraft von 1 kN in Feldmitte einen bestimmten Wert (Tab. 1) nicht übersteigt. Welcher Grenzwert verwendet wird, hängt vom System der Decke, von den Anforderungen des Bauherrn und der geplanten Nutzung ab.

##### 4.1.3 Begrenzung der Schwinggeschwindigkeit

Der dritte nach EC 5 [12] empfohlene Nachweis untersucht die Einheitsimpuls geschwindigkeitsreaktion. Nach bisherigem Forschungsstand kann gesagt werden, dass dieser Nachweis der Geschwindigkeit bei Decken mit „üblichem“ (Tritt-) Schallschutzaufbau (Tab. 2) nicht maßgebend wird.

##### 4.1.4 Begrenzung der Schwingbeschleunigung

Der Nachweis der Schwingbeschleunigung wird nur in den Erläuterungen [4] nach DIN 1052 und nur für Decken im Frequenzbereich zwischen 6 Hz und 7,2 Hz gefordert. Mit diesem Nachweis wird die Tatsache berücksichtigt, dass das Emp-



finden der Schwingungen bei Frequenzen kleiner als ca. 8 Hz von der Schwingbeschleunigung, bei Frequenzen größer als 8 Hz von der Schwinggeschwindigkeit abhängig ist.

Nach neueren Erkenntnissen und dem derzeitigen Stand des Forschungsvorhabens kann der Nachweis entfallen, wenn ein schwimmender Nasses- trich oder ein schwimmender Trockenestrich auf schwerer Schüttung vorhanden ist und die Anforderungen an den (Tritt-) Schallschutz eingehalten sind (Tab. 2).

#### 4.1.5 (Tritt-) Schallschutz-Aufbau

Messungen an Decken ohne Aufbauten, d.h. noch während des Rohbauzustandes, zeigten, dass die Anordnung einer schwimmenden Est- richschicht sehr wichtig ist – nicht nur für den (Tritt-) Schallschutz sondern auch für das Schwin- gungsverhalten. Ein solcher (Tritt-)Schallschutz- Aufbau sollte gegeben sein.

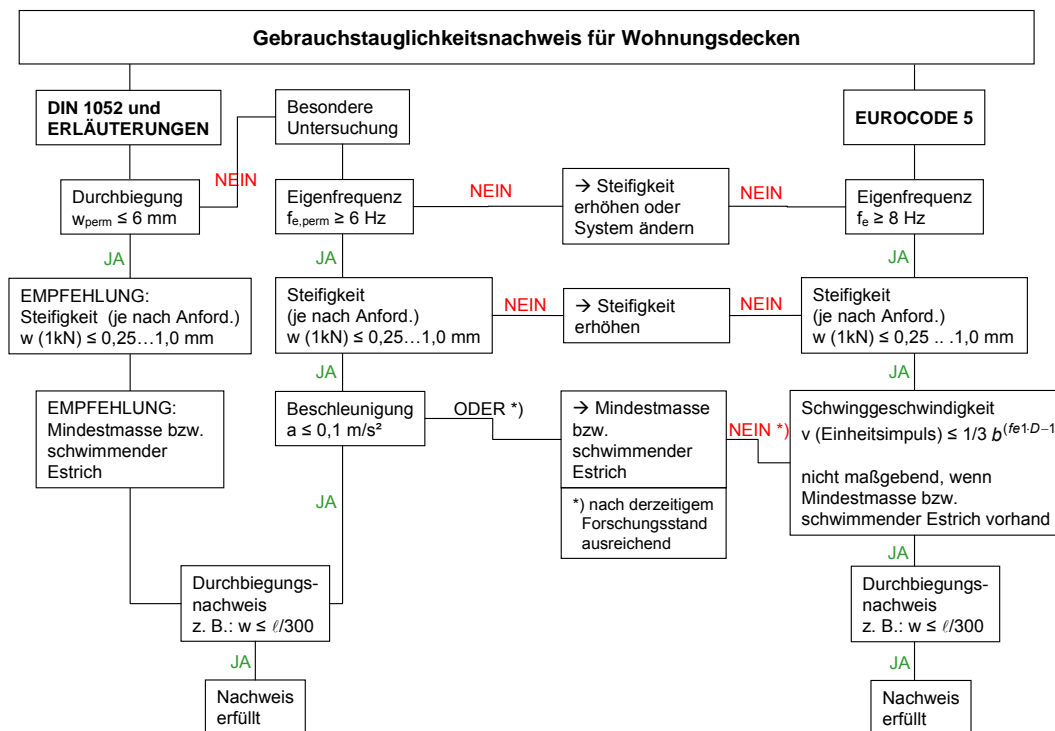


Abb. 2: Ablaufdiagramm für den Schwingungsnachweis bei Holzdecken nach DIN 1052 und EC 5

#### 4.2 Konstruktionshilfen für schalltechnisch optimierte Decken

Die Erarbeitung von Konstruktionshilfen für schalltechnisch optimierte Deckenaufbauten erfolgte durch numerische Berechnungen der Trittschallübertragung [8]. Hierzu wurde an der TU München ein Berechnungsmodell auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) erarbeitet und anhand von Messergebnissen aus der Datenbank des ift Schallschutzzentrums validiert. Anhand der numerischen Berechnungen des validierten Modells konnten die Wechselwirkungen der Deckenkomponenten mit geringem Aufwand untersucht und optimierte Konstruktionen erarbeitet werden. Nach der messtechnischen Überprüfung

der optimierten Konstruktionen wurden die Ergebnisse, unterstützt durch eine systematische Auswertung der Decken-Datenbank am ift-Schallschutzzentrum, in Form von Konstruktionshilfen zusammengestellt (Tab. 1).

Als Beispiel für auf diesem Weg optimierte Deckenkonstruktionen zeigt Abb. 1 den Vergleich der Messergebnisse einer Massivholzdecke und einer Holzbalkendecke mit den Norm-Trittschallpegeln konventioneller Stahlbetondecken. Die Gegenüberstellung zeigt, dass bei entsprechender Konstruktion die gute Trittschalldämmung einer Stahlbetondecke auch mit deutlich leichteren Decken erreicht werden kann.

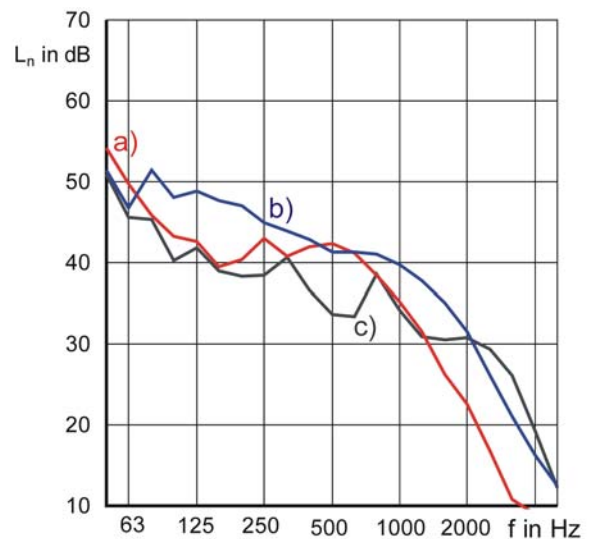
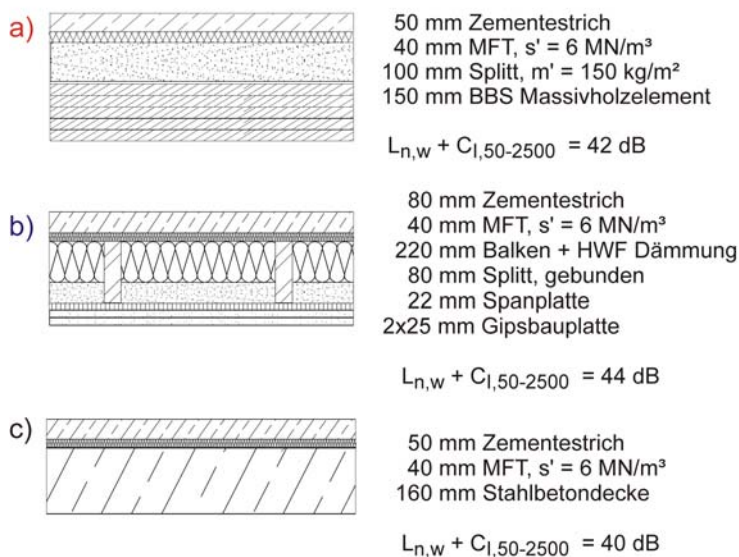


Abb. 3: Messwerte optimierter Holzdecken im Vergleich zu Stahlbetondecken

Tab. 1: Konstruktionshilfen für Massivholzdecken

Konstruktionshilfen	Zielwert:			
	$L_{nw} + C_{1,50-2500} \leq 53$ dB		$L_{nw} + C_{1,50-2500} \leq 46$ dB	
	Verkehrslast $p < 2,5$ kN/m <sup>2</sup>		Verkehrslast $p < 5$ kN/m <sup>2</sup>	
	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 60$ mm Splitt, $m' \geq 90$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 25$ mm TE, $m' \geq 25$ $\geq 12$ mm TSD, $s' \leq 40$ $\geq 120$ mm Splitt, $m' \geq 180$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 80$ mm ZE, $m' \geq 190$ $\geq 20$ mm TSD, $s' \leq 20$ $\geq 120$ mm Splitt, $m' \geq 180$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 120$ mm Splitt, $m' \geq 180$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$
	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 70$ mm Beton, $m' \geq 170$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 12$ mm TE, $m' \geq 13$ $\geq 28$ mm V20, $m' \geq 16$ $\geq 30$ mm TSD, $s' \leq 15$ $\geq 120$ mm Beton, $m' \geq 290$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 80$ mm ZE, $m' \geq 190$ $\geq 30$ mm TSD, $s' \leq 15$ $\geq 120$ mm Beton, $m' \geq 290$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 120$ mm Beton, $m' \geq 290$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$
	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 70$ mm Beton, $m' \geq 170$ $\geq 100$ mm Splitt, $m' \geq 150$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 25$ mm TE, $m' \geq 25$ $\geq 12$ mm TSD, $s' \leq 40$ $\geq 70$ mm Beton, $m' \geq 170$ $\geq 100$ mm Splitt, $m' \geq 150$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 20$ mm TSD, $s' \leq 20$ $\geq 70$ mm Beton, $m' \geq 170$ $\geq 100$ mm Splitt, $m' \geq 150$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$	$\geq 50$ mm ZE, $m' \geq 120$ $\geq 40$ mm TSD, $s' \leq 7$ $\geq 70$ mm Beton, $m' \geq 170$ $\geq 100$ mm Splitt, $m' \geq 150$ $\geq 150$ mm MHD, $m' \geq 50$

- ZE: Zement-, Anhydrit-, oder Fliesestrich mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>
- TE: Gipsfaser Trockenestrichelemente, mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>
- V20: Verlegespanplatten, mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>
- TSD: Mineralfaser- oder Holzweichfaser Trittschalldämmplatte mit der angegebenen dynamischen Steifigkeit  $s'$  in MN/m<sup>3</sup>
- Splitt: Kalksplitt in Pappwaben, oder gebundener Splitt mit Latexmilch, oder Zementemulsion, mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>
- Beton: Holzbetonverbund, mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>
- MHD: Brettstapel-, Brettschichtholz-, Brettsperrholz-, Hohlkasten- oder Leimprofilholzdecken, mit der angegebenen flächenbezogenen Masse  $m'$  in kg/m<sup>2</sup>, Elementhöhe nach Statik

### 5 Ausführungsbeispiel

Als Ausführungsbeispiel wurde eine bereits im Vorfeld der Projekte von der Lignotrend Produktions GmbH entwickelte Massivholzdecke in Holz-Beton-Fertigbauweise gewählt, die im Neubau der staatlichen Fachoberschule (FOS) und Berufsoberschule (BOS) Rosenheim zum Einsatz kam. Die Außenwände und die Flurwände des Bauvorhabens wurden aus Brettsperrholzelementen mit zusätzlicher Installationsebene ausgeführt. Die Stützen wurden aus Brettschichtholz, die nichttragenden Klassenraumtrennwände als Metallständerwände mit getrennten Ständern gefertigt. Um allen Anforderungen an den Schallschutz gerecht zu werden, wurde bereits in der Planungsphase das ift Schallschutzzentrum für die schalltechnische Begleitung herangezogen. Die schalltechnischen Messungen am ausgeführten Bau wurden von der Fachhochschule Rosenheim durchgeführt. Die schwingungstechnischen Untersuchungen erfolgten durch die TU München im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens.

Die abschließenden Messungen zum Schwingungsverhalten und zur Trittschallübertragung der Deckenkonstruktion im Bauvorhaben zeigten, dass sowohl die in Abb. 1 dargestellten Zielwerte, als auch das Steifigkeitskriterium nach Abschnitt 4.1.2 weit übertroffen wurden. Der bewertete Norm-Trittschallpegel am Bau betrug inklusive erweitertem Spektrumanpassungswert  $L'_{nw} + C_{150-2500} = 41$  dB. Die Trittschallübertragung beim Begehen der Decke war mit  $L_{A,F,max} = 20-30$  dB(A) auch unter günstigsten Bedingungen – in den Schulferien und mit ausgeschalteter Lüftung – kaum noch messbar und wahrnehmbar. Die maximale Beschleunigung bei Resonanzanregung mit der 3. Harmonischen im Bereich der ersten Eigenfrequenz lag bei  $a_{max} = 0,043$  m/s<sup>2</sup>, die rechnerische Durchbiegung unter einer Einzellast von 1kN bei  $w = 0,06$  mm.

Die Messergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst und in Abb. 6 bis Abb. 8 illustriert. Abb. 6

zeigt neben den Beschleunigungsspitzen bei der ersten Decken-Eigenfrequenz (7,2 Hz) auch deutliche Maxima bei der Resonanz zwischen Estrichaufbau und Rohdecke (ca. 30 Hz).



Abb. 4: Neubau der Staatlichen Fachoberschule und Berufshochschule Rosenheim

Anzumerken ist, dass es sich bei der ausgeführten Decke um einen Prototypen handelte, weshalb eine deutlich höhere statische Sicherheit als normativ gefordert eingeplant wurde. Diese Überdimensionierung wirkte sich durch die daraus resultierende hohe Steifigkeit entsprechend positiv auf das Schwingungsverhalten und durch die hohe Masse positiv auf die Trittschalldämmung aus. Sowohl die vorausgegangenen Untersuchungen im Labor als auch die hier gezeigten Ergebnisse der Baumesung zeigen jedoch, dass auch bei einer Ausführung mit den üblichen statischen Sicherheitsreserven sehr gute Werte zu erwarten sind.

Tab. 3: Zusammenstellung der Messergebnisse am Bau

Ergebnisse der Schwingungsmessungen	Ergebnisse der Schallmessungen
1. Eigenfrequenz der Decke: $f_e = 7,2 \text{ Hz}$	Bewerteter Norm-Trittschallpegel am Bau: $L'_{nW} = 44 \text{ dB}$
Maximale Beschleunigung bei $f_e$ : $a_{\max} = 0,043 \text{ m/s}^2$	Erweiterter Spektrumanpassungswert: $C_{1,50-2500} = -3 \text{ dB}$
Schwinggeschwindigkeit nach Heeldrop $v = 9 \text{ mm/s}$	Trittschallübertragung beim Begehen der Decke: $L_{A,F,\max} \approx 20 - 30 \text{ dB(A)}$
Rechnerische Durchbiegung unter 1 kN Einzellast: $w = 0,06 \text{ mm}$	



Abb. 5: Foto Messaufnehmer auf der Rohdecke

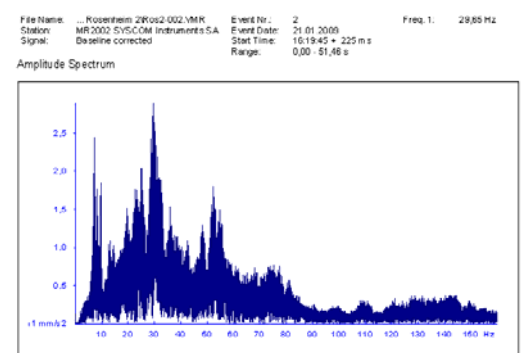
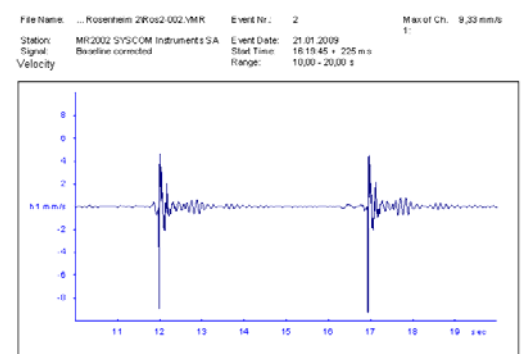


Abb. 6: Zeitschrieb Geschwindigkeit für Anregung durch Heeldrop (oben), Amplitudenspektrum mit  $f_{e1} = 7,2 \text{ Hz}$  und höhere Anteile bei 30 und 50 Hz wegen Estrich (unten)

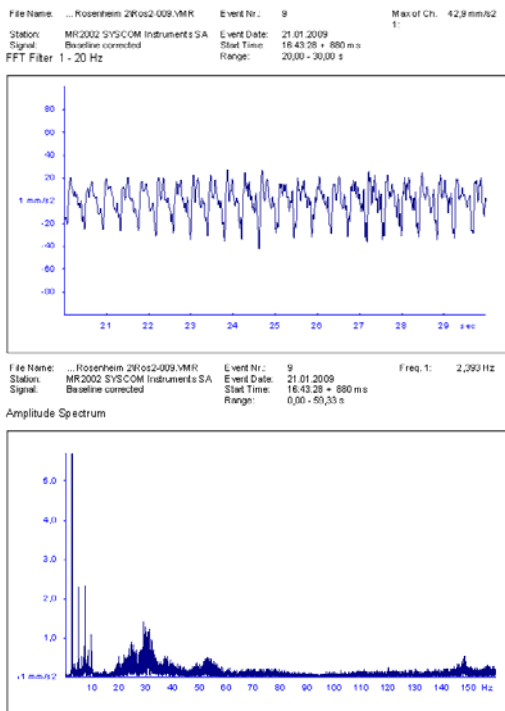


Abb. 7: Zeitschrieb Beschleunigung für Anregung durch Laufen mit  $\frac{1}{3} f_{e1} = 2,4$  Hz, gefiltert mit FFT-Filter 1 bis 20 Hz, zeigt  $a_{\max} = 0,043$  m/s<sup>2</sup> (oben), Amplitudenspektrum (unten)



**Deckenaufbau:**

- 5 mm Kautschukbelag (Bau)
- 60 mm Zementestrich
- 40 mm Mineralfaser Trittschalldämmplatte,  $s' \leq 6$  MN/m<sup>3</sup>, CP 5
- 15 mm Holzfaserplatten
- 447 mm Holz-Beton-Fertigelement (Lignotrend), mit Akustikelement

- Labor:  $L_{nw} = 39$  dB,  $C_{1,50-2500} = 2$  dB (bei 290 mm Deckenelement)
- Bau:  $L'_{nw} = 44$  dB,  $C_{1,50-2500} = -3$  dB

Abb. 8a: Rohdeckenelement; Deckenaufbau und Norm-Trittschallpegel im Labor und am Bau

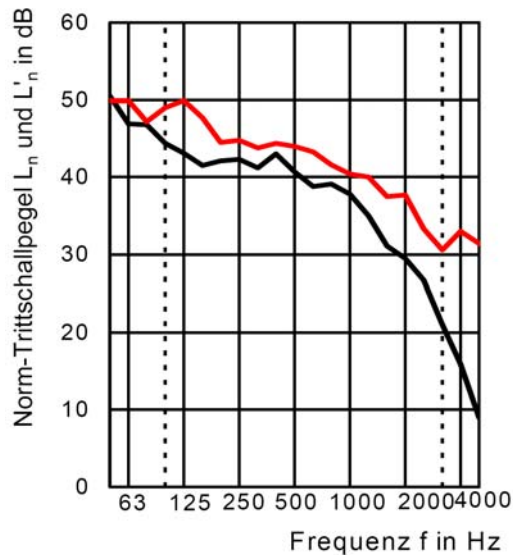


Abb. 8b: Deckenaufbau und Norm-Trittschallpegel im Labor und am Bau

**6 Zusammenfassung**

Durch den zunehmenden Einsatz von Holzdecken als Trenndecken auch in öffentlichen Gebäuden ergab sich die Notwendigkeit, ihr schall- und schwingungstechnisches Verhalten in Bezug auf das subjektive Empfinden des Nutzers genauer zu beurteilen und Bemessungsregeln für optimierte Decken zu erarbeiten. Die bisherigen Ergebnisse von zwei aktuellen Forschungsprojekten zu diesem Thema zeigen das Potenzial von Holzdecken für diese Anwendung auf und geben praxisnahe Umsetzungshilfen. Am ausgeführten Beispiel einer Trenndecke in Holz-Beton-Fertigteilbauweise beim Neubau der FOS-BOS-Rosenheim wurden Werte ermittelt, die sicherlich im gesamten Lebenszyklus des Gebäudes deutlich über den schall- und schwingungstechnischen Anforderungen liegen werden und damit einerseits der Philosophie des Herstellers für ein nachhaltiges Bauen voll entsprechen, andererseits aber auch noch genügend Spielraum für eine wirtschaftlich optimierte Ausführung lassen.

**Quellen**

- [1] DIN 4109, Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise November 1989 und Beiblatt 1 zur DIN 4109 Schallschutz im Hochbau, Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren, November 1989
- [2] DIN 1052: 2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin. August 2004
- [3] DIN EN ISO 140-1:2005-03, Bauakustik; Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 1: Anforderungen an Prüfstände mit unterdrückter Flankenübertragung; Deutsche Fassung EN ISO 140-1:1997+ A1:2004
- [4] Blaß, H.J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. 1. Auflage; Hrsg.: DGfH Innovations- und Service GmbH, München, 2004
- [5] Hamm, P. : Warum Decken zu schwingen beginnen. bauen mit holz. 3/2006. S. 24-29
- [6] Kreuzinger, H.; Mohr, B.: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz; Abschlussbericht Januar 1999. TU München, Fachgebiet Holzbau. Forschungsvorhaben durchgeführt für die EGH in der DGfH
- [7] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A. (2009): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. DGfH 2009
- [8] Rabold, A., Rank, E., Anwendung der Finiten Elemente Methode auf die Trittschallberechnung, Teilbericht zum Kooperationsprojekt: Untersuchung der akustischen Wechselwirkungen von Holzdecke und Deckenauflage zur Entwicklung neuartiger Schallschutzmaßnahmen, ibp Stuttgart, TU München, ift Rosenheim, DGfH 2009
- [9] Lang, J., Schallschutz im Wohnungsbau, Forschungsbericht ifip TU Wien, 2006
- [10] Reichelt, H., Schall- und schwingungstechnische Lösungen im Holzbau, Projektarbeit, Hochschule Rosenheim, 2008
- [11] Burkhart, C., Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, mögliche Ursachen, Tagungsband DAGA 2002
- [12] DIN EN 1995-1-1: 2004, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 (D)

aus: bauen mit holz, 4 / 2009, S. 38-43



## 11.2 Schallschutz, Schwingung

### Schwingungstechnische Optimierung von Holzdecken

**Patricia Hamm**

#### 1 Einleitung

Durch den modernen Holzbau stehen Holzwerkstoffe und Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen zur Verfügung, mit denen fast beliebige Grundrisse im Büro-, Verwaltungs-, Bildungs- und Wohnungsbau wirtschaftlich realisiert werden können. Die in diesen Bereichen erforderlichen großen Spannweiten beeinflussen jedoch meist negativ das Schwingungsverhalten der Decken. Gleichzeitig sind die Komfortansprüche der Nutzer und damit die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit gestiegen – schon ein leichtes Schwingen der Decke wird teilweise als Mangel empfunden.

Damit rückt das Vermeiden unangenehmer Schwingungen, ausgelöst z.B. durch das Begehen (Abb. 1) oder das Herumtoben von Kindern, bei der Bemessung im Neubau wie auch bei der Sanierung von Altbauten in den Vordergrund. Diese Entwicklung – verursacht durch größere realisierbare Spannweiten und eine Erweiterung der Einsatzgebiete für Holzkonstruktionen – spiegelt sich auch in der aktuellen Normung wider:

DIN 1052:2004-08 [1], Eurocode 5: 2004 [2] und SIA 265: 2003 [3] haben darauf reagiert und Schwingungsnachweise für Decken aufgenommen. Die Erläuterungen [5] zur DIN 1052 enthalten ein umfangreiches Kapitel zu diesem Thema.

- Die in der Praxis vorkommenden Systeme und Aufbauten sind jedoch so vielfältig, dass immer wieder Fragen von Seiten der Planer auftauchen, wie nun bei diesen und jenen speziellen Fällen der Schwingungsnachweis geführt werden soll.

- Auf der anderen Seite gibt es auch noch Defizite in den normativen Regelungen:

Denn obwohl der rechnerische Schwingungsnachweis oft bemessungsrelevant ist, gibt es immer wieder Klagen seitens der Bauherren bzw. der Nutzer über unangenehm empfun-

dene, die Gebrauchstauglichkeit einschränkende Schwingungen der Decken. Dies betrifft vor allem leichte Decken mit nur geringen Anforderungen an den Schallschutz. Diese können, angeregt durch einen Impuls, spürbar unangenehm schwingen und zu Beanstandungen führen.

- Ein dritter Punkt, der zu Verunsicherungen führen kann, ist dass bei Vergleichsmessungen an ausgeführten Decken festgestellt wurde, dass die tatsächlichen dynamischen Eigenschaften oft deutlich von den vereinfachten rechnerischen Annahmen abweichen.

Aus dieser Ausgangssituation startete im Herbst 2007 das AiF-Forschungsvorhaben „Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken“ [8] mit einer geplanten Laufzeit von zwei Jahren, gefördert vom BMBF, betreut von der DGfH, durchgeführt an der TU München.

Das Ziel sind die optimale Ausschöpfung des Dämpfungspotentials sowie einfach handhabbare aber wirtschaftliche Konstruktions- und Bemessungsregeln für die Planer. Durch die Bereitstellung von Konstruktions- und Bemessungsregeln in Ergänzung zum vorhandenen Wissensstand werden die Wirtschaftlichkeit und die Planungssicherheit der Planer und ausführenden Firmen und gleichzeitig die Attraktivität des Baustoffes Holz erhöht.

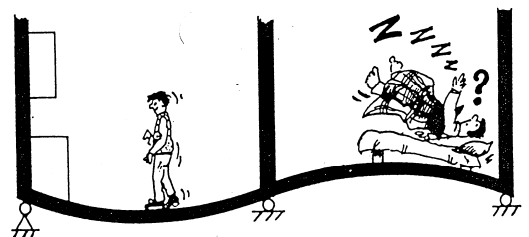


Abb. 1: Schwingungen von Decken und deren Übertragung in benachbarte Räume, aus [10]



Tab. 1: Dämpfungswerte für Holzdecken aus [5]

Material und Aufbau	Lehr'sches Dämpfungsmaß D
(Holz-) Decken ohne schwimmenden Estrich	1,0 %
Decken aus verleimten Brettstapelelementen mit schwimmendem Estrich	2,0 %
Holzbalkendecken und mechanisch verbundene Brettstapeldecken mit schwimmendem Estrich	3,0 %

## 2 Grundlagen der Schwingungen

### 2.1 Begriffsklärung am Beispiel Schaukel

Eine der wichtigsten Eigenschaften zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens ist die Eigenfrequenz und damit verbunden die Resonanz.

Anschaulich wird das Phänomen von Eigenfrequenz und Resonanz am Beispiel einer Schaukel. Ein Kind hat zwei Möglichkeiten hoch hinauf zu schaukeln:

Entweder wird die Schaukel weit ausgelenkt und losgelassen, so dass das Kind ausschaukeln kann. Dann finden die Bewegungen in der Eigenfrequenz des Systems Schaukel-Kind statt und werden wegen der natürlichen Dämpfung immer kleiner.

Oder das Kind nimmt selbst Schwung. Dabei reichen schon sehr kleine Kräfte, wenn genau zur richtigen Zeit wieder Schwung geholt wird. Das ist die Anregung in der Eigenfrequenz des Systems, d.h. in Resonanz. Bei jedem Mal Schwung holen wird Energie in das System eingebracht und die Amplituden werden jedes Mal größer.

Dieser Vorgang wird als Einschwingvorgang bezeichnet. Er ist beendet, wenn der so genannte Eingeschwungene Zustand erreicht wird. Im Eingeschwungenen Zustand werden die Amplituden nicht mehr größer, weil die eingebrachte Energie genau so groß ist wie die Energie, die über die Dämpfung des Systems in andere Energieformen umgewandelt wird, z.B. über die Reibung in Wärmeenergie. Dies bedeutet, dass ein System ohne jede Dämpfung nie den Eingeschwungenen

Zustand erreicht, weil der Einschwingvorgang, bei dem die Amplituden immer größer werden, nie endet.

### 2.2 Übertragung auf Balken

Im Unterschied zur Schaukel hat ein Balken theoretisch unendlich viele Eigenformen und zugehörige Eigenfrequenzen. Als Eigenfrequenzen eines Balkens werden die Frequenzen bezeichnet, in welchen er „am liebsten“ schwingt. Für die Betrachtung der personen- induzierten Deckenschwingungen ist i.A. nur die niedrigste (= erste) Eigenfrequenz relevant. Sie wird im Falle eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers (Abb. 2) nach Gl. 1 berechnet.

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = f_{\text{Balken}} \quad \text{Gl. 1}$$

$$\text{mit } I = \frac{b_{\text{Balken}} \cdot h^3}{12} \quad \text{Gl. 2}$$

$$\text{oder } f_{e,1} = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot w[\text{cm}]}} \quad \text{Gl. 3}$$

mit w: Durchbiegung unter der ständigen bzw. quasi-ständigen Gleichlast

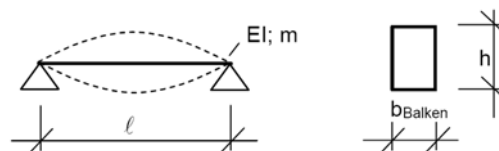


Abb. 2: Einfeldträger: Schwingungen in der ersten Eigenfrequenz und Querschnitt

Wird der Balken wiederholt angeregt und entspricht die Anregungsfrequenz genau einer der Eigenfrequenzen, spricht man von Resonanz. Bei Belastung eines Balkens nach Bild 3, einmal durch eine statische Kraft  $F_{\text{stat}}$  und einmal durch eine dynamische Kraft  $F(t)$ , erhält man die beiden Amplituden  $w_{\text{stat}}$  und  $w_{\text{dyn}}$  nach Erreichen des eingeschwungenen Zustandes im Resonanzfall:

$$w_{\text{stat}} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot EI} \quad \text{Gl. 4}$$

$$w_{\text{dyn}} = \frac{1}{2D} \cdot w_{\text{stat}} = V_{\text{max}} \cdot w_{\text{stat}} \quad \text{Gl. 5}$$

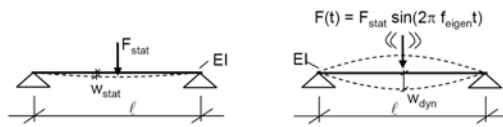


Abb. 3: Vergleich statische und dynamische Last

### 3 Bemessungsvorschlag für den Schwingungsnachweis

Die Nachweise der Schwingungen gehören – wie die Nachweise der Verformungen – zu den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Für diese Nachweise sind die charakteristischen Werte der Einwirkungen und die charakteristischen Mittelwerte der Steifigkeiten zu verwenden.

Liegt die Decke auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der Einzellast  $F$  die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten. Ein ausführlicher Beitrag zur Berücksichtigung der Lagerung auf Unterzügen findet sich in [7].

#### 3.1 Frequenzkriterium

##### Allgemeines

Die Eigenfrequenz der Decke soll so hoch gewählt werden, dass Resonanz aus den ersten drei harmonischen Anteilen der Einwirkung „Gehen“ vermieden wird. Bei einer max. Schrittfrequenz beim Gehen von 2,4 Hz sind das  $3 \cdot 2,4 = 7,2$  Hz. Die Grenzwerte und angesetzten Massen sind abhängig von der zugrunde gelegten Norm. Nach Eurocode 5 wird für die Masse  $m$  nur vom „Eigengewicht der Decke und anderen ständigen Einwirkungen“ (vgl. Eurocode 5 7.3.3 (3)) ausgegangen. Im Gegensatz dazu legt die DIN 1052

die quasi-ständige Einwirkung zugrunde, analog Gl. 7.

##### Grenzwerte nach DIN 1052

„Bei Decken unter Wohnräumen sollten, um Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden, die am ideellen Einfeldträger ermittelten Durchbiegungen  $w_{G,\text{inst}} + \psi_2 \cdot w_{Q,\text{inst}}$  aus ständiger und quasi-ständiger Einwirkung auf 6 mm begrenzt werden. Die Spannweite des Einfeldträgers ist bei Mehrfeldträgern die größte Feldweite  $\ell$ . Die elastische Einspannung in Nachbarfelder darf bei der Berechnung der Durchbiegung  $w_{G,\text{inst}} + \psi_2 \cdot w_{Q,\text{inst}}$  berücksichtigt werden.“

$$w_{\text{perm}} \leq 6 \text{ mm} \quad \text{Gl. 6}$$

$$\text{mit } w_{\text{perm}} = w_{G,\text{inst}} + \psi_2 \cdot w_{Q,\text{inst}} \quad \text{Gl. 7}$$

und  $\psi_2 = 0,3$  bei Wohnungsdecken

Nach Umrechnung mit Gl. 3 steckt hinter dieser Durchbiegungsbeschränkung (Gl. 6) eine Frequenzbegrenzung auf mindestens 7,2 Hz.

$$f_{e,\text{perm}} \geq 7,2 \text{ Hz} \quad \text{Gl. 8}$$

##### Grenzwerte nach Erläuterungen

Die Durchbiegungsbegrenzung auf 6 mm ist unabhängig von der Spannweite der Decke einzuhalten. Vor allem bei Decken mit großen Spannweiten wird dieser Nachweis bemessungsrelevant.

Nach den Erläuterungen können Decken mit Eigenfrequenzen kleiner 7,2 Hz ausgeführt werden. Die Eigenfrequenz der Decke unter quasi-ständiger Einwirkung  $f_{e,\text{perm}}$  sollte jedoch mindestens 6 Hz betragen. Bei einem Einfeldträger entspricht das einer Durchbiegung von 9 mm.

Von Decken mit Eigenfrequenzen kleiner als 6,0 Hz wird nach derzeitigem Kenntnisstand abgeraten. Im eingangs erwähnten Forschungsvorhaben, siehe [8], werden Decken mit Eigenfre-

quenzen kleiner als 6 Hz untersucht. Die Auswertungen hierzu stehen noch aus.

$$f_{e,perm} \geq 6,0 \text{ Hz} \quad \text{Gl. 9}$$

$$w_{perm} \leq 9 \text{ mm} \quad \text{Gl. 10}$$

### Grenzwerte nach Eurocode 5

Wohnungsdecken sollten unter ständigen Einwirkungen eine Eigenfrequenz von mindestens 8 Hz aufweisen. Bei einem Einfeldträger entspricht das einer Durchbiegung unter Gleichlast von 5 mm (wieder unabhängig von der Spannweite).

$$f_e \geq 8,0 \text{ Hz} \quad \text{Gl. 11}$$

$$w \leq 5 \text{ mm} \quad \text{Gl. 12}$$

### 3.2 Steifigkeitskriterium

#### Allgemeines

Im Rahmen der Untersuchungen in [9] und [8] wurde festgestellt, dass das Steifigkeitskriterium mindestens ebenso wichtig einzustufen ist wie das Frequenzkriterium. Dabei sollte die Steifigkeit der Decke so hoch sein, dass die Durchbiegung unter einer Kraft von 1 kN in Feldmitte einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Die Durchbiegung kann für einen Balken nach Abb. 2 oder bei einer Platte vereinfachend für einen 1 m breiten Plattenstreifen nach Gl. 4 berechnet werden.

#### Grenzwerte nach DIN 1052 mit Erläuterungen und Eurocode 5

In den genannten Normen sind variable Grenzwerte für das Steifigkeitskriterium angegeben mit je einer Spannweite von 0,5-4,0 mm/kN. Als Ergebnis aktueller Untersuchungen wird empfohlen, Grenzwerte nach Tab. 2 einzuhalten. Welcher Grenzwert verwendet wird, hängt vom System der Decke und von den Anforderungen des Bauherrn ab.

$$w_{stat}(1\text{kN}) \leq 0,25 \dots 0,5 \dots 1,0 \text{ mm} \quad \text{Gl. 13}$$

Tab. 2: Grenzwerte für die Untersuchung zur Steifigkeit

Grenzwert für Steifigkeit	Durchlaufträger mit	Einfeldträger mit
$w(1 \text{ kN}) \leq 1,0 \text{ mm}$	-	geringer Anforderung
$w(1 \text{ kN}) \leq 0,5 \text{ mm}$	geringer Anforderung	höherer Anforderung
$w(1 \text{ kN}) \leq 0,25 \text{ mm}$	höherer Anforderung	sehr hohe Anforderung

### 3.3 Begrenzung der Schwingbeschleunigung bzw. der Schwinggeschwindigkeit

#### Allgemeines

Der Nachweis der Schwingbeschleunigung wird nur in den Erläuterungen nach DIN 1052 und nur für Decken im Frequenzbereich zwischen 6 Hz und 7,2 Hz gefordert. Damit wird berücksichtigt, dass in diesem Frequenzbereich erstens Anregung in Resonanz mit der dritten Harmonischen aus Gehen möglich ist (Schrittfrequenz gleich 1/3 der Eigenfrequenz) und zweitens verstärkt die Schwingbeschleunigung wahrgenommen wird. Bei Frequenzen größer als 8 Hz wird die Schwinggeschwindigkeit verstärkt wahrgenommen. Dementsprechend werden im Eurocode 5, nach welchem Decken mit Frequenzen über 8 Hz vorausgesetzt werden, die Schwinggeschwindigkeiten untersucht.

#### Grenzwerte der Schwingbeschleunigung nach DIN 1052 bzw. Erläuterungen

Die Beschleunigung der Decke infolge eines Gehers sollte nicht größer sein als 0,1 m/s<sup>2</sup>, Gl. 14:

$$a \leq 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{Gl. 14}$$

Für ein einachsig oder zweiachsig gespanntes Deckenfeld als Einfeldträger mit der Breite b:

$$a \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{F_{dyn}}{M^* \cdot 2D} = \frac{56}{m \cdot b \cdot l \cdot D} \quad \text{Gl. 15}$$

Nach derzeitigem Forschungsstand ist der Nachweis der Schwingbeschleunigung nicht erforderlich, wenn ein schwimmender Nassestrich oder ein schwimmender Trockenestrich auf schwerer Schüttung aufgebracht ist.

**Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach Eurocode 5**

Nach Eurocode 5 wird für Decken mit Eigenfrequenzen größer 8 Hz die Schwinggeschwindigkeit nach einem Einheitsimpuls untersucht (Gl. 16 bis Gl. 18).  $v$  ist die Geschwindigkeit nach einem Einheitsimpuls (Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion in  $[m/(Ns^2)]$ ) und darf für rechteckige, an allen Rändern gelenkig gelagerte Decken nach Gl. 17 berechnet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen in [8] wurde festgestellt, dass dieses Kriterium nur äußerst selten maßgebend wird (vgl. Kapitel „Zusammenfassung“).

$$v \leq b^{(fe1-D-1)} \left[ \frac{m}{Ns^2} \right] \tag{Gl. 16}$$

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \tag{Gl. 17}$$

$$n_{40} = \left\{ \left[ \left( \frac{40}{f_{\text{Balken}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left( \frac{b}{l} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \tag{Gl. 18}$$

$n_{40}$  ist die Anzahl der Schwingungen 1. Ordnung mit einer Resonanzfrequenz bis zu 40 Hz:

$(EI)_l$  bzw.  $(EI)_b$  sind die äquivalenten Plattenbiegesteifigkeiten der Decke in Längs- bzw. in Querrichtung mit,  $(EI)_l \geq (EI)_b$ ,

$f_{\text{Balken}}$  ist die erste Eigenfrequenz des Systems, bei Einfeldträgern nach Gl. 1,

$D$  ist die Dämpfung nach Tabelle 1,

$b$  ist ein Grenzwert nach Eurocode 5 zwischen 50 und 150, empfohlen wird  $b = 150$ .

**Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit infolge Heeldrop**

Weil der Einheitsimpuls eine theoretische, unter normalen Bedingungen nicht messbare Größe ist, wird in [9] vorgeschlagen, den Vergleich über die Geschwindigkeit nach einem Heeldrop (Gl. 20 und Gl. 21) zu führen. Als Grenzwert für die Ge-

schwindigkeit nach einem Heeldrop wird der 6-fache Wert der Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion (Gl. 19) vorgeschlagen.

$$v_{\text{Heeldrop}} \leq 6 \cdot b^{(fe1-D-1)} \left[ \frac{m}{s} \right] \tag{Gl. 19}$$

Nach den Erläuterungen kann die Geschwindigkeit eines Balkens (Gl. 20) bzw. einer zweiachsig gespannten Deckenplatte (Gl. 21) nach einem Heeldrop wie folgt berechnet werden:

$$v = \frac{55}{\frac{m \cdot e \cdot l}{2} + 50} \frac{m}{s} \tag{Gl. 20}$$

$e$  ist der Balkenabstand bzw. die Einflussbreite des Balkens,  $m$  die flächenbezogene Masse in  $[kg/m^2]$

$$v = \frac{0,6}{m^{0,5} \cdot EI_l^{0,25} \cdot EI_b^{0,25}} \approx \frac{950 \cdot \alpha}{f_{\text{Balken}} \cdot m \cdot b \cdot l} \tag{Gl. 21}$$

**Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach [9]**

Nach [9] sollten die Grenzwerte für die Geschwindigkeiten nach einem Einheitsimpuls und nach einem Heeldrop auf ein Drittel der Werte nach Gl. 16 bzw. Gl. 19 reduziert werden.

**4 Übersicht zum aktuellen Stand der Normung**

Um einen besseren Überblick über die beschriebenen Nachweise nach DIN 1052 und Eurocode 5 zu bekommen, sind diese in einem Ablaufdiagramm dargestellt (Abb. 4).

**5 Zusammenfassung**

Holzdecken haben gegenüber Stahl- oder Stahl-Beton-Verbunddecken das Schwingungsverhalten betreffend den Vorteil einer höheren Dämpfung. Um das Dämpfungsvermögen von Holzdecken optimal nutzen zu können, werden im aktuellen Forschungsvorhaben unterschiedliche Rohdecken

mit unterschiedlichen Aufbauten untersucht. Bis jetzt gilt Tab. 1. Allerdings haben Holzdecken gegenüber Stahlbetondecken schwingungstechnisch den Nachteil einer geringen Eigenmasse. Deshalb ist es wichtig, den Schwingungsnachweis zu führen.

Als erste Ergebnisse des genannten Forschungsprojekts können folgende Punkte genannt werden, deren Einhaltung zu einer gebrauchstauglichen Decke führen.

1. Messungen an Decken ohne Aufbauten, d.h. noch während des Rohbauzustandes, zeigten, dass die Anordnung einer schwimmenden Estrichschicht (Nassestrich oder Trockenestrich mit schwerer Schüttung) sehr wichtig ist – nicht nur für den Schallschutz sondern auch für das Schwingungsverhalten. Ein solcher

(Tritt-) Schallschutz-Aufbau sollte gegeben sein.

2. Zur Nachweisführung ist das Frequenzkriterium entweder nach DIN 1052 (Gl. 6 bzw. Gl. 8) oder nach Eurocode 5 (Gl. 9) einzuhalten.
3. Zusätzlich wird dringend empfohlen, das Steifigkeitskriterium nach (Gl. 8) mit einem Grenzwert je nach Anforderung zwischen 0,5 mm und 1 mm, bei sehr hohen Anforderungen 0,25 mm einzuhalten.
4. Für Decken unter Räumen, die für rhythmische Bewegungen genutzt werden, wie z.B. Tanz- oder Gymnastikräume oder Turnhallen, sollten genauere Untersuchungen durchgeführt werden.

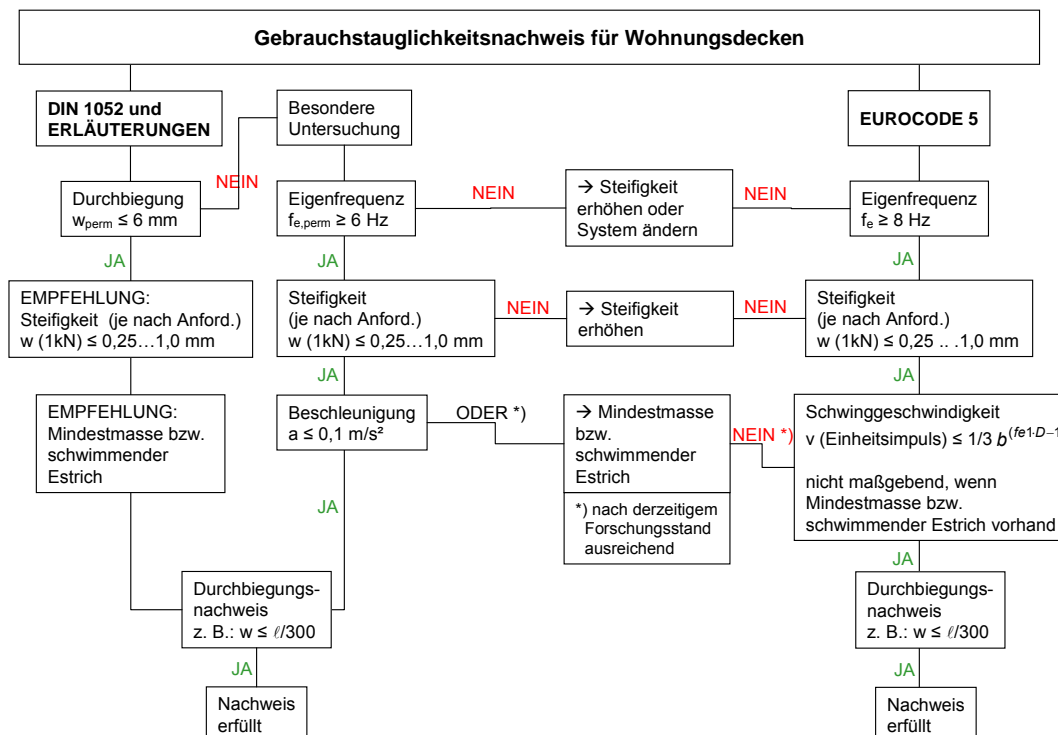


Abb. 4: Ablauf des Gebrauchstauglichkeitsnachweises nach DIN 1052 mit Erläuterungen und Eurocode 5

Nachweis der Geschwindigkeit:

Der dritte nach Eurocode 5 empfohlene Nachweis untersucht die Einheitsimpuls geschwindigkeitsreaktion. In allen 50, im Rahmen des erwähnten Forschungsvorhabens untersuchten Decken war der Nachweis der Geschwindigkeit nach dem Einheitsimpuls eingehalten, sogar bei Rohkonstruktionen und anderen als unangenehm eingestuft Decken. Der in [9] vorgeschlagene 1/3 Grenzwert wurde nur bei manchen Rohkonstruktionen überschritten, bei Decken mit üblichen Aufbauten nicht. Aufgrund dieser Erfahrung kann gesagt werden, dass der Nachweis der Geschwindigkeit bei Decken mit „üblichem“ (Tritt-) Schallschutzaufbau nicht maßgebend wird. Vereinfachend kann man sich bei diesen Decken auf die Nachweise Eigenfrequenz und Steifigkeit beschränken.

#### Quellen

- [1] DIN 1052: 2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin. August 2004.
- [2] Eurocode 5: EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung. November 2004.
- [3] SIA 265. Holzbau. 2003 by SIA Zürich.
- [4] Bachmann, Hugo et al. (1997): Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines. 2nd Edition, Birkhäuser Verlag Basel, Berlin, Boston.
- [5] Erläuterungen: Blaß, H.J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. 1. Auflage; Hrsg.: DGfH Innovations- und Service GmbH, München, 2004.
- [6] Hamm, Patricia (2006): Warum Decken zu schwingen beginnen. bauen mit holz. 3/2006. S. 24-29.
- [7] Hamm, Patricia (2008): Schwingungsverhalten von Decken bei Auflagerung auf Unterzügen. holzbau, die neue quadriga. 1/2008.
- [8] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A. (2009): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben: Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. DGfH 2009.
- [9] Kreuzinger, Heinrich; Mohr, Bernhard (1999): Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz; Abschlussbericht Januar 1999. TU München, Fachgebiet Holzbau. Forschungsvorhaben durchgeführt für die EGH in der DGfH.
- [10] Ohlsson, S. (1982): Floor vibrations and human discomfort. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 1982.



## 11.2 Schallschutz, Schwingung Akustikbauteile aus natürlichem Holz

**Ralf Bräuchle, Werner Eckert**

### 1 Einleitung

Das Thema Raumakustik stellt neben dem Themenbereich Schallschutz einen Komplex dar, der von Investoren als wichtiger Qualitätsfaktor wahrgenommen wird. In diesen Themenbereichen hat der Holzbau jedoch immer noch ein negatives Image, obwohl es bereits eine ganze Palette individueller Lösungen gibt. Lösungen, bei denen Holz sogar in seiner natürlichen, unbehandelten Form als Vollholz oder Leimholz verwendet wird – in der Form also, die beim Endverbraucher eigentlich das positivste Image hat.

Die Kommunikation vorhandener Lösungen wie auch die Weiterentwicklung zu verbesserten Vollholz-Lösungen für die Planungsaufgaben Bau- und Raumakustik birgt daher in Zukunft Wachstumspotenziale.

### 2 Stand der Technik

In Holzbaukonstruktionen werden parallel zu den klassischen Bauweise aus stabförmigen Balken und Ständern bereits seit den 90er Jahren statisch tragende Flächenbauteile aus Massivholz eingesetzt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um drei Produktkategorien:

- verschiedene Brettsperrholz-Varianten
- als Platten eingesetzte Brettschichtholzteile
- sowie Brettstapelementen

Flächenbauteile bieten besondere Potenziale im Bereich der Vorfertigung. Die industriell präzise Herstellung zum „Halbfabrikat“ ermöglicht die Verlagerung kostenintensiver Arbeitsschritte in das Werk und bietet damit ökonomische Vorteile.

Diese ökonomischen Vorteile kommen vor allem dann zum Tragen, wenn mit der Vorfertigung die Bereitstellung zusätzlicher Bauteilfunktionen verbunden ist oder wenn sie die Lösung der Bauteil-

anforderungen auf der Baustelle vereinfacht. Mögliche Aspekte sind:

- Statik (Grundfunktion des Bauteils)
- Gestaltung (Sichtoberflächen)
- Schallschutz  
(Hohlraum für Gewichtsschüttung)
- Installation (Hohlräume)
- Brandschutz (Zusatzlagen)
- Wärmeschutz (Raum für Dämmung)
- Raumklimawirksamkeit (Innere Oberflächen)
- Raumakustik (Absorberintegration)

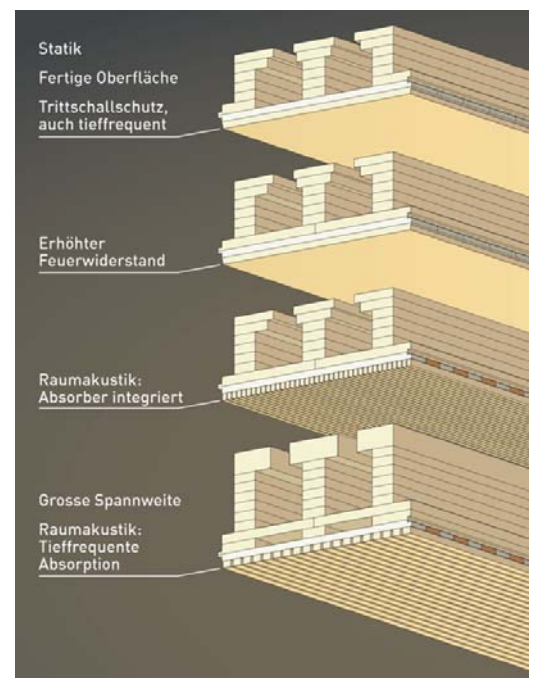


Abb. 1: Beispiel für integrierte Brettsperrholz-Deckenelemente: Ligno Rippe Q3 (von oben nach unten: mit geschlossener Untersicht, mit erhöhtem Feuerwiderstand, mit integriertem Absorber, mit verbesserter Akustikabsorption für große Spannweite)

Einige Hersteller bieten beispielsweise Elemente mit hochwertigen Sichtoberflächen an, die die gestalterische Aufgabe lösen. Im Gegensatz zur



konventionellen Bauweise mit untergehängten Deckenverkleidungen erübrigt sich der nachträgliche Innenausbau nahezu völlig.

An der in den vergangenen Jahren bereits angestiegenen Produktionskapazität bei den Brettsperrholzherstellern ist ablesbar, dass solche Bauteillösungen mit fertiger Oberfläche erfolgreich eingesetzt werden – sowohl im Wohnungsbau wie auch im kommunalen und gewerblichen Objektbau.

Auch die Integration von raumakustisch wirksamen Absorbern wird von einzelnen Herstellern praktiziert. Sie kommt steigenden Ansprüchen an die raumakustische Qualität von Räumen entgegen.



Abb. 2: Element nach obigem Schema bei der Montage.

### 3 Raumakustik

In nahezu allen Bereichen des Bauwesens spielt die akustische Qualität von Innenräumen eine Rolle – teils durch normative Regelungen vorgeschrieben, teils allenfalls durch „Empfehlungen“ angeraten. Häufig scheint jedoch auch trotz normativer Regelungen durch die am Bau beteiligten Parteien einvernehmlich auf eine raumakustische Planung verzichtet zu werden. Argumente der Wirtschaftlichkeit erweisen sich jedoch bei späterer Erfordernis von akustischen Nachbesserungen als falsch.

Im Folgenden einige Anwendungsbereiche, hinter denen sich Marktchancen für den Holzbau verbergen.

#### 3.1 Schulgebäude

Wo Wissen vermittelt werden soll, kommt es auf Kompetenz der Lehrenden und auf Lehrmethoden an. Letztlich spielen aber auch die Wahrnehmbarkeit und das Verständnis des gesprochenen Wortes eine wesentliche Rolle für den Lernerfolg.

In Räumen mit hohen Nachhallzeiten oder hohen Hintergrundgeräuschpegeln ist die Anstrengung für das menschliche Gehirn bei der Umsetzung der gehörten Information und der Erkennung der relevanten Inhalte erhöht. In der Folge nimmt die Konzentrationsfähigkeit im Laufe langer Schultage durch Ermüdung stetig ab, wesentlich schneller, als das in akustisch optimierten Räumen geschieht.

Dieser Effekt betrifft lernende Kinder ebenso wie Erwachsene. Bei Schülern im Grundschulalter kommt jedoch ein weiterer Aspekt hinzu: Die Fähigkeit, gehörte Sprache in Information umzuwandeln, ist beim jungen Gehirn noch deutlich schwächer ausgeprägt.

Auswertungen der PISA-Studie resümieren, dass die akustische Qualität von Klassenräumen einen wesentlichen Anteil an Erfolg oder Misserfolg von Unterricht hat.

Um beim Neubau von Schulen, Hörsälen oder Seminarräumen die raumakustische Aufgabe möglichst wirtschaftlich zu lösen, kann die Absorberfunktion bereits bei der Produktion in das tragende Bauelement integriert werden. Im gleichen Zug wird eine endgefertigte Holzoberfläche angebracht.

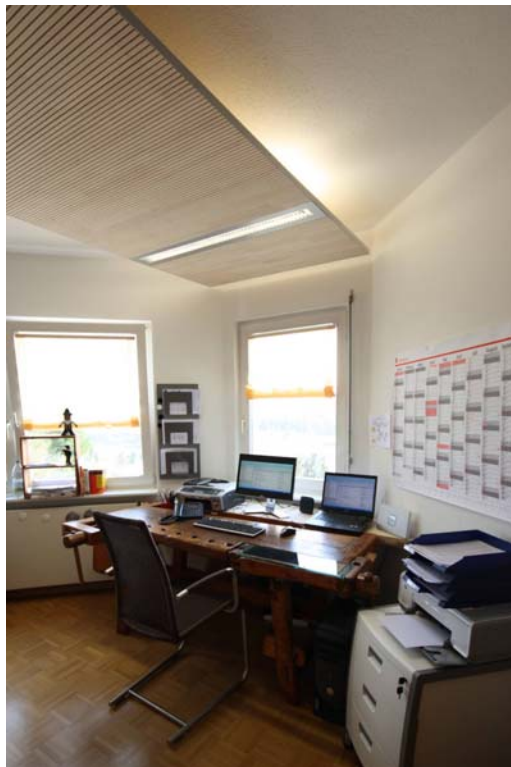


Abb. 3: Neuentwicklung, z.B. für die Sanierung: Als Akustiksegel eingesetztes Verkleidungselement Ligno Light alpha 28 aus Vollholz. Raumklimatisch evtl. erforderliche Speichermasse bleibt für Luftzirkulation zugänglich.

Nicht nur tragende Bauteile, auch Verkleidungselemente aus Vollholz mit Oberflächen in gleicher Qualität stellen ein Marktpotenzial für den Holz-

absatz dar, z.B. wenn schallharte Oberflächen (Mauerwerk, Glas etc.) bei der Sanierung kompensiert werden sollen.

Im Schulbau häufig gestellte erhöhte Anforderungen an Feuerwiderstand oder beim Trittschallschutz von Decken stellen weitere Faktoren für die Entwicklung von Holzbauelementen dar, ebenso wie der Wunsch nach großen Spannweiten.

### 3.2 Büros, Gewerbe

Der Charakter der Arbeitsstätte und die Leistungsfähigkeit wie auch Zufriedenheit der Mitarbeiter hängen zusammen. Möglichst geringe Lärmpegel haben gleich mehrere positive Effekte auf das Arbeitsergebnis:

Die Gesundheit der Beschäftigten wird direkt beeinflusst: Stimmt die Raumatmosphäre am Arbeitsplatz, profitiert der Unternehmer von sinkenden krankheitsbedingten Ausfallzeiten.

Die durch eine weniger störende Geräuschkulisse erhöhte Konzentrationsfähigkeit der Beschäftigten verringert die Fehlerquote bei der Produktion. Optimale Produktqualität kann hier entstehen.

Schließlich steigt mit der Konzentration auch die Arbeitssicherheit. Gefahren und Warnsignale werden besser wahrgenommen.

Es lohnt sich also, zu untersuchen, ob die Berücksichtigung von raumakustischen Faktoren wirklich nennenswerte Mehrkosten produziert:

Die Integration von Schallabsorbern in die ohnehin zu erstellende tragende Holzkonstruktion ist häufig nahezu kostenneutral. Die Bilanz kann gar positiv ausfallen, wenn die nachhaltige Chance der Verbesserung von Effizienz, Produktivität und Qualität berücksichtigt wird.

Die genannten Faktoren gelten offensichtlich nicht nur für industrielle oder handwerkliche Produktionsstätten. Auch die Qualität von Büroräumen profitiert.

### 3.3 Kindergärten, Kindertagesstätten

Die in den vorangehenden Abschnitten benannten Aspekte beim Schul- und Gewerbebau betreffen in Kombination die raumakustischen Überlegungen beim Bau von Kindergärten:

Der schulische Lernprozess verlagert sich zum einen zunehmend auf das Vorschulalter, womit das Ziel einer Optimierung der Verständlichkeit des Gelehrten raumakustische Maßnahmen auch in Kindergärten begründet.

Andererseits tut es dem Klima im Kindergarten gut, wenn der Geräuschpegel durch schallabsorbierende Maßnahmen begrenzt ist: Kinder sind ausgeglichener und weniger laut, der Lärm schaukelt sich nicht so leicht hoch. In der Folge ist auch die Belastung der Erzieherinnen und Erzieher geringer.

### 3.4 Sport- und Mehrzweckhallen, Säle

Beim Bau von Sport und Veranstaltungshallen ist Raumakustik Pflichtthema: Je größer das Raumvolumen, umso heikler sind zu hohe Nachhallzeiten für deren Nutzungsqualität. Häufig verstärken schallharte Glas- oder auch Betonflächen den Halleffekt.

Akustische Mängel hat jeder ganz real erlebt – es liegt in der Natur der Sache, dass sie eher auffallen als eine gute Qualität: Etwa wenn beim Gemeinde- oder Stadtfest gute Kommunikation möglich ist, wenn man nicht nur schreiend gegen eine dröhnende Geräuschkulisse ankommt.

Zum Beispiel wenn bei Kabarett- oder ähnlichen kulturellen Veranstaltungen in größeren Hallen

die vorgetragene Sprache überall, auch in den hinteren Reihen gut verständlich ist.

Oder wenn bei Konzerten – unabhängig von ihrer Art – der Klang ausgewogen beim Zuhörer ankommt, wenn die Töne einzelner Instrumente nicht auf der Strecke bleiben oder verzerrt werden.

Aus der Kombination von Tragfunktion und akustischer Funktion erwachsen wiederum Kostenvorteile. Spezialisierte Elemente erfüllen neben der Tragfunktion als Dach- oder Deckenplatte auch die aussteifende Aufgabe als statische Scheibe und ersetzen so Verbände. Abhängungsarbeiten über Kopf entfallen.

Als effiziente Absorber haben sich z.B. Holzfaserplatten erwiesen, die bei der Produktion der Brettsperrelemente eingelegt werden können.

### 3.5 Wohnräume

Akustik ist im privaten Bereich nur scheinbar kein wichtiges Thema.

Die Aufenthaltsqualität kann allerdings leicht auf der Strecke bleiben, wenn glatte, schallharte Flächen die architektonische Gestaltung an Wand, Decke oder Boden prägen, wenn in großen Räumen eher spärlich möbliert wird oder wenn große Glasflächen zur Belichtung angeordnet werden.

## 4 Zusammenfassung

### 4.1 Ökologie

Die grundsätzlichen ökologisch-nachhaltigen Qualitäten des Baustoffs Holz sind unstrittig und in der Bevölkerung auch anerkannt. Für die weitere Verbreitung von multifunktionalen Bauelementen sind die folgenden Aspekte von Relevanz.

#### 4.2 Ökonomie

Die oben beschriebenen integrierten, statisch tragenden Bauteillösungen sind häufig ökonomisch im Vorteil – wenn man den gesamten Funktionszyklus des Gebäudes betrachtet.

Reine Massivholzprodukte ohne Zusatznutzen dürften bei den im Holzbau oft hohen Qualitätsansprüchen aus ökonomischen Gründen auf Dauer weniger neue Absatzpotenziale bieten als leistungsfähige multifunktionale Bauelemente mit Zusatzfunktionen.

Da Raumakustik häufig Sache der Innenraumgestaltung bzw. Innenarchitektur ist, ist über die Konstruktion oft zu dem Punkt bereits entschieden oder gar in Ausführung, an dem die Gestaltung festgelegt wird. Zu spät also, um ein konstruktives Element einzubauen, das den Innenausbau „erledigt“.

#### 4.3 Planerische Aspekte

Information von Planern über die technischen Eigenschaften integrierter Elemente sowie die Bereitstellung von vergleichbaren Bauteildaten verschiedener Systeme sind für den Hochbauplaner essentiell und entscheiden über die Einbeziehung im Planungsprozess.

Die frühzeitige Einbeziehung der Innenarchitektur birgt zusätzliche Chancen.

#### 4.4 Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit wird zunehmend nicht nur durch gesundes und ökologisches Bauen definiert, sondern erweitert nach funktionalen Aspekten beurteilt sowie aus dem Blickwinkel der Werts bzw. der Wertbeständigkeit des Gebäudes.

Der funktionale Aspekt guter Raumakustik und die Dauerhaftigkeit dieser Funktion beeinflussen die Nachhaltigkeit des Gebäudes wie die Lebensdauer der Konstruktion deutlich. Denn Nutzungsqualität und -flexibilität sowie die Tatsache, dass auch möglichst langfristig keine Nachbesserungen erforderlich sind, bestimmen letztlich den Wert des Gebäudes.



## 11.3 Brandschutz

### Brandschutz im Holzbau

**Dirk Kruse, Michael Dehne**

#### 1 Allgemeines

Das deutsche Baurecht fällt aufgrund der föderalen Struktur in den Kompetenzbereich der einzelnen Bundesländer. Maßgebend sind daher die einzelnen Landesbauordnungen (LBO), welche sich an der Musterbauordnung (MBO) orientieren. Aus Gründen der Vereinfachung wird nur die MBO 2002 herangezogen. Es ist zu beachten, dass die einzelnen LBO teilweise erheblich abweichen.

Die allgemeinen Schutzziele des deutschen Baurechts

- der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorzubeugen,
- die Rettung zu ermöglichen und
- wirksame Löscharbeiten zu gewährleisten

gelten für jede bauliche Anlage völlig unabhängig von den verwendeten Konstruktionsbaustoffen.

Die aus diesen Schutzziele abgeleiteten materiellen Anforderungen orientieren sich an dem Risiko einer baulichen Anlage. Das Risiko wird dabei nicht durch die Konstruktion und die verwendeten Baustoffe sondern durch die konkrete Nutzung bestimmt. Neben den Landesbauordnungen, die im wesentlichen Wohn- und Verwaltungsnutzungen abdecken, existieren daher eine Reihe unterschiedlicher Sonderbauverordnungen.

Die Landesbauordnungen stellen ein konservatives Standardbrandschutzkonzept dar. In Abhängigkeit von der Nutzung, Höhe und Grundfläche des Gebäudes ist auch der Einsatz der Holzbauweise in gewissen Grenzen möglich. Unter dem Gesichtspunkt der brandschutztechnischen Anforderungen in Verbindung mit der Holzbauweise lassen sich die fünf Gebäudeklassen in drei Hauptgruppen unterteilen.

#### 2 Gebäude geringer Höhe (GK2 – GK3)

Die Gebäude geringer Höhe sind auf eine Fußbodenhöhe des obersten Aufenthaltsraumes von bis zu 7 m begrenzt. Bis zu dieser Fußbodenhöhe ist der Einsatz von üblichen Feuerwehrsteckleitern möglich.

Für die tragenden und raumabschließenden Bauteile der oberirdischen Geschoße gilt die Anforderung feuerhemmend (F30-B). In der Gebäudeklasse 3 werden an das Untergeschoß erhöhte Anforderungen gestellt. Hier sind die tragenden und raumabschließenden Bauteile feuerbeständig (F90-A) auszuführen. Außenwandbekleidungen dürfen in der Baustoffklasse DIN 4102-B2 gemäß DIN 4102-1:1998-05 ausgeführt werden. Diese Anforderungen stellen den Holzbau vor keine größeren Herausforderungen. Es existiert eine Vielzahl von Standardkonstruktionen, die den Anforderungen genügen und in der Praxis bewährt sind. Sofern Sonderlösungen angestrebt werden, ist ein rechnerischer Nachweis über eine heiße Bemessung oder ein entsprechender Brandversuch möglich.

Die Bauteile sind vergleichsweise wirtschaftlich, so dass am Markt kein Nachteil gegenüber anderen Bauweisen besteht.

#### 2 Gebäude mittlerer Höhe (GK4)

Die Gebäudeklasse 4 umfasst Gebäude mittlerer Höhe, die eine Fußbodenhöhe des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen von bis zu 13 m und Nutzungseinheiten bis zu 400 m<sup>2</sup> aufweisen. Durch die Musterbauordnung 2002 [1] wird in Verbindung mit der Musterrichtlinie für Brandschutzanforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFH HolzR) [2] die Errichtung bis zu fünfgeschossiger Holzbauten ermöglicht. Die Grundsatzanforderungen an die tragenden und raumabschließenden Bauteile ist die hochfeuerhemmende Ausführung. Die hochfeuerhemmenden Bauteile erfüllen die Anforderungen

zung F 60 (Feuerwiderstand nach DIN 4102-2 [9]) und K 60 (Kapselklasse nach DIN EN 13501 [10])

Die Grundlagen für diese Erleichterungen wurden durch theoretische Untersuchungen und ein umfangreiches Brandversuchsprogramm am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig gelegt. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass das hohe brandschutztechnische Sicherheitsniveau in Deutschland auch bei Gebäuden in Holzbauweise im mehrgeschossigen Bereich aufrechterhalten werden kann.

Dabei wurden folgende Gefahrenpotentiale untersucht und durch geeignete konstruktive Maßnahmen entschärft:

- Zusätzlicher Eintrag von Brandlasten durch die Holztragkonstruktion,
- Beteiligung an der Rauchgasentwicklung und an Pyrolyseprodukten,
- Gefahr von Nachentzündungen,
- Bildung von Glutnestern innerhalb der Bauteile,
- Brandentstehung innerhalb der Konstruktion (durch Kurzschluss o.ä.),
- Brandeinleitung und Brandweiterleitung über Installation und
- Rauchweiterleitung über Anschlüsse.

Da alle brennbaren Bestandteile der Konstruktion im mehrgeschossigen Holzbau durch nicht-brennbare Bekleidungen eingekapselt werden, nimmt die Holztragkonstruktion für definierte Zeiträume nicht am Brandgeschehen teil. Weil wie bei allen anderen Bauweisen zunächst das im Brandraum vorhandene Mobiliar und sonstige Brandlasten (Fußbodenbeläge, Vorhänge etc.) am Brandgeschehen teilnehmen, ergibt sich bei Einkapselung der brennbaren Konstruktionsbrandlast kein erhöhtes Risiko im Vergleich zu Massivbauten.

Durch die Einkapselung der Holztragkonstruktion kann für definierte Zeiträume auch eine vermehr-

te Rauchgasentwicklung und die Entstehung von zusätzlichen Pyrolysegasen verhindert werden.

Die Verhinderung der Entzündung der Holztragglieder innerhalb der Konstruktion eliminiert außerdem die Gefahr von Nachentzündungen und eines verzögerten Tragfähigkeitsverlustes durch ggf. vorhandene Glutnester im Inneren der Bauteile nach dem Ablöschen des Primärbrandes.

Die Brandentstehung innerhalb der Konstruktion durch Installationen kann praktisch ausgeschlossen werden, indem alle gebündelten Installationsbrandlasten in Vorwandebenen geführt werden. Die Brandweiterleitung über Installationen in andere Nutzeinheiten kann verhindert werden, indem geeignete Abschottungsmaßnahmen angeordnet werden.

Das Problem der Rauchweiterleitung über Bauteilanschlüsse Wand / Wand und Wand / Decke kann beseitigt werden, indem die in der M-HFHolzR genannten konstruktiven Mindestanforderungen erfüllt werden.

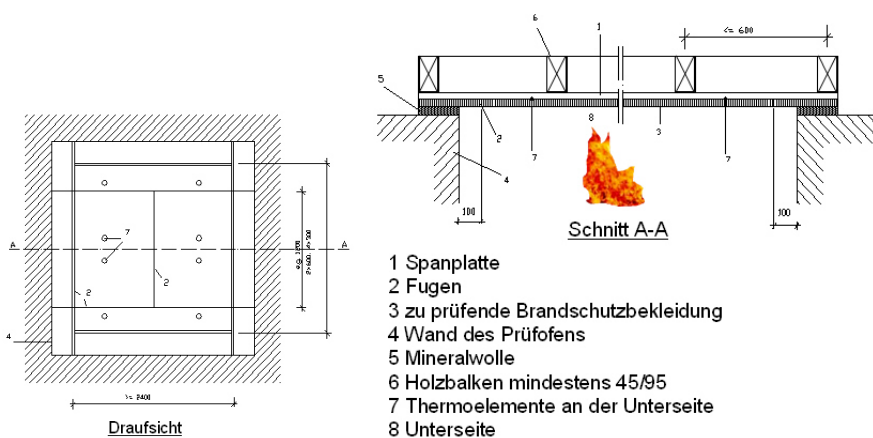
## 2.1 Kapselklasse K60

Im Zuge des Übergangs auf die europäische Klassifizierung von Bauteilen und der Einbindung in das deutsche bauaufsichtliche Verfahren wurde eine Norm zur Bestimmung der Brandschutzwirkung von Bekleidungen entwickelt. Diese europäische Norm DIN EN 14135 [11] legt ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Fähigkeit einer Brandschutzbekleidung fest, den darunter liegenden brennbaren Baustoff gegen Entzündung, Verkohlung und andere Schäden während einer definierten Normbrandbeanspruchung (ETK) zu schützen.

Werden die in dieser Norm festgelegten Leistungskriterien (Verhinderung der Entzündung bzw. Verkohlung des Holzes) eingehalten, wird die Brandschutzbekleidung je nach Dauer ihrer

Schutzwirkung einer Kapselklasse nach DIN EN 13501 Teil 2 zugeordnet.

Zur Prüfung wird die Brandschutzbekleidung gemäß Abb. 1 auf eine Norm-Trägerplatte (gewöhnliche, nicht mit Flammschutzmitteln behandelte Holzspanplatte) montiert, die ihrerseits auf Holzbalken befestigt ist. An der Grenzschicht zwischen der Brandschutzbekleidung und der Holzspanplatte werden Thermoelemente angebracht, die die Temperaturerhöhung im Probekörper messen.



- 1 Spanplatte
- 2 Fugen
- 3 zu prüfende Brandschutzbekleidung
- 4 Wand des Prüfofens
- 5 Mineralwolle
- 6 Holzbalken mindestens 45/95
- 7 Thermoelemente an der Unterseite
- 8 Unterseite

Abb. 1: Bestimmung der Brandschutzwirkung (Kapselkriterium K) im Deckenofen

Im Gegensatz zur Prüfung des Feuerwiderstandes nach DIN 4102-2 wird bei der Prüfung der Kapselwirkung der Brandschutzbekleidung, das heißt bei der Überprüfung der Fähigkeit der Bekleidung, den dahinter liegenden brennbaren Baustoff vor der Entzündung zu schützen, die Temperatur direkt hinter der Bekleidung betrachtet. Im Mittel muss die Temperaturerhöhung dort kleiner als 250 K und an der ungünstigsten Stelle kleiner als 270 K sein. Dieses Leistungskriterium resultiert aus der Erkenntnis, dass die Entzündungstemperatur von Holzstämmen unter schneller Erwärmung bei ca. 270 °C bis 300 °C liegt. Zudem darf keine Entzündung oder Verkohlung auf der Holzwerkstoffplatte auftreten. Schmelzen oder Schrumpfung wird als Schaden angesehen,

Verfärbungen dagegen nicht. Die Brandprüfung wird nach Erreichen der angestrebten Kapseldauer beendet. Unmittelbar danach wird die Brandschutzbekleidung von der Norm-Trägerplatte entfernt, um diese auf Beschädigungen (Verkohlung oder Abbrand) zu untersuchen.

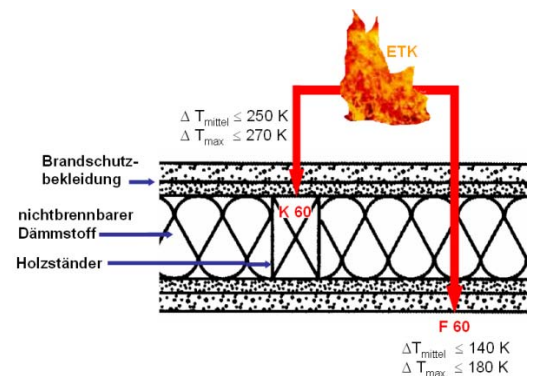


Abb. 2: Leistungskriterien K 60 und F 60 im Vergleich bei hochfeuerhemmenden, raumabschließenden Bauteilen in Holzbauweise

Die Ausführung in F 60-Qualität bereitet den Holzbauunternehmen keine Probleme, da diese Feuerwiderstandsklasse mit den Standardkonstruktionen ohne weiteres erreicht werden kann und eine relativ große Auswahl an geprüften Wand- und Deckenkonstruktionen existiert [7]. Auch die Anforderungen an die Rauchdichtigkeit der Anschlüsse gemäß M-HFHolzR können mit relativ einfachen konstruktiven Maßnahmen erfüllt werden. Die Standardanschlussdetails der Unternehmen lassen sich mittels Fugenversätzen, sowie der Einhaltung von Verbindungsmittelabständen und durch die Anordnung von komprimierten, nichtbrennbaren Dämmstreifen problemlos ertüchtigen [8].

Problematisch ist dagegen die Erfüllung der Anforderung der Kapselklasse K 60 durch eine Brandschutzbekleidung. Wirtschaftliche Konstruktionen sind damit schwierig herzustellen, weil die Erfüllung der Leistungskriterien der Kapselklasse K 60 bei der Brandprüfung nach



DIN EN 14135 [5] die Verwendung von relativ dicken nichtbrennbaren Bekleidungen (z.B. 2 x 18 mm GKF) oder sogar spezieller Brandschutzplatten erfordert, die eine vorzeitige Rissbildung verhindern. Hinzu kommt, dass die konstruktiven Mindestanforderungen der M-HFHolzR (z.B. Fugenversatz) zurzeit noch einen erhöhten Fertigungsaufwand verursachen, weil für viele Detailprobleme (z.B. die Öffnungsausleibung von Bauteileinbauten in der Art der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung) weiterhin noch keine industriell vorgefertigten Standardlösungen existieren.

Weitere Praxisprobleme bestehen darin, dass Bauherren mehrgeschossiger Holzbauten meist auch sichtbare Holzelemente und / oder (normalentflammbare) Holzfassaden wünschen. Dies ist jedoch gemäß MBO 2002 und M-HFHolzR derzeit nicht zulässig.

In der Regel lassen sich jedoch mit einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept, welches speziell auf den Einzelfall zugeschnitten ist und nicht allein auf baulichen Maßnahmen beruht, viel wirtschaftlichere Lösungen erzielen. Die gezielt aufeinander abgestimmten baulichen, anlagentechnischen, abwehrenden und organisatorischen Komponenten führen zu einem optimalen Gesamtkonzept, mit dem die bauaufsichtlichen Schutzziele oftmals sogar zuverlässiger erfüllt werden, als mit dem „Brandschutzkonzept von der Stange“ der Landesbauordnungen bzw. der MBO.

Ein relativ hohes Kosteneinsparpotential im mehrgeschossigen Holzbau bietet die Reduzierung der Kapselklasse K 60 auf K 30. Um diese Anforderung sinnvoll kompensieren zu können, muss man sich zunächst die Frage stellen, welches Schutzziel damit verfolgt wird.

Die Anforderung K 60 dient nicht dem Ziel der Sicherstellung von Flucht und Rettung der Be-

wohner. In der Regel dürfte eine Evakuierung eines fünfgeschossigen (und damit relativ kleinen) Gebäudes 10 Minuten nach Brandentdeckung spätestens jedoch nach 20 Minuten abgeschlossen sein. Vielmehr bestanden seitens der Feuerwehren Bedenken, ob in mehrgeschossigen Holzbauten das Schutzziel der Ermöglichung einer wirkungsvollen Brandbekämpfung erfüllt werden kann. Die Befürchtungen bestanden darin, dass mögliche Brände im Innern der Holzbauteile sowie eine unkontrollierte Brandausbreitung über Hohlräume einen Löscherfolg erschweren könnten. Zudem wurde befürchtet, die Einsatzkräfte könnten nach dem Löschangriff noch durch ein möglicherweise eintretendes verzögertes Tragwerksversagen infolge eines versteckten Weiterbrandes hinter der Bekleidung gefährdet werden [12].

Um diese Gefährdungen auszuschließen, wurde vereinbart, Holzbauteile in der Gebäudeklasse 4 so auszubilden, dass sie während der ersten 60 Minuten nach Brandbeginn einem nichtbrennbaren Massivbauteil gleichgesetzt werden können. Dies setzt voraus, dass sich die brennbaren Holztragglieder während dieser Zeitspanne nicht entzünden dürfen.

Die Anforderung K 60 resultiert daher in erster Linie aus der Gewährleistung einer wirkungsvollen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr. Wenn nun mittels geeigneter Anlagentechnik dafür Sorge getragen wird, dass der Brand rasch entdeckt wird und die Feuerwehr dementsprechend eher alarmiert wird, erscheint es vertretbar, die Kapselung der Holzbauteile entsprechend zu verringern.

Geeignet ist in diesem Zusammenhang eine automatische Brandmeldung über eine vernetzte Anlage nach DIN 14676 [15]. Die „echte“ Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 Teil 2 [13] und DIN 14675 [14] sollte jedoch Sonderbauten, wie

Versammlungsstätten, Hochhäusern, Krankenhäusern, Pflegeheimen oder Verkaufsstätten, vorbehalten bleiben.

### 3 Gebäude mittlerer Höhe (GK 5)

Die Gebäudeklasse 5 schließt die Lücke von der fünfgeschossigen Bauweise bis zur Hochhausgrenze von 22 m für den Fußboden des obersten Aufenthaltsraumes. Die Grundsatzanforderung an die tragenden und aussteifenden Bauteile in der GK 5 ist die feuerbeständige Ausführung. Derartige Bauteile weisen per Definition einen Feuerwiderstand von 90 Minuten auf und müssen aus nicht-brennbaren Baustoffen bestehen. Damit bietet sich baurechtlich zunächst keine Möglichkeit sechs oder siebengeschossige Gebäude in Holzbauweise zu errichten.

Eine Umsetzung solcher Projekte ist derzeit daher nur im Rahmen von ganzheitlichen Brandschutzkonzepten mit entsprechenden Kompensationsmaßnahmen möglich.

Einige grundsätzliche Konstruktionsmerkmale sind dabei zu beachten. Die tragende Holzkonstruktion muss in Holzmassivbauweise hergestellt werden, um die Gefahr von Hohlraumbränden auszuschließen. Die Bauteile müssen auf einen Feuerwiderstand von 90 Minuten ausgelegt werden und mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung der Kapselklasse K<sub>2</sub>60 versehen werden. Die Geschoßdecken sollten zweckmäßigerweise als Holz-Beton-Verbundelemente realisiert werden, um eine absolute Rauchdichtigkeit über die Geschoße zu gewährleisten. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die vertikale Installationsführung zu legen.

Besondere Bedeutung hat auch die Auslegung der Flucht- und Rettungswege. Die Ausbildung eines eigenen Treppenturmes in Massivbauweise, der permanent luftdurchspült ist und das Gebäude über Brücken erschließt, führt zu einer erheb-

lich gesteigerten Sicherheit. Ein Ausfall des ersten Fluchtweges kann damit mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. In Verbindung mit einer vernetzten Brandmeldeanlage ist damit die Flucht der Nutzer innerhalb kurzer Zeiträume absolut sichergestellt. Für die Rettungskräfte der Feuerwehr steht ein sicherer Angriffsweg zur Verfügung.

Bei Umsetzung dieser und anderer konstruktiver Merkmale erreicht ein siebengeschossiges Gebäude in Holzbauweise eine höhere Sicherheit als ein Massivbauwerk vergleichbarer Höhe in klassischer Konstruktion.



Abb. 3: Siebengeschossiges Gebäude in Holzbauweise in Berlin.

### 4 Zusammenfassung

Aufgrund der umfangreichen theoretischen und experimentellen Grundlagenuntersuchungen [2] ist es gelungen, die Bedenken der Bauaufsicht und der Feuerwehr gegenüber der Holzbauweise auszuräumen. Die MBO 2002 erlaubt in Verbindung mit der M-HFHolzR die Erschließung der innerstädtischen Quartiere in mehrgeschossiger Holzbauweise. Wenn die konstruktiven Anforderungen der M-HFHolzR erfüllt werden, können die mit der Brandschutzbekleidung eingekapselten Holzkonstruktionen für den Zeitraum der Kapselklasse als vollkommen gleichwertig zu Mauerwerks- oder Stahlbauteilen betrach-

tet werden, da sich die Holztragglieder während dieser Zeitspanne nicht am Brand beteiligen. Die Feuerwehren sind in der Regel in der Lage, innerhalb der Zeitspanne der Kapselklasse wirksame Löscharbeiten durchzuführen. Über ganzheitliche Brandschutzkonzepte ist es sogar möglich bis zu sieben Geschoße zu realisieren.

Aktuelle Projekte beschäftigen sich mit der Entwicklung von sicheren normal-entflammbaren Fassadenkonstruktionen sowie transparenten Brandschutzbeschichtungen, um Holz auch sichtbar verbauen zu können.

#### Quellen

- [1] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFH-HolzR). Fassung 2004; [www.is-argebau.de](http://www.is-argebau.de)
- [2] Hosser, D.; Dehne, M.; Zehfuß, J.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise; Forschungsauftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung unter Beteiligung des iBMB/MPA der TU Braunschweig sowie der VHT Heusenstamm; Stufe 1: Theoretische Grundlagenuntersuchungen, Stufe 2: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen; Abschlussbericht Juli 2000
- [3] Brandschutzkonzept 2005G103-B1 „Mehrfamilienhaus im Vauban“. Dehne, Kruse & Partner Brandschutzingenieure, Gifhorn August 2005
- [4] Kerbl, R.; Peter, M.; Dehne, M.: Sechsgeschossiges Pflegeheim in Holzbauweise. Bauen mit Holz, Fachzeitschrift für konstruktiven Holzbau und Ausbau, Ausgabe 01/2005, S. 34-38, (2005)
- [5] Dehne, M., Pape, H., Kruse, D., Krolak, M.: Informationsdienst Holz spezial, Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude und Aufstockungen in Holzbauweise. Dezember 2005
- [6] Musterbauordnung (MBO) Fassung 2002; [www.is-argebau.de](http://www.is-argebau.de)
- [7] Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau IRB. [www.irbdirekt.de](http://www.irbdirekt.de)
- [8] Hosser, D.; Zehfuß, J.; Dehne, M.: Brandschutz bei Gebäuden mittlerer Höhe in Holzständerbauweise. vfdB-Zeitschrift, Heft 2 (2001), S. 71-78
- [9] DIN 4102 Teil 2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Bauteile: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Fassung September 1977
- [10] DIN EN 13501-2, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen (mit Ausnahme von Produkten für Lüftungsanlagen), Deutsche Fassung Dezember 2003
- [11] DIN EN 14135, Bestimmung der Brandschutzwirkung, Deutsche Fassung 14135:2004
- [12] Dehne, M.; Kruse, D.: Mehrgeschossiger Holzbau – Erhöhte Risiken für die Feuerwehr? Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung, Ausgabe 6/2005, Seite 426 – 437
- [13] ISO 5660 – Fire tests – Reaction to fire, Part 1: Heat release rate from building products (Cone calorimeter method)
- [14] DIN 4102 Teil 9, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Kabelabschottungen, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Fassung Mai 1990
- [15] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen. Muster-Leitungsanlagenrichtlinie MLAR, Fassung März 2000

## 11.3 Brandschutz

### Sicher hoch hinaus im Holzbau

### Übertriebener Ehrgeiz oder zwingende Notwendigkeit?

**Karsten Tichelmann**

#### 1 Mehrgeschossiger Holzbau – warum?

Holz und Holzwerkstoffe für mehrgeschossige Wohn- und Bürogebäude zu zulassen scheint für einige unverständlich und wird als riskante Spielerei angesehen. Doch weder ist dies riskant und auch die Motivation ist eine grundsätzlich andere.

Die Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Leistungsfähigkeit von Holz führt dazu, diesen Werkstoff oft profan zu verwenden. Architekten, Ingenieure und auch Genehmigungsbehörden sind mit ihren Ansprüchen an den Baustoff Holz oft zu bescheiden. Die mit dem Werkstoff Holz erstellten Bauwerke und Gebäudestrukturen spiegeln nur unseren heutigen Kenntnisstand und die nur mäßig umgesetzten technischen Möglichkeiten wieder. Seit einigen Jahren widmet man sich der Frage, ob das Potential des Werkstoffs Holz für mehrgeschossige Gebäude erschöpft ist.

Die Antwort darauf ist eindeutig, der Weg dahin wird jedoch nur zögerlich beschritten. Die Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen für den mehrgeschossigen Wohnungs- und Bürobau ist wirtschaftlich und auch im Hinblick auf alle sicherheitsrelevanten Belange – im Besonderen des Brandschutzes – ohne Einschränkung möglich und ökologisch zwingend notwendig.

Wenn der Bausektor zur Sicherung einer zukunftsfähigen Wirtschaft beitragen soll, so setzt dies voraus, dass verstärkt Bauweisen und Baustoffe eingesetzt werden, welche die Anforderung eines niedrigeren Material-, Massen- und Energieeinsatzes erfüllen. Holz als Baustoff mit der höchsten Ressourceneffizienz ist ein maßgeblicher Hoffnungsträger für ein künftiges ökologisches und ökonomisches Bauen - auch in mehrgeschossigen Gebäuden.



Abb. 1: Mehrgeschossiger Holzbau in Vancouver/Kanada (VHT)

Dem stehen jedoch noch eine verbreitete konservative Haltung und ein auf Marktanteile fixierter Lobbyismus massiver Bauweisen entgegen. Dies ist mit den globalen gesellschaftspolitischen Zielsetzungen und der zukunftsfähigen Sicherung unseres Wohlstandes nicht vereinbar.

Weltweit wird nach Lösungen gesucht, den bereits vorhandenen Anteil des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in unserer Atmosphäre zu reduzieren. Im Hinblick auf das Weltklima ist nicht mehr der Minderverbrauch das Ziel sondern die schnellstmögliche Reduktion des CO<sub>2</sub>-Gehaltes unserer übersättigten Atmosphäre. CO<sub>2</sub> „Speicherseen“ im Erdinneren oder in den Tiefen unserer Ozeane sind Gegenstand internationaler Sonderforschungsbereiche. Die Eisendüngung unserer Meere für Algen-

und Planktonfarmen sind Hoffnungsträger unser Klima zu stabilisieren. Doch im Bauwesen, den ressourcenintensivsten Sektor der Wirtschaft in Österreich und Deutschland, ignorieren wir, dass die verstärkte Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen ein zwingend notwendiger Beitrag sein muss.

Die Reduktion des Heizenergieverbrauches wird weltweit forciert. Dass die Energie- und Ressourcenverbräuche unserer konservativen Bauweisen der bei der Entstehung eines Gebäudes ein Vielfaches des Heizenergieverbrauches des gesamten Lebenszykluses betragen ist oft nicht bekannt. Einen nachdenklichen Aufschluss geben die Untersuchungen des Mipshaus-Instituts. Die Bewertung von Material-Input pro Service-Einheit (MIPS) ist ein anerkanntes Verfahren zur Bewertung der Umweltinanspruchnahme von Produkten wie Baustoffen und gesamten Gebäuden entlang des gesamten Lebenswegs. In Analogie zum Nachweis des Jahres- Primärenergiebedarfs wird der Nachweis der verbrauchten Ressourcen von Luft, Boden, Wasser und nicht regenerierbarer Energien geführt. Empfehlungen für die zulässigen und wirtschaftlich vertretbaren Grenzwerte werden derzeit vom Mipshaus-Institut erarbeitet.

Die Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Leistungsfähigkeit von Holz führt dazu, diesen Werkstoff oft profan zu verwenden. Architekten, Ingenieure und auch Genehmigungsbehörden sind mit ihren Ansprüchen an den Baustoff Holz oft zu bescheiden. Die mit dem Werkstoff Holz erstellten Bauwerke und Gebäudestrukturen spiegeln nur unseren heutigen Kenntnisstand und die technischen Möglichkeiten wieder. Seit einigen Jahren widmet man sich der der Frage, ob das Potential des Werkstoffs Holz für mehrgeschossige Gebäude erschöpft ist.

Die Antwort darauf ist eindeutig, der Weg dahin wird jedoch nur zögerlich beschritten. Die Ver-

wendung von Holz und Holzwerkstoffen für den mehrgeschossigen Wohnungs- und Bürobau ist wirtschaftlich und auch im Hinblick auf alle sicherheitsrelevanten Belange – im Besonderen des Brandschutzes – möglich.

Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäudestrukturen aus Holz und Holzwerkstoffen, unter Berücksichtigung modernster, konzeptioneller Lösungen die auf der Grundlage der „K-Bauweise“ (auch als „Kapseltechnik“ bezeichnet) basieren.



Abb. 2: Viergeschossiger Holzbau in Mischbauweise, Düsseldorf (Petzinka Pink Architekten)

## 2 Entwicklungen im Brandschutz mehrgeschossiger Holzhäuser

Die wesentlichen Ziele der Regelungen bezüglich des Brandschutzes sind (in gewichteter Reihenfolge):

- Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch verhindern,
- Rettung von Menschen und Tieren,

- Löschangriff zu ermöglichen ,
- Sachwerte- und Umweltschutz.

Die Brandentwicklung, Brandausbreitung und das Einsatzgeschehen der Feuerwehren wird maßgeblich durch die Brandlasten (mobile und immobile Brandlasten) beeinflusst, wie

- Mobiliar,
- Lager- und Produktionsstoffe,
- Bauteiloberflächen usw.

Die wesentlichen Brandlasten ergeben sich damit aus den Einrichtungen (Mobiliar) und der Nutzung - nicht aus den verwendeten Baustoffen (Bauprodukten) und Bauarten. Diese bleiben in der Regel bauordnungsrechtlich unberücksichtigt (mit Ausnahme von DIN 18230-1). Der Anteil und die Wirksamkeit der immobilen Brandlasten resultieren aus den verwendeten Baustoffen der Trag- und Ausbaukonstruktionen. Die 'Wirksamkeit' der in einem Bauteil enthaltenen Brandlasten hängt vor allem ab von:

- dem konstruktiven Aufbau und Schichtung eines Bauteils,
- der Oberflächenausbildung und -behandlung,
- dem Verbund oder der Verbindung mit anderen Baustoffen.

Tab 1: Klassifizierung des Brandverhaltens (ohne Bodenbeläge)  
[Bauregelliste 2002/1]:

Bauaufsichtliche Benennungen	Zusatzforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Klasse nach DIN 4102-1
	Kein Rauch	Kein brenn. Abfallen/ Abtropfen		
Nicht brennbar	X	X	A1	A1
	X	X	A2 – s1 d0	A2
Schwerentflammbar	X	X	B, C – s1 d0	B1 <sup>1</sup>
		X	B, C – s3 d0	
	X		B, C – s1 d2	
Normalentflammbar		X	B, C – s3 d2	B2 <sup>1</sup>
			D – s3 d0	
			E	
			D – s3 d2	
Leichtentflammbar			E – d2	B3
			F	

<sup>1</sup> Angaben über hohe Rauchentwicklung und brennendes Abtropfen/Abfallen im Verwendbarkeitsnachweis und in der Kennzeichnung

Der zusätzliche Eintrag der immobilen Brandlasten durch die Tragkonstruktion von Holzhäusern ist nur dann von Bedeutung, wenn

1. diese im Brandfall auch thermisch umgesetzt werden können, also dem Feuer zugänglich sind oder die zeitliche Umsetzung der Brandlasten durch die immobilen Brandlasten beeinflusst wird und
2. diese immobilen Brandlasten in einem bedeutenden Verhältnis zu den mobilen Brandlasten stehen.

Wie die Untersuchungen in [3] belegen, ist das Risikopotential durch die konstruktionsspezifischen Brandlasten von Gebäuden in konsequente BA-Bauweisen von geringer Bedeutung. Die Brandlasten können in ausreichendem Maße durch nichtbrennbare Plattenwerkstoffe wie Gipsbrandschutzplatten (z.B. Ridurit, Fireblock, Fireboard) aber auch Gipskarton- und Gipsfaserplatten, gekapselt werden.

Für die Entstehung und Weiterleitung eines Brandes ist die Brennbarkeit eines Baustoffes von Bedeutung. Gemäß DIN 4102-1: 1998-05 werden

Baustoffe entsprechend ihrem Brandverhalten in verschiedene Baustoffklassen eingeteilt. Das europäische Klassifizierungssystem regelt zusätzlich zum Brandverhalten die Brandnebenerscheinungen. Jeweils drei Klassen mit Angaben zur Rauchentwicklung (smoke release rate: s1, s2, s3) und zur brennenden Abtropfbarkeit (d0, d1, d2) sind festgelegt.

In Tab. 2 wird die europäische Klassifizierung bzgl. des Feuerwiderstandes von Bauteilen verbindlich zugeordnet. Die Hauptkriterien für die Klassifizierung des Feuerwiderstandes sind die Tragfähigkeit (R), der Raumabschluss (E) und die Wärmedämmung (I); weitere Leistungskriterien können angefügt werden. Das bisherige deutsche Klassifizierungssystem, basierend auf DIN 4102,

und das europäische Klassifizierungssystem werden für eine Übergangszeit gleichwertig und alternativ anwendbar sein.

Tab 2: Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 bzw. -3 und ihre Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Benennungen [Bauregelliste 2002/1]:

Bauaufsichtliche Benennung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände	Doppelböden	Selbständige Unterdecken
	ohne Raumab.	mit Raumab.				
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) und EI 30 (i←o)	REI 30 ETK (f)	EI 30 (a→b) EI 30 (a→b) EI 30 (a↔b)
	[F 30]	[F 30]	[F 30]	[W 30]	[F 30]	[F 30 von oben nach unten] [F 30 von unten nach oben] [F 30 von beiden Richtungen]
	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) und EI 60 (i←o)		EI 60 (a→b) EI 60 (a→b) EI 60 (a↔b)
	[F 60]	[F 60]	[F 60]	[W 60]		[F 60 von oben nach unten] [F 60 von unten nach oben] [F 60 von beiden Richtungen]
feuerbeständig**	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) und EI 90 (i←o)		EI 90 (a→b) EI 90 (a→b) EI 90 (a↔b)
	[F 90]	[F 90]	[F 90]	[W 90]		[F 90 von oben nach unten] [F 90 von unten nach oben] [F 90 von beiden Richtungen]
Feuerwiderstandsdauer 120 Min.	R 120	REI 120	--	--		--
	[F 120]	(F 120)	--	--		--
Brandwand	--	REIM 90	EI M 90	--		--



Tab. 3: Erläuterungen der Klassifizierungskriterien und der zusätzlichen Angaben zur Klassifizierung des Feuerwiderstands nach DIN EN 13501-2 und -3

Herleitung des Kurzzeichens	Kriterium	Anwendungsbereich
R (Résistance)	Tragfähigkeit	zur Beschreibung der Feuerwiderstandsfähigkeit
E (Étanchéité)	Raumabschluss	
I (Isolation)	Wärmedämmung (unter Brandeinwirkung)	
W (Radiation)	Begrenzung des Strahlungsdurchtritts	
M (Mechanical)	Mechanische Einwirkung auf Wände (Stoßbeanspruchung)	
S (Smoke)	Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit (Dichtheit, Leckrate)	Rauchschutztüren (als Zusatzanforderung auch bei Feuerschutzabschlüssen), Lüftungsanlagen einschließlich Klappen
C... (Closing)	Selbstschließende Eigenschaft (ggf. mit Anzahl der Lastspiele) einschl. Dauerfunktion	Rauchschutztüren, Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
P	Aufrechterhaltung der Energieversorgung und/oder Signalübermittlung	Elektrische Kabelanlagen allgemein
l <sub>1</sub> , l <sub>2</sub>	unterschiedliche Wärmedämmungskriterien	Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
... 200, 300, ... (°C)	Angabe der Temperaturbeanspruchung	Rauchschutztüren
i→o i←o i↔o (in – out)	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Nichttragende Außenwände, Installations-schächte/-kanäle, Lüftungsanlagen/-klappen
a→b a←b a↔b (above – below)	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Unterdecken
f (full)	Beanspruchung durch „volle“ ETK (Vollbrand)	Doppelböden
v <sub>e</sub> , h <sub>o</sub> (vertical, horizontal)	für vertikalen/horizontalen Einbau klassifiziert	Lüftungsleitungen/-klappen
u/u (uncapped/) uncapped	Rohrende offen innerhalb des Prüfofens/Rohrende offen außerhalb des Prüfofens	Rohrabschottungen
c/u (capped/ uncapped)	Rohrende geschlossen innerhalb des Prüfofens/Rohrende offen außerhalb des Prüfofens	

### 3 Anforderungen und Möglichkeiten

Neu im Entwurf der Musterbauordnung in Deutschland (MBO) erfolgt eine Klassifizierung in fünf Gebäudeklassen. Insbesondere die Gebäudeklasse 4 für Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m des Fußbodens des obersten Geschosses und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m<sup>2</sup> eröffnet dem mehrgeschossigen Holzbau neue Wege.

Auf der Grundlage eines durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. (DGFH) finanzierten Forschungsvorhabens wurden im Entwurf

zur MBO – neu zusätzliche Bestimmungen aufgenommen, die Gebäude mittlerer Höhe in Holzbauweise betreffen. Die Forschungsergebnisse wurden in der „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFH HolzR)“ zusammengefasst. Mit der Feuerwiderstandsklasse F 60 (hochfeuerhemmend) in Verbindung mit dem ebenfalls neu eingeführten Kapselkriterium können so nun bis fünfgeschossige Gebäude in Holzbauweisen errichtet werden.





Abb. 3: Mode- und Bürozentrum KWS. Viergeschossiger Holzbau in Mischbauweise, Düsseldorf (Petzinka Pink Architekten)

Dabei kommt dem Konzept der „nichtbrennbaren Oberflächen“ eine neue Bedeutung zu. Bauteile in K-Bauweise (Bauteile mit einem Kapselkriterium oder auch "BA-Bauweise" genannt) ermöglichen es im Bauteilinneren bei gleichzeitiger Forderung nichtbrennbarer Oberflächen brennbare Baustoffe einzusetzen. Grundsätzlich zeichnen sich BA-Bauteile durch folgende Eigenschaften aus:

- brennbare Tragkonstruktion, z.B. Holz und Holzwerkstoffe [B-Baustoffe]
- nichtbrennbare Brandschutzbekleidung in Form von mehrlagigen Plattenwerkstoffen, z.B. Gipsplatten des Typs Ridurit, Fireboard, GKF [A-Baustoffe]

Durch ein solches Kapselkriterium wird die Anforderung an den Raumabschluss z.B. von Wohnungstrennwänden und eine definierte Tempera-

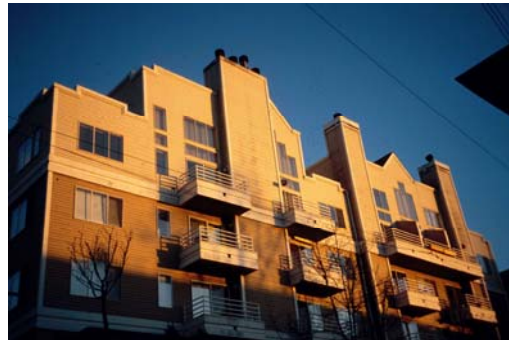


Abb. 4: Fünfgeschossige Wohnanlage in Holzbauweise, Seattle/USA (VHT)

turgrenze von 300 °C, die eine Entzündung von Holz und Holzwerkstoffen nicht zulässt über einen nahezu beliebigen Zeitraum von den Brandschutzbekleidungen erfüllt.

Dabei kapseln diese so genannten "brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen" die Brandlasten der Holzkonstruktion über einen definierten Zeitraum. Ein Entzünden der Holzkonstruktion wird dadurch ausgeschlossen. Der tatsächliche Feuerwiderstand im Sinne von DIN 4102 ist bei diesen BA-Bauteilen sogar höher als der bezeichnete Feuerwiderstand. So weisen Bauteile der Klasse F60-BA (auch als K60 bezeichnet) in der Regel einen Feuerwiderstand von mehr als F90 nach DIN 4102 auf.



Abb. 5: Fünfgeschossiges Wohn- und Bürogebäude in Holzbauweise, Portland/USA (VHT)

Alle Untersuchungen zeigen, dass der Aspekt mobiler Brandlasten von mehrgeschossigen Holzhäusern bei konsequenter Kapselung (BA-Bauweise) für den Personenschutz ohne Bedeutung ist und durch den nicht beeinflussbaren Anteil der mobilen Brandlasten bestimmt wird. Die Materialität einer Bauweise verliert in einer Risikoabschätzung noch stärker an Bedeutung, wenn die Toxizität der Verbrennungsprodukte der Einrichtungsgegenstände (mobile Brandlasten) in die Betrachtungen mit einbezogen wird.

#### 4 Brandschutzkonzept

Wie bereits erwähnt, repräsentieren die bauordnungsrechtlichen Einzelvorschriften an Bauteile und Baustoffe, an Brandabschnitte und Rettungswege ein vom Gesetzgeber gewünschtes Sicherheitsniveau und bilden damit „Standardbrandschutzanforderungen“.



Abb. 6: Mehrgeschossiger Holzbau in Vancouver/Kanada (VHT)

Um komplexere und anspruchsvollere Bauaufgaben mit Holz und Holzwerkstoffen zu ermöglichen, sind alternative Brandschutzkonzepte, die auf eine Sicherheitsbetrachtung für eine spezielle Bauaufgabe abgestimmt sind, notwendig. Dies geschieht durch ein individuell erstelltes Brandschutzkonzept. Ein erfolgreiches Beispiel ist die Landesvertretung des Landes Nordrhein-Westfalen (Abbildung). Dabei handelt es sich um ein viergeschossiges Gebäude mit 5.000 m<sup>2</sup> Nutzflä-

che mit verschiedenartigen Nutzungen. Konferenzbereiche, Wohnapartments, Gastronomie, Büros, Ausstellungsbereiche, Atrien, Wintergärten wurden in diesem besonderen Gebäude mit einem innovativen Brandschutzkonzept vereint.

#### 5 Fazit

Holzbauteile sind heute für bis zu fünfgeschossige Gebäude normaler und eine Vielzahl von Bauwerken besonderer Art und Nutzung aus brandschutztechnischer Sicht problemlos verwendbar. Ergänzend sind Abweichungen von den Verordnungen sowie Sonderbauvorschriften und daraus resultierend eine weitergehende Verwendung von Holz in Bauwerken möglich, wenn durch Brandschutzkonzepte nachgewiesen wird, dass die geforderten Schutzziele erreicht werden. Während der Planung und Ausführung ist in besonderem Maße zu berücksichtigen, dass die brandschutztechnische Wirksamkeit eines Bauteils in erheblichem Maße von der Detailausbildung abhängt. Eine undichte Rohrdurchleitung oder ein undichter Deckenanschluss können die Investition in die Brandschutzbekleidung eines hochwertigen Bauteils zunichte machen.



Abb. 7: Fünfgeschossige Wohnanlage in Holzbauweise, Seattle/USA (VHT)

Die Innovationspotentiale im mehrgeschossigen Holzbau sind noch immens und dessen Möglichkeiten scheinbar noch lange nicht erreicht. Ein gesellschaftlicher Fortschritt wäre es, wenn nicht

erst eines Tages ökologische Zwänge hierzu führen würden.



Abb. 8: Fünfgeschossige Wohnanlage in Holzbauweise, Lahti/ Finnland (VHT)

#### Quellen

- [1] Tichelmann, K. 'Ergebnisse der Grundlagenuntersuchung zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauart', Tagungsband zur 9. DGfH-Brandschutztagung, Würzburg, 2001
- [2] Winter, S., Schopbach, H.: Schutzregelungen für den Holzbau, Quadriga, Ausgabe 2/2004, Verlag Kastner Wolnach, 2004
- [3] Hosser, Tichelmann, Wesche, 'Theoretische und Experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise - Teil 1', IRB-Baufachliteratur, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 1998
- [4] Tichelmann, Pfau: Forschungsbericht "Planungs- und Konstruktionsrichtlinie mehrgeschossiger Holzhäuser", Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau, im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München 1997
- [5] Winter, S.: Informationsdienst Holz – holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 4, Folge 1 – Grundlagen des Brandschutzes. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V., München, 1997-08
- [6] Winter, S.: Informationsdienst Holz – holzbau handbuch, Reihe 3, Teil 4, Folge 3 – Brandschutz im Holzbau – gebaute Beispiele. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V., München, 2001-09
- [7] Tichelmann, Pfau: Trockenbauatlas, Rudolf Müller Verlag, Köln, 2007, 3. Auflage
- [8] Hausladen, Tichelmann: Ausbau-Atlas, Detail-Verlag, München 2008

## 11.3 Brandschutz

### Hochgefüllte Papiere als Holzfaserverbundwerkstoff – Potential im Brandschutz

**Andreas Hofenauer**

#### **1 Prinzip der Funktionalisierung von Papieren durch Füllstoffe**

Im klassischen Sinne haben anorganische Füllstoffe im Kontext Papiererzeugung die Funktion einer Kostenreduktion bzw. Eigenschaftsverbesserung des Papiers z.B. hinsichtlich Oberflächenglätte, Bedruckbarkeit oder Opazität. Dabei werden in der Regel Füllstoffgehalte von 40 Gew.-% nicht überschritten. Ein neuer Ansatz besteht nun darin, den Füllstoffgehalt drastisch zu steigern mit dem Ziel, das Eigenschaftsprofil des Papiers durch den eingesetzten Füllstoff zu definieren. Bei der Papiertechnischen Stiftung (PTS) ist in Kooperation mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg ein Verfahren entwickelt worden, Papiere bis zu 85 Gew.-% mit anorganischen Füllstoffen anzureichern. Dies bedeutet, dass im Papiergefüge mindestens doppelt soviel an Volumen vom Füllstoff eingenommen wird als vom Zellstoff. Der Füllstoff liegt so zu sagen „im Papierformat“ vor. Es entsteht ein Holzfaserbasierter Verbundwerkstoff mit vielseitigen Anwendungsoptionen. Werden für diesen Zweck Füllstoffe verwendet, die besondere Eigenschaften aufweisen wie zum Beispiel Sinterfähigkeit oder Adsorptionseigenschaften, eröffnen sich neue Wege in der Werkstofftechnik. Denn die hochgefüllten Papiere sind so beschaffen, dass sie trotz des hohen Füllstoffgehaltes papiertechnologisch geformt und so in typische Papierstrukturen wie z.B. Wellpappen- oder Wabenstrukturen überführt werden können. Diese papierabgeleiteten Strukturen sind ebenfalls in erster Linie durch die Eigenschaften der Füllstoffe geprägt. Bei der PTS sind zunächst als Füllstoffe keramische Pulver in diesem Zusammenhang eingesetzt worden. Die mit keramischen Füllstoffen angereicherten Papiere wurden zu Wellpappe und weiteren typischen Papierstrukturen verarbeitet und thermisch in Keramik umgewandelt. Darüber hinaus sind Kohlenstoffpulver (Ruß, Graphit und Aktivkohle)

in Papieren angereichert worden. Derartige Papiere zeigen durch die Füllstoffe interessante Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit oder hohe Adsorptionsleistung. Kombiniert mit papiertechnologischer Formgebung ergeben sich auch hier neuartige Anwendungsfelder für den Holzabgeleiteten Werkstoff Papier.

#### **2 Aktuelle Forschungsarbeiten**

Hochgefüllte und dadurch funktionalisierte Papiere bieten die Möglichkeit, papierspezifische Vorzüge wie kontinuierliche Fertigung, Flächigkeit, Mehrlagigkeit, Wickelbarkeit und vielfältige Formbarkeit anderen Werkstoffen an die Hand zu geben. Die PTS beschäftigt sich seit rund fünf Jahren mit der Thematik und betreibt Forschungsarbeiten konkret in den Bereichen adsorptive Papiere sowie Sinterpapiere (Keramik und Metall).

##### **2.1 Adsorptive Papiere**

Im Bereich adsorptive Papiere ist es das Ziel, Papiere bereits beim Papierherstellungsprozess hochgradig mit adsorptiven Füllstoffen wie zum Beispiel Aktivkohle, Silicagel oder Zeolithen anzureichern. Wird zum Beispiel ein Papier mit 70 Gew.-% Aktivkohle angereichert, liegen bei einer Grammatur des Papiers von 300 g/m<sup>2</sup> rund 210 g/m<sup>2</sup> Aktivkohle flächig organisiert vor. Wird ein derartiges Papier zum Beispiel zu Wellpappen verformt können so effektiv gut zugängliche Strukturen mit hoher Adsorptionskraft realisiert werden. Anwendungsfelder für diesen Ansatz liegen zum Beispiel im Bereich der Luftreinigung und Filtration.

##### **2.2 Sinterpapiere**

Die Nutzung von Holz-basierenden Rohstoffen für die Herstellung von Technischer Keramik ist seit rund acht Jahren Gegenstand von Forschungsprojekten. Unterschiedlichste Holzarten wurden im großen Umfang z.B. bei der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen / Nürnberg mittels

Pyrolyse und anschließender Infiltration mit Silizium in biomorphe SiSiC-Keramik überführt [1]. Da derartige Keramiken aufgrund der natürlichen Schwankungen der Holzeigenschaften für technische Anwendungen oft nicht ausreichend definierte Eigenschaften sowie keine zuverlässige Reproduzierbarkeit aufweisen, ist der Ansatz auf Holzwerkstoffe ausgeweitet worden. In einem Kooperationsprojekt zwischen der Holzforschung München (TU München) sowie dem Institut für Bauweisen und Konstruktionsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart konnte nachgewiesen werden, dass auf der Basis technischer Hölzer SiSiC-Keramiken mit handelsüblichen Eigenschaften hergestellt werden können [2]. Auch die Nutzung von Papierstrukturen für die Herstellung technischer Keramiken mit Leichtbaustruktur ist seit einigen Jahren Gegenstand von Forschungsprojekten. Hierbei werden Papierstrukturen mit keramischen Schlickern getränkt und thermisch in Keramik überführt [3,4]. Nachteilig hierbei ist, dass ein aufwendiger Infiltrationsprozess notwendig ist, um ausreichend präkeramische und / oder keramische Komponenten in das Papiergefüge einzubringen. Außerdem ist eine homogene Verteilung dieser Komponenten im Papiergefüge durch einen Infiltrationsvorgang nicht immer gewährleistet.

Die PTS hat in enger Kooperation mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen / Nürnberg im Rahmen öffentlicher Forschungsprojekte (Otto von Guericke) finanziert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in einem neuen Ansatz Spezialpapiere entwickelt, welche bereits beim Papierherstellungsprozess mit bis zu 85 Gew.-% mit keramischen Pulver angereichert wurden. Trotz des hohen Füllstoffgehaltes können die Papiere geformt und z.B. in Wellpappen- oder Wabenstrukturen überführt werden. Der so resultierende keramische Grün-

körper lässt sich im Anschluss über einen Sinterprozess in Keramik überführen [5], [6], [7].

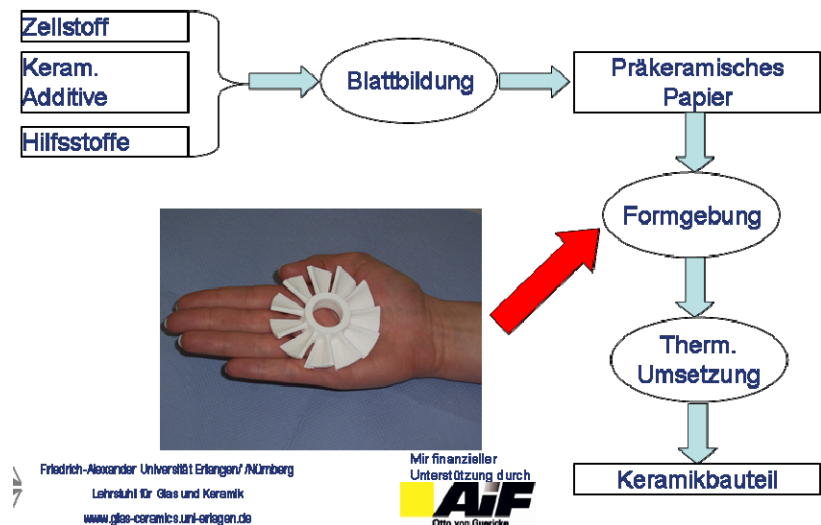


Abb. 1: Prinzip des keramischen Sinterpapiers

In Abb. 2 ist der Querschnitt eines keramischen Sinterpapiers mittels Rasterelektronenmikroskopie dargestellt. Man erkennt deutlich hell kontrastierend das Aluminiumoxidpulver. Dunkel sind die quer und längs geschnittenen Zellstofffasern zu erkennen. Es wird deutlich, dass das Mikrogefüge des Papiers durch den Füllstoff geprägt ist.

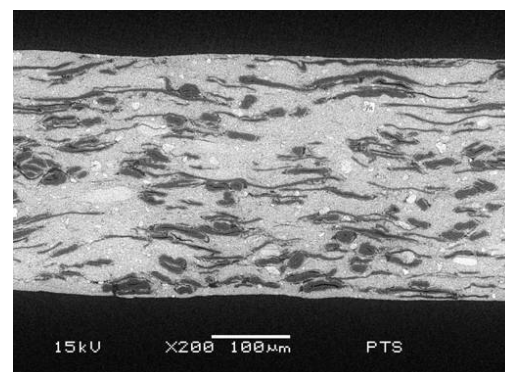


Abb. 2: Querschnitt eines Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Papiers, hell: Keramischer Füllstoff, dunkel: Zellstofffasern (Rasterelektronenmikroskopie, Rückstreumodus)



Die Verteilung des Füllstoffes ist dabei sowohl in Papierebene als auch senkrecht zu dieser hinreichend homogen. Eine ausreichende räumliche Nähe der keramischen Partikel zueinander sowie eine ausreichende Konnektivität der Pulverphase sind gewährleistet, so dass ein Versintern der Partikel möglich ist.

### 2.2.1 Thermische Umsetzung

Die thermische Umsetzung der keramischen Sinterpapiere verläuft analog zu klassischen keramischen Grünkörpern in Abhängigkeit des vorliegenden keramischen Systems. Bei dem angeführten Beispiel der mit Aluminiumoxid angereicherten Papiere erfolgt die thermische Umsetzung in zwei Schritten. Zunächst wird der Entbinderungsbrand durchgeführt. Hier werden bei einer Spitztemperatur von 800 °C die organischen Komponenten in erster Linie bestehend aus Zellstoff sowie Stärke und Latex oxidativ entfernt. Der entstehende sogenannte Braunling wird in einem zweiten Schritt bei einer Zieltemperatur von 1600 °C gesintert. Hierbei erfährt das Sintergut einen Schwund. Bei dem angeführten Beispiel liegt der lineare Sinterschwund zwischen 15 und 17 %.

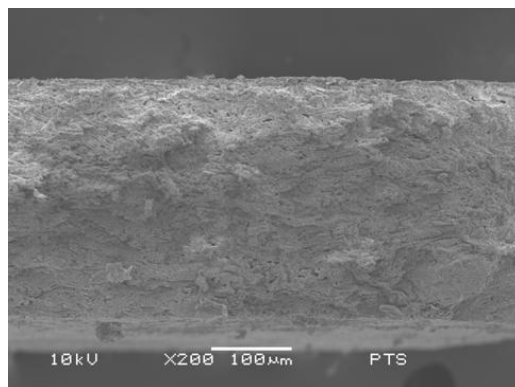


Abb. 3: Querschnitt eines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Papiers nach der Sinterung, Bruchfläche (Rasterelektronenmikroskopie)

Nach der thermischen Umsetzung liegt die ursprüngliche Papierstruktur als keramischer Werkstoff vor (Abb. 3), was unter anderem durch die für Keramik typischen Festigkeiten (z.B. Biegefestigkeit > 100 MPa) zum Ausdruck kommt.

### 2.2.2 Dimensionen der Formgebung

Dieses auf Holzfasern basierende Hybridmaterial ermöglicht den Brückenschlag zwischen Papiertechnologie und dem Werkstoff Keramik und hat zur Folge, dass eine Vielzahl papiertechnologischer Formgebungsverfahren für den Werkstoff Keramik nutzbar gemacht werden kann. Papierabgeleitete Strukturen sind ein gutes Beispiel für materialeffizienten Leichtbau. So funktionieren Wellpappenstrukturen nach dem Fachwerkbauprinzip. Mit wenig Material werden hohe Festigkeiten und hohe Steifigkeit erreicht. Neben Wellpappenstrukturen sind z.B. auch Wabengeometrien oder die Wickelhülsetechnologie für die Keramikherstellung von hohem Interesse. Was für die Papierindustrie Stand der Technik ist, stellt eine enorme Erweiterung von Geometrieoptionen im Bereich der Keramikherstellung dar, welche in erster Linie traditionell Umformung in Gestalt von Pressen, Spritzguss oder Extrusion betreibt.

Trotz des hohen Füllstoffgehaltes von über 80 Gew.-% können die entwickelten Spezialpapiere wie Papier gefaltet und geformt werden, bevor sie thermisch in den keramischen Werkstoff überführt werden. Ermöglicht wird dies durch das Zusammenwirken des Zellstofffasernetzwerkes mit Stärke und Latex, welche bereits bei der Papierherstellung in der Masse zugeführt werden. In Abb. 4 sind Beispiele papierabgeleiteter Keramikstrukturen dargestellt.

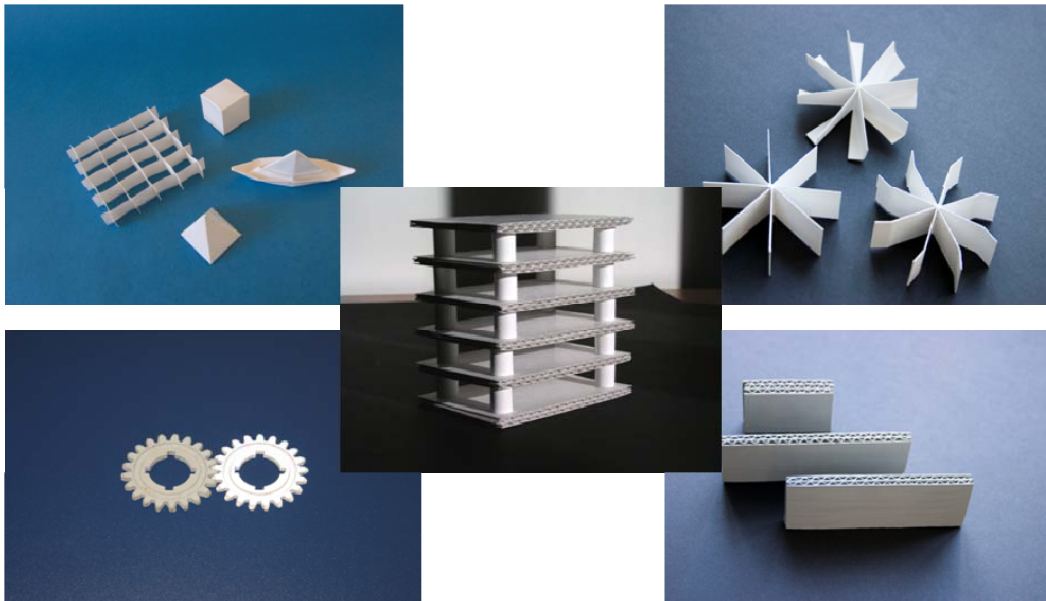


Abb. 4: Beispiele für papierabgeleitete Keramikstrukturen (PTS München)

### 2.2.3 Vorteilspotential für Keramikindustrie und Anwendungsoptionen

Der Ansatz der keramischen Sinterpapiere verfolgt das Ziel, ausgereifte etablierte Papiertechnologie (Herstellung, Beschichtung und Formgebung) der keramischen Industrie an die Hand zu geben.

Die papiertechnologischen Vorzüge kommen besonders bei solchen Anwendungsbereichen zum Tragen, bei welchen variable Formgebung oder Leichtbauweise verlangt wird. Anwendung wie im Bereich der Hochtemperaturtechnik, Filtration oder Brandschutz stehen hierbei im Vordergrund.

### 3 Option der Kombination mineralisch hochgefüllter Papiere mit Holzwerkstoffen – Brandschutz

Werden Papiere oder Pappen mit bis zu 85 Gew. % mit anorganischen Füllstoffen angereichert, ist die Brennbarkeit dieses Faserverbundes erheblich reduziert. Werden derartige Papiere z.B. in Form eines Wabenkerns mit ebenfalls schwer entflammaren Holzwerkstoffen kombi-

niert, könnten Leichtbaustrukturen höherer Brandschutzklassen für den Baubereich realisiert werden. Derzeitig wird von der PTS zusammen mit der Holzforschung München ein Projekt geplant, in welchem diese Materialkombination gezielt entwickelt werden soll.

### 3.1 Ziel des geplanten Vorhabens

Das Hauptziel des geplanten Projektes besteht in der Entwicklung von mineralisch angereicherter Holzwerkstoffplatten und Spezialpapieren, die nicht brennbar sind, und im zweiten Schritt in der Herstellung eines Verbund- Leichtbaustoffes (mit Waben- und Wellpappenstruktur) aus den beiden Komponenten. Zur Herstellung der Leichtbaustrukturen sollen papiertechnologische Formgebungs- und Verarbeitungsverfahren genutzt werden können.

Bei den Holzwerkstoffplatten besteht das Forschungsziel in erster Linie darin, bei ausreichend hohem Anteil mineralischer Komponenten einen dünnen plattenförmigen Werkstoff mit hohen Brandschutzeigenschaften, einer Dichte im Be-

reich von  $800 \text{ kg/m}^3$  bis  $900 \text{ kg/m}^3$  und ausreichender Festigkeiten zu entwickeln. Es wird in der Entwicklung des weiteren das Ziel verfolgt, dass bei der angestrebten industriellen Fertigung der Spezialholzwirkstoff weitgehend mit der ausgereiften Verfahrenstechnik gearbeitet werden kann, die heute bereits zur Produktion von mineralisch gebundenen Holzwirkstoffen genutzt wird. Damit soll ein Verbundprodukt mit speziellen Eigenschaften geschaffen werden, das derzeit im Brandschutzbereich in dieser Kombination noch nicht existiert.

Im Rahmen des geplanten Projektes soll erforscht werden, inwieweit sich aus einer Kombination von mineralisch gefüllten Holzwirkstoffen und Papieren nicht brennbare und schwerentflammbare Leichtbaupaneele erzeugen lassen, die Vorteile im Hinblick auf die Anforderungen an Brandverhalten, Festigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie Preis besitzen. Die Arbeiten sollen zu einem Baustoff führen, dessen Masse deutlich unter denen der bisher üblichen Paneele (Blech und mineralisch gebundene Holzwirkstoffplatten z.B. abgehängte Decken) liegt und die somit für die Herstellung leichter Tragkonstruktionen verwendbar wären.

### 3.2 Forschungsbedarf

Mineralisch gefüllte Platten mit Holzfaserarmierung im Dickenbereich von 1 bis 3 mm (und auch dicker) werden bisher nicht produziert. Daher besteht grundlegender Forschungsbedarf bei der Herstellung von Platten bestehend aus mineralischen Füllstoffen, anorganischen sowie organischen Klebstoffsystemen und Holzfasern. Rezepturen sind zu entwickeln, mit denen derartige Holzfaserkompositwerkstoffe hergestellt werden können, die höchste Brandschutzanforderungen bei ausreichenden Festigkeiten erfüllen. Im Wesentlichen muss untersucht werden, bei welchem Auffaserungsgrad des Holzfaserstoffes, bei welcher Dichteverteilung und bei welcher Korngrö-

ßenstruktur des mineralischen Füllstoffes der beste Armierungseffekt mit den Holzfasern zu erreichen ist. Es sind Klebstoffsysteme zu untersuchen und Mischverfahren zu entwickeln, die die armierende Wirkung der Holzfaser steigern, wodurch eine Reduzierung der Plattendichte erreicht werden kann. Die Dichteverteilung über den Plattenquerschnitt (das sogenannte Dichteprofil) ist so zu gestalten, dass die äußeren Schichten der Platte stärker verdichtet sind als die Kernschicht. Des Weiteren ist zu evaluieren, inwieweit in den Holzfaserstoff oder in das organische Klebstoffsystem Brandschutzsalze (Bor- und Ammoniumsalze) eingebracht werden können, die die Brandeigenschaften verbessern und die mechanischen Eigenschaften nicht verschlechtern.

Die entwickelten mineralisch hochgefüllten Papiere und Platten müssen zu einem Leichtbaustoff zusammengefügt werden. Forschungsbedarf besteht bei der Verklebung der geformten Papierstrukturen (z.B. Waben- und Wellpappenstruktur) mit den Platten. Es werden Klebstoffsysteme auf anorganischer (z.B. Wasserglas) und organischer Basis (z.B. Reaktionsklebstoffe wie Epoxidharz mit Siliciumpulver, Polyurethan) untersucht, um an den Kontaktlinien zwischen Platten und den Papierstrukturen eine tragfähige Verklebung zu schaffen, die die Herstellung eines biegesteifen Verbund- Leichtbaustoffes möglich macht. Die Klebstoffsysteme sind so zu modifizieren (z.B. Gelierzeit, Viskosität), dass sie sich für den flächigen Auftrag oder für das klebstoffsparende Aufbringen auf die linienförmigen Kontaktflächen der Spezialpapiere eignen.

### 3.3 Leichtbaustoffe im Brandschutz Anwendungsbereiche und Anforderungen

#### 3.3.1 Anwendungsbereiche

Leichtbaumaterialien werden im Brandschutz vor allem als nicht tragende innere Trennwände oder Paneele für abgehängte Decken (Unterdecken) eingesetzt.



Nicht tragende innere Trennwände werden mit und ohne nachgewiesenen Feuerwiderstand angeboten. Trennwände werden in der Baustoffklasse DIN 4102, Teile A1 und A2, in der Qualität F90 angeboten, wie sie in Flucht- und Rettungswegen größerer Gebäude gefordert werden.

Abgehängte Decken sind unterhalb der Rohdecke in Gebäuden angebracht und erzeugen einen darüber liegenden Hohlraum. Dieser wird für verschiedenste elektrische, Lüftungstechnische und hydraulische Installationen verwendet. Unterdecken bestehen meist aus einer metallenen Rahmenkonstruktion, die an den angrenzenden Wänden und/oder über sog. Abhänger an der Rohdecke befestigt ist. Diese Rahmenkonstruktion ist so gestaltet, dass in ihre Aussparungen Deckenpaneele eingelegt oder eingehängt werden können.

Unterdecken sind in der Produktnorm DIN EN 13964 inkl. der verschiedenen Prüfverfahren genormt. Man unterscheidet Unterdecken mit und solche ohne Feuerwiderstand.

### 3.3.2 Anforderungen

Brandschutzmaterialien müssen leicht, temperaturbeständig und vor allem nicht brennbar sein. Sie müssen außerdem in der Regel mechanische Stabilität aufweisen, gut verarbeitbar und preiswert sein. Sie dürfen die Gesundheit nicht beeinträchtigen (z.B. durch die Abgabe gasförmiger Stoffe oder gesundheitsschädlicher Stäube). Oft ist zusätzlich eine Schallschutzfunktion erwünscht (vor allem bei Deckenpaneelen).

Nichttragende Wände können ortsfest oder verschieblich sein. Die Bauregelliste fordert den rechnerischen und/oder versuchstechnischen Nachweis nach DIN 4103-1. Dabei müssen verschiedene Belastungen wie z.B. Konsollasten und Linienlasten simuliert werden

### 3.4 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Durch Beplankung der mineralisch gefüllten Papierstrukturen (z.B. Waben- und Wellpappenstruktur) mit den mineralisch gefüllten Holzwerkstoffplatten hätten die Hersteller von mineralischen gebundenen Holzwerkstoffen die Möglichkeit, ihre Produktpalette durch einen leichten Baustoff hoher Brandschutz-Klassifizierung zu erweitern. Die heute gebräuchlichen Brandschutzplatten (Gipsfaser- und Gipsspanplatte, Zementspanplatte etc.) liegen in der Dichte im Bereich von 1.150 kg/m<sup>3</sup> bis 1.500 kg/m<sup>3</sup>. Die weiterführenden Erkenntnisse von der Materialstruktur von mineralischen Werkstoffen mit Armierung durch organische Faser, ist die Basis für die Entwicklung neuer Baustoffe für den Brandschutz.

Im Gegensatz zu diesen schweren mineralisch gebundenen Holzwerkstoffen könnten die Hersteller dieser Platten mit der Entwicklung der angestrebten Verbundplatte einen leichten Baustoff mit hoher Brandschutz-Klassifizierung (Klasse A, nicht brennbar) an die Hand bekommen, der weitgehend auf den vorhandenen Anlagen produziert werden kann.

### 4 Ausblick

Die hier geschilderten Materialentwicklungen im Bereich der Holzfaser basierenden Verbundwerkstoffe erfolgten in erster Linie im Rahmen vorwettbewerblicher Forschungsprojekte. Ziel ist es hier, auf der Basis dieser Projekte konkrete Produktoptionen zu identifizieren und Produktentwicklungen in Kooperationen mit der Anwenderindustrie durchzuführen. Es zeigt sich dabei immer wieder, das Holz zwar ein alter, aber auch ein hochmoderner Werkstoff ist, der auch als Komponente in Verbundwerkstoffen großes Potential beweist.

**Quellen**

- [1] P. Greil, "Biomorphous Ceramics from Lignocellulosics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 21, 105-18 (2001)
- [2] A. Hofenauer, O. Treusch, F. Tröger, G. Wegener, J. Fromm, M. Gahr, J. Schmitt, W. Krenkel, „Dense reaction infiltrated Silicon/Silicon Carbide ceramics derived from wood based composites," *Adv. Eng. Mater.* 5, No. 11: 794 – 799 (2003)
- [3] H. Sieber, H. Friedrich, Z. Zeschky, and P. Greil, "Light-Weight Ceramic Composites from Laminated Paper Structures," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 21, 129-43 (2000)
- [4] H. Sieber, A. Kaindl, D. Schwarze, J.P. Werner, and P. Greil, "Light-Weight Cellular Ceramics From Biologically-Derived Preforms," *Cerm. Forum Int.*, 77 [1,2] 21-5 (2000)
- [5] O. Rusina, R. Kirmeier, A. Molinero, P. Greil, H. Sieber. „Manufacturing of highly porous SiC-ceramics from Si-filled cellulose fibre papers," *Proceeding C17, 106th Annual Meeting, American Ceramic Society 2004*
- [6] H. Windsheimer, N. Travitzky, A. Hofenauer, and P. Greil, "Laminated Object Manufacturing of Pre ceramic-Paper-Derived Si-SiC Composites," *Adv. Mater.*, 19 [24] 4515-9 (2007)
- [7] N. Travitzky, H. Windsheimer, F. Fey, P. Greil, "Pre ceramic Paper-Derived Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, 91 [11] 3477 – 3492 (2008)



## 11.3 Brandschutz

### Mehrschnittige Stabdübelverbindungen und Brandschutz

**Carsten Erchinger**

#### **Kurzfassung**

Im Ingenieurholzbau wird das Verhalten eines Tragwerkes häufig durch den Tragwiderstand der Verbindungen bestimmt. Hochleistungsfähigen Verbindungen mit hohem Tragwiderstand kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Für Holzbauwerke, an welche Brandschutzanforderungen gestellt werden, sind zuverlässige und realitätsnahe Berechnungsmodelle für die Bemessung von Verbindungen im Brandfall wichtig, da Verbindungen in der Regel dieselbe Feuerwiderstandsdauer wie die eigentlichen Holzbauteile aufweisen müssen. Häufig werden im Verbindungsbereich Stahlelemente eingesetzt, welche sich im Brandfall aufgrund ihrer geringen Masse und hohen Wärmeleitfähigkeit schnell erwärmen und Wärme ins Holz eintragen. Folglich ist mit steigenden Temperaturen im Verbindungsquerschnitt eine Abnahme der Steifigkeit und Festigkeit von Stahl und Holz zu beobachten, was zu einer Reduzierung des Tragwiderstandes führt.

Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit innen liegenden Stahlblechen und durchlaufenden Stabdübeln gehören zu den leistungsfähigsten Verbindungen im konstruktiven Ingenieurholzbau und werden häufig eingesetzt. Allerdings wurde ihr Verhalten im Brandfall bislang noch nicht systematisch untersucht. Deshalb wurde am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich umfangreiche Versuche zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen bei Raumtemperatur und im Brandfall durchgeführt, welche die Grundlage für das entwickelte Berechnungsmodell im Brandfall bildeten.

#### **1 Einleitung**

Die derzeit gültigen Brandschutzvorschriften in der Schweiz erlauben Holzbauwerke mit bis zu 6 Geschossen. Der damit verbundene vermehrte

Einsatz der ökologischen Holzbauweise stellt hohe Anforderungen an den Brandschutz, da Holz im Gegensatz zu anderen Baustoffen ein brennbares Material ist. Dies bedeutet, dass verschiedene, aus der Brennbarkeit des Holzes entstehende Fragestellungen bezüglich Entwurf, Bemessung und Ausführung von Holzkonstruktionen genauer zu untersuchen sind. Damit soll das hohe Sicherheitsniveau auch für den mehrgeschossigen Holzbau beibehalten und die Ziele des Brandschutzes nicht beeinträchtigt werden.

Ein besonderes Kapitel bei der Brandschutzbemessung von Holzbauwerken stellen Verbindungen dar. Durch die Vielzahl an Verbindungsarten mit in der Regel metallischen Verbindungsmitteln (Stabdübel, Bolzen, Nägel, Schrauben, Dübel besonderer Bauart, Gewindestangen etc.) ist ein einheitliches Bemessungsverfahren im Brandfall quasi nicht möglich. Nicht nur die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes des Holzabbrandes (Verringerung des Ausgangsquerschnittes) spielt eine wesentliche Rolle, sondern auch das thermische Verhalten der Stahlelemente sowie das Zusammenwirken von Holz und Stahl bei hohen Temperaturen. So wird in Brandversuchen an Holzbauteilen mit metallischen Verbindungsmitteln häufig ein erhöhter örtlicher Abbrand im Bereich der Stahlelemente beobachtet, was auf den Wärmeintrag der Stahlelemente ins Holz zurückzuführen ist [1].

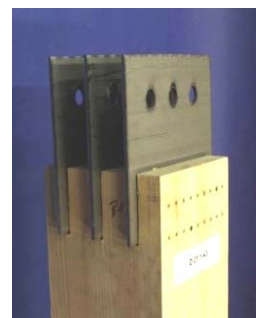


Abb. 1: Sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung

Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit innen liegenden Stahlblechen und durchlaufenden Stabdübeln finden bei hoch beanspruchten Knotenpunkten Anwendung, wie beispielsweise bei Fachwerkträgern. Die Kombination von Holz und Stahlelementen führt unter Einhaltung von normierten Mindestabständen der Verbindungsmittel nicht nur zu einem duktilen Versagensverhalten (Ausbildung von plastischen Deformationen in den Stabdübeln), sondern weist auch durch die innen liegenden Stahlbleche hinsichtlich des Brandverhaltens grosse Vorteile auf. Die durch den Abbrand des Seitenholzes entstehende Holzkohleschicht schützt die innen liegenden Stahlbleche vor einer direkten Brandbeanspruchung, so dass hohe Feuerwiderstandsdauern (ohne zusätzliche Brandschutzbekleidungen) erreicht werden können.

## 2 Brandverhalten Stabdübelverbindungen

### 2.1 Brandversuche

Im Rahmen des Teilprojektes B5 „Verbindungen der Feuerwiderstandsklassen R30 und R60“, welches sich in das von der Lignum geführte For-

schungs- und Informationsprojekt „Brandsicherheit und mehrgeschossiger Holzbau“ [2] eingliedert, wurde das Brandverhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit umfassenden experimentellen Untersuchungen analysiert. Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht zum Versuchsprogramm. Im experimentellen Teil wurden für verschiedene Verbindungsgeometrien sowohl der Tragwiderstand bei Raumtemperatur  $F_u$  als auch die Feuerwiderstandsdauer unter vierseitiger ISO-Normbrandbeanspruchung ermittelt [1]. Die Versuchskörper der Brandversuche wurden in der Regel mit 30 % des mittleren Tragwiderstandes aus fünf Zugversuchen bei Raumtemperatur beansprucht. Es zeigte sich, dass die Stahlelemente einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Querschnitt haben. Mit Hilfe eines Laserscanners wurden anschließend die abgebrannten Versuchskörper vermessen, womit die Restquerschnitte als dreidimensionale Objekte erfasst und dargestellt werden konnten. Insgesamt wurden 18 Brandversuche mit konstanter Zugbeanspruchung von 30 % des mittleren Tragwiderstandes bei Raumtemperatur durchgeführt.

Tab 1: Übersicht zu den durchgeführten Kalt- und Brandversuchen

Art	Anzahl Versuche	Art	Beanspruchung [kN]	Mittlere Feuerwiderstandsdauer [Min.]	Bemerkungen
D01.1	5	Kalt	Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche (5mm), 2x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 01.1} = 145$	33.0	
	2	Brand	$0.15 \cdot F_{u,D 01.1} = 72$	36.0	
	2	Brand	$0.075 \cdot F_{u,D 01.1} = 36$	41.0	
D01.2	5	Kalt	Bruch	---	280x280mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 2x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 01.2} = 173$	73.0	
D01.3	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 01.1} = 145$	64.5	s. Verbindung D01.1; Verbindungsbereich mit Dreischichtplatten (27mm) verkleidet
D01.4	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 01.1} = 145$	60.5	s. Verbindung D01.1; Verbindungsbereich mit Gipsfaserplatten (15/18mm) verkleidet
D02.1	5	Kalt	Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 3x9 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 02.1} = 188$	31.0	
D03.1	5	Kalt	Bruch	---	200x200mm (GL24h), 3 Stahlbleche, 3x3 Stabdübel (d=6.3mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 03.1} = 69$	32.5	
D04.1	5	Kalt	Bruch	---	200x200mm (GL24h), 2 Stahlbleche, 2x4 Stabdübel (d=12mm)
	2	Brand	$0.3 \cdot F_{u,D 04.1} = 124$	34.5	

In der Regel zeigte sich im Brandfall ein Versagen der Verbindungen auf Lochleibung ohne Deformation der Stabdübel, was in der Literatur allgemein als Versagensmodus I bezeichnet wird [3] (Abb. 2 Mitte). Durch den Abbrand der Seitenhölzer geht die Einspannwirkung der Stabdübel verloren. Die hohen Temperaturen am direkten Übergangsbereich zwischen Stabdübel und Holz führen zu einer Ovalisierung der Stabdübellöcher (Abb. 2 unten).

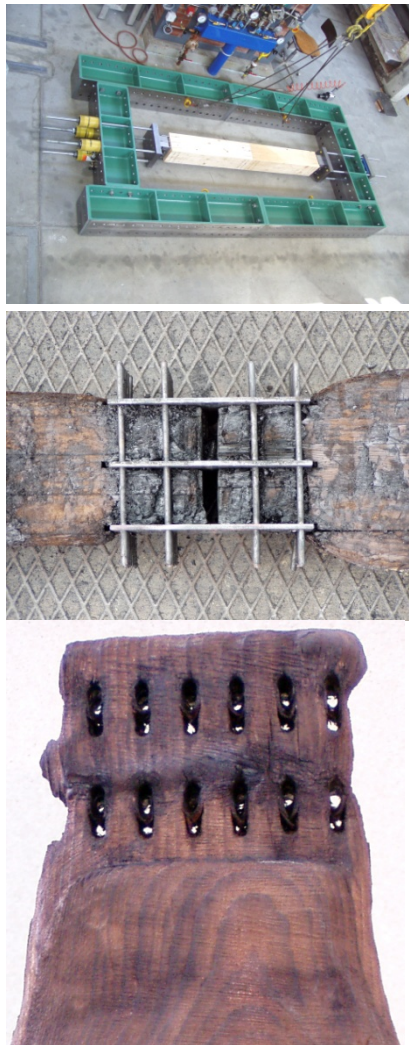


Abb. 2: Versuchsanordnung der Brandversuche (oben), Versagensmodus I (Mitte) und Ovalisierung der Stabdübellöcher (unten)

## 2.2 Thermische FE-Untersuchungen

In Ergänzung zu den Brandversuchen wurden transient thermische Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Softwarepaket Ansys Workbench [4] unter Berücksichtigung der physikalischen und thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten durchgeführt, um den Einfluss der massgebenden Parameter, wie beispielsweise Stabdübeldurchmesser, Seitenholzdicke, Anzahl Bleche etc. auf den Abbrand zu untersuchen. Holz als brennbares Material zersetzt sich bei hohen Temperaturen unter Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen (Pyrolyse). Da die Effekte der Pyrolyse (Feuchte- und Massentransport, Risse in der Holzkohle etc.) von herkömmlicher Software nicht unterstützt werden, erfolgten die FE-Berechnungen durch Anpassung der thermischen Materialeigenschaften des Holzes (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Abnahme der Rohdichte) an Versuchsergebnisse. Der Vergleich zwischen numerisch und in Versuchen von König [5] ermittelten Temperaturverläufen für unterschiedliche Holztafeln eines Holzbauteiles zeigt Abb. 3 oben. Die gute Übereinstimmung, insbesondere im festigkeitsrelevanten Temperaturbereich bis etwa 300 °C (Abbrandgrenze), bestätigt die Annahmen des verwendeten thermischen Materialmodells für Holz. Für Stahl sind die thermischen Eigenschaften gut bekannt und können der Literatur entnommen werden. Vergleiche zwischen den in den Brandversuchen gemessenen und numerisch ermittelten Temperaturen sind in [6] zu finden.

Neben der Übereinstimmung von gemessenen und numerisch ermittelten Temperaturverläufen im Querschnitt ist die korrekte Erfassung des tragfähigen Restquerschnittes wichtig. Reicht der Restquerschnitt nicht mehr aus beziehungsweise sind die Temperaturen im Restquerschnitt zu hoch, versagt die Verbindung. Effekte aus Temperaturüberlagerungen an den Ecken lassen sich dabei numerisch genauso gut abbilden wie der

erhöhte Einbrand am direkten Übergangsbereich zwischen Stahlelementen und Holz (Abb. 3 unten rechts).

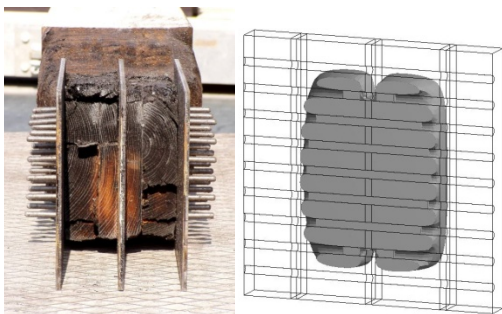
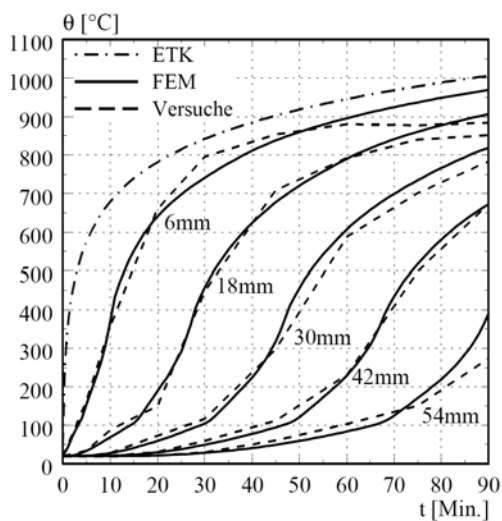


Abb. 3: Vergleich zwischen numerisch und experimentell [5] ermittelten Temperaturverläufen in einem Holzbauteil für unterschiedliche Holzthiefen (oben); Vergleich zwischen experimentell und numerisch ermitteltem Restquerschnitt (unten) am Beispiel einer getesteten sechsschnittigen Verbindung beim Erreichen der Feuerwiderstandsdauer (Numerisch festgelegte Abbrandgrenze: 300 °C)

### 3 Bemessungsverfahren

#### 3.1 Bemessungsverfahren für Holzbauteile im Brandfall

Die thermischen FE-Untersuchungen bildeten die Grundlage für das entwickelte Bemessungskonzept, welches in Anlehnung an die für die Bemessung

von Holzbauteilen im Brandfall empfohlene „Methode mit reduziertem Querschnitt“ gemäß EN 1995-1-2 [7] für mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen weiterentwickelt wurde. Die „Methode mit reduziertem Querschnitt“ sieht vor, dass aus dem Restquerschnitt ein ideeller Restquerschnitt durch Reduzierung der brandbeanspruchten Flächen um den Wert  $k_0 \cdot d_0$  ermittelt wird. Es wird angenommen, dass das Material nahe der Abbrandgrenze mit der Schichtdicke  $k_0 \cdot d_0$  keine Festigkeit und Steifigkeit aufweist, während die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des verbleibenden Querschnittes als unverändert angenommen werden. Der Tragwiderstand im Brandfall kann folglich mit den Festigkeits- und Steifigkeitswerten bei Raumtemperatur ermittelt werden ( $k_{mod,fi}=1.0$ ). Der Wert  $k_0 \cdot d_0$  wird für eine Brandeinwirkungsdauer zwischen 20 und 60 Minuten konstant mit 7 mm angenommen.

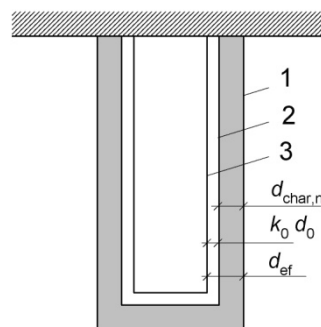


Abb. 4: Methode mit reduziertem Querschnitt

Legende:

- 1 Anfängliche Oberfläche des Bauteils
- 2 Grenze des Restquerschnittes
- 3 Grenze des ideellen Querschnittes

#### 3.2 Vereinfachtes Bemessungsverfahren für mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall

Mit Hilfe der numerischen Untersuchungen war es möglich, eine Parameterstudie der relevanten Einflussgrößen durchzuführen und ein Bemessungsverfahren im Brandfall abzuleiten. Die Grundlage bildet der in den Brandversuchen be-

obachtete Versagensmodus I (Lochleibungsversagen im Holz). Das Berechnungsmodell verwendet den nicht-linearen und temperaturabhängigen Verlauf der Lochleibungsfestigkeit und betrachtet räumliche Temperaturfelder zwischen zwei in Beanspruchungsrichtung hintereinander liegend angeordneten Stabdübeln. Damit wird jeder Stabdübel entsprechend seiner Lage im Querschnitt differenziert betrachtet.

Zur Ermittlung des Tragwiderstandes von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen bei vierseitigem Normbrand wird in Anlehnung an die „Methode mit reduziertem Querschnitt“ (vgl. Kap. 3.1) gemäß EN 1995-1-2 der verbleibende Restquerschnitt  $A_r$  (Werte  $d_{char,s}$  und  $d_{char,o}$ ) und daraus der ideelle Restquerschnitt  $A_{ef}$  (Wert  $d_{red}$ ) ermittelt (Abb. 5). Zur Vereinfachung wird seitlich (Index s) und oberseitig (Index o) derselbe Wert  $d_{red}$  abgezogen, so dass folglich gilt:

$$\begin{aligned} d_{ef,s} &= d_{char,s} + d_{red} && \text{bzw.} \\ d_{ef,o} &= d_{char,o} + d_{red} && [\text{mm}] \end{aligned} \quad (1)$$

Der Bemessungswert des Tragwiderstandes im Brandfall für eine Zugbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ergibt sich nach Gleichung (2). Der Wert  $k_{fi}$  berücksichtigt den im Brandfall zulässigen 20%-Fraktilwert einer Steifigkeits- oder Festigkeitseigenschaft gemäß EN 1995-1-2 und beträgt für auf Abscheren beanspruchte Verbindungen mit Seitenteilen aus Holz  $k_{fi} = 1.15$ .

$$\begin{aligned} R_{d,t,fi} &= A_{ef} \cdot f_{t,0,k} \cdot k_{fi} \quad [\text{N}] \\ &\text{mit } A_{ef} \quad [\text{mm}^2] \\ f_{t,0,k} &= 16,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (GL24h)} \end{aligned} \quad (2)$$

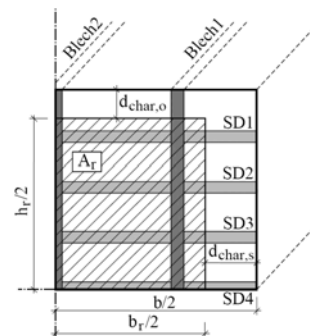
Das entwickelte vereinfachte Bemessungsverfahren für mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen setzt die Einhaltung der folgenden Randbedingungen voraus:

- Die normierten, minimalen Rand-, End- und Zwischenabstände der Verbindungsmittel für die Bemessung bei Raumtemperatur gemäß

EN 1995-1-1 [8] sind auch für die Bemessung im Brandfall gültig (Ausnahme: Zwischenabstand  $a_1=7d$  anstelle  $a_1=5d$ ). Kleinere Abstände sind im Brandfall ungünstig, für grössere Abstände liegen die Berechnungen auf der sicheren Seite. Es wird eine Zugbeanspruchung parallel zur Faser vorausgesetzt.

- Die Mindestbreite der Verbindungen beträgt  $b \geq 160\text{mm}$ .
- Die zugrunde gelegten Festigkeitsklassen richten sich nach der Anzahl an hintereinander liegend angeordneten Stabdübelreihen  $n$ . Es wird die Festigkeitsklasse GL24h vorausgesetzt. Für hochbeanspruchte Verbindungen mit drei Stabdübelreihen ( $n=3$ ) muss zur Vermeidung eines Holzbruches die Festigkeitsklasse GL36h verwendet werden.

Verbleibender Restquerschnitt  $A_r$



Ideeller Restquerschnitt  $A_{ef}$

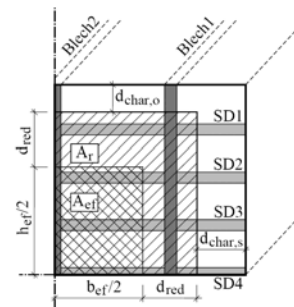


Abb. 5: Vorgehensweise zur Ermittlung des Tragwiderstandes von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall, dargestellt am Viertelsquerschnitt einer Verbindung (SD= Stabdübel)



Für mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen kann der seitliche Abbrand  $d_{char,s}$  analytisch gemäß Abb. 6 für die Feuerwiderstandsdauern von 30 Minuten (oben) und 60 Minuten (unten) in Abhängigkeit der eindimensionalen Abbrandrate für Nadelholz  $\beta_0=0.65$  mm/Min. ermittelt werden. Für eine geforderte Feuerwiderstandsdauern von 60 Minuten sind allseitige Holzaufdickungen (Vorhaltemasse  $c_s$  bzw.  $c_o$ ) vorzusehen.

$b < 200\text{mm} \rightarrow$  Vorhaltemasse  $c_s = c_o = 45\text{mm}$   
 $b \geq 200\text{mm} \rightarrow$  Vorhaltemasse  $c_s = c_o = 40\text{mm}$

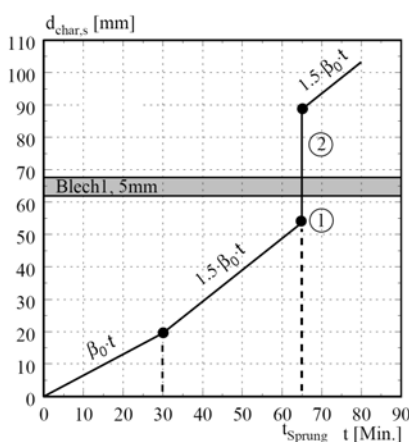
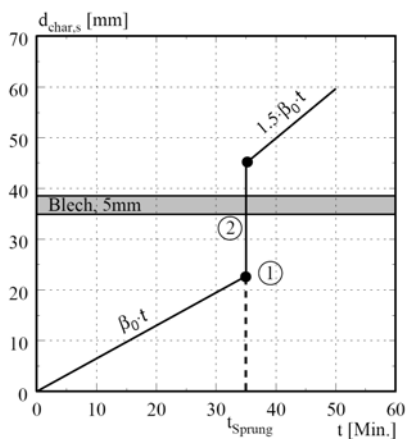


Abb. 6: Ermittlung des seitlichen Abbrandes von zwei-, vier- und sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten (oben) bzw. 60 Minuten (unten)

Der Verlauf des seitlichen Abbrandes wird durch zwei wesentliche Punkte bestimmt: die Sprungzeit  $t_{\text{Sprung}}$  (Punkt 1 in Abb. 6) und die Sprunghöhe des Abbrandes vom Seiten- ins Mittelholz  $d_{char,Sprung}$  (Punkt 2 in Abb. 6). Die Bestimmungsgleichungen sind für die unterschiedlichen Stabdübel Durchmesser von der Seitenholzdicke abhängig und können für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten gemäß den Gleichungen (3)-(10) ermittelt werden. Den Gleichungen liegt die Auswertung einer Vielzahl von baupraktisch üblicherweise verwendeten Verbindungsgeometrien zugrunde [9]. Die Bestimmungsgleichungen für 60 Minuten sowie für weitere Feuerwiderstandsdauern sind in [6] zu finden.

### Punkt 1: Ermittlung der Sprungzeit $t_{\text{Sprung}}$

- Vierschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung:

$d=6-8\text{mm}$ :	$t_{\text{Sprung}} = 0.4t_1 + 14$	[Min.]	mit	$30 \leq t_1 \leq 70\text{mm}$	(3)
$d=10-14\text{mm}$ :	$t_{\text{Sprung}} = 0.5t_1 + 14$	[Min.]	mit	$30 \leq t_1 \leq 70\text{mm}$	(4)
$d=16-20\text{mm}$ :	$t_{\text{Sprung}} = 0.6t_1 + 13.5$	[Min.]	mit	$30 \leq t_1 \leq 70\text{mm}$	(5)

- Sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung

$d=6-8\text{mm}$ :	$t_{\text{Sprung}} = 0.4t_1 + 16$	[Min.]	mit	$30 \leq t_1 \leq 70\text{mm}$	(6)
$d=10\text{mm}$ :	$t_{\text{Sprung}} = 0.45t_1 + 18.5$	[Min.]	mit	$30 \leq t_1 \leq 70\text{mm}$	(7)

### Punkt 2: Ermittlung des Abbrandsprunges

$d_{char,Sprung}$

$d_{char,Sprung} = 0.8t_1 - 7$	[mm]	für	$b \leq 240\text{mm}$	(9)
$d_{char,Sprung} = 0.8t_1 - 11$	[mm]	für	$b > 240\text{mm}$	(10)

Der ober- / unterseitige Abbrandverlauf  $d_{char,sr}$ , welcher mittig zwischen den Stahlblechen ermittelt wird (Abb. 5), kann unabhängig von der Brandeinwirkungsdauer konstant mit dem 1,1-fachen der eindimensionalen Abbrandrate  $\beta_0$  ermittelt werden (Abb. 7).

Zur analytischen Ermittlung des ideellen Restquerschnittes  $A_{ef}$  wurde der Einfluss der Geometrie (Verhältnis der Ausgangsbreite  $b$  zur Breite des verbleibenden Restquerschnittes  $b_r$ ), der Brandeinwirkungsdauer und der Anzahl an hintereinander liegend angeordneten Stabdübelreihen  $n$  auf den Wert  $d_{red}$  jeweils getrennt analysiert und anschließend zu endgültigen Bestimmungsgleichungen zusammengefasst. Die Bestimmungsgleichungen für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten zeigen die Gleichungen (11)-(14).

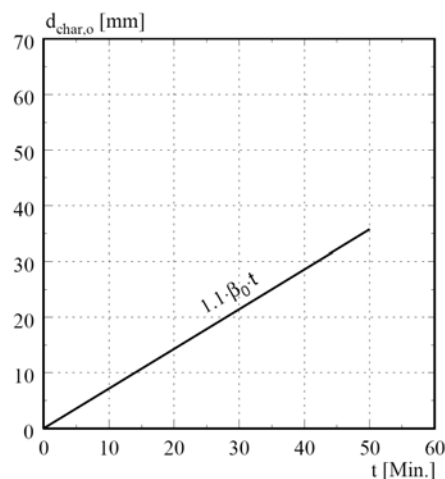


Abb. 7: Ermittlung des ober-/unterseitigen Abbrandes von zwei-, vier- und sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen für eine Feuerwiderstandsdauer bis 60 Minuten

Feuerwiderstandsdauer 30 Minuten

- Vierschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung

$$n=1: d_{red} = -60(b/b_r) - 0.1d + 126.5 \quad [\text{mm}] \quad \text{mit } 8 \leq d \leq 16\text{mm} \quad (11)$$

$$n=2,3: d_{red} = -40(b/b_r) + n(2 - 0.5d) + 94 \quad [\text{mm}] \quad \text{mit } 8 \leq d \leq 16\text{mm} \quad (12)$$

- Sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung

$$n=1: d_{red} = -60(b/b_r) - 0.4d + 133 \quad [\text{mm}] \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 10\text{mm} \quad (13)$$

$$n=2,3: d_{red} = -40(b/b_r) - 0.4d(n+2) + 101 \quad [\text{mm}] \quad \text{mit } 6 \leq d \leq 10\text{mm} \quad (14)$$

Auf diese Art und Weise kann der ideale Restquerschnitt  $A_{ef}$  ermittelt werden. Durch Multiplikation mit der charakteristischen Zugfestigkeit von Holz und dem Faktor  $k_{fi}$  gemäß Gleichung (2)

lässt sich der Tragwiderstand von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen ermitteln. Für andere als die zugrunde gelegten Festigkeitsklassen wurden Umrechnungsfaktoren für den Tragwiderstand abgeleitet [6].

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Grundlage von umfangreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde ein Bemessungsvorschlag zur Ermittlung des Tragwiderstandes von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall vorgestellt. Grundsätzlich lehnt die Vorgehensweise an die Methode mit reduziertem Querschnitt gemäß der EN 1995-1-2 an, welche für die Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall gültig ist und auf der Ermittlung eines verbleibenden (Wert  $d_{char}$ ) und ideellen Restquerschnittes (Wert  $d_{red}$ ) beruht. Diese anschauliche Vorgehensweise ermöglicht es dem Anwender, die Holzfestigkeiten bei Raumtemperatur zu verwenden, was hinsichtlich der ungenügenden Kenntnis der Festigkeitsabnahme von Holz bei hohen Temperaturen vorteilhaft ist.

Durch die Vielzahl an Verbindungsarten mit metallischen Verbindungsmitteln ist ein einheitliches, von der Verbindungsart unabhängiges Bemessungsverfahren im Brandfall quasi nicht möglich, da im Brandfall verschiedene Versagensarten bei den unterschiedlichen Verbindungstypen zu beobachten sind. So besitzen beispielsweise Rillennagelverbindungen aufgrund der fehlenden Tiefenwirkung der Nägel ein anderes Verhalten im Brandfall als mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit durchlaufenden Stabdübeln [1]. Um die wesentlichen Einflussfaktoren einer jeweiligen Verbindung zu analysieren, sind weitere Forschungsaktivitäten im Bereich „Verbindungen und Brandschutz“ notwendig. Die Wirkung von Brandschutzbekleidungen, wie beispielsweise Holzwerkstoff- oder Gipsfaserplatten ist dabei nur ein wichtiges Thema.

**Quellen**

- [1] Erchinger C., Fontana M., Mischler A., Frangi A.: Versuche an mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen und Rillennagelverbindungen bei Raumtemperatur und Normbrandbedingungen, IBK-Bericht Nr. 293, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, ISBN 3-7281-3068-0, vdf Hochschulverlag AG, Februar 2006.
- [2] Kolb J.: Brandschutz in der Schweiz: Das Projekt Brandsicherheit und Holzbau, 10. DGfH-Brandschutztagung 2004, Berlin, Tagungsband, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, München, 2004.
- [3] Johansen K.W.: Theory of timber connections, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE 1949; 98: 249-262, Bern, Schweiz.
- [4] Ansys, Ansys Workbench Version 11.0, Canonsburg, USA.
- [5] König J., Walleij L.: One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situation, Swedish Institute for Wood Technology, Research Report I9908029. Sweden. 1999.
- [6] Erchinger C.: Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall (Dissertation ETH Zürich Nr. 18208), IBK-Bericht Nr. 314, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, vdf Hochschulverlag AG, Februar 2009.
- [7] EN1995-1-2: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, CEN, Brüssel, 2004.
- [8] EN1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines– Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, CEN, Brüssel, 2004.
- [9] Holzbautabelle HBT1: Handbuch für die Bemessung, Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 1. Auflage, Zürich, 2005.
- [10] Frangi A., Erchinger C., Fontana M.: Experimental analysis on the fire behaviour of steel-to-timber connections with slotted-in steel plates and nail connections, Fire and Materials, 2009.
- [11] Erchinger C., Frangi A., Mischler A.: Thermal investigations on multiple shear steel-to-timber connections, in: proceedings of 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE, August 6-10, Portland, 2006.
- [12] König J.: Structural fire design according to Eurocode 5 – Design rules and their background, Fire and Materials 2005; 29: 147-163.
- [13] Erchinger C., Frangi A., Mischler A.: Fire behaviour of multiple shear steel-to-timber connections with dowels, in: proceedings of 38<sup>th</sup> CIB-W018 Meeting, Karlsruhe, August 29-31, 2005.

## 11.3 Brandschutz

### Modell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen

**Vanessa Schleifer**

#### 1 Einleitung

Durch die Revision der schweizerischen Brandschutzvorschriften im Januar 2005 [15] wurden brennbare Bauteile auf eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erweitert und der Einsatz von Holzkonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden in der Schweiz ermöglicht. Damit gewinnt die Einhaltung der geforderten Brandabschnitte an Bedeutung, welche anhand von Decken- und Wandkonstruktionen gebildet werden und eine Brandausbreitung im oder auf benachbarte Gebäude verhindern sowie sichere Rettungswege ermöglichen. Dabei erfordert der bauliche Brandschutz, im Gegensatz zu Brandschutzkonzepten mit Sprinklern oder Brandmeldern, eine Brandschutzbemessung der Holzkonstruktion.

Zur Erweiterung der Brandschutzbemessung des Eurocodes 5, zeigt der vorliegende Beitrag das neu entwickelte Berechnungsmodell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von massiven und mehrschichtigen Holzbauteilen [12]. Mehrschichtige Bauteile bestehen aus Holzständern bzw. -balken, die ihren Feuerwiderstand durch Bekleidungen und eventuell vorhandene Dämmungen erreichen. Damit die verschiedenen Bekleidungen und Dämmstoffe beliebig kombiniert werden können, wird im vorliegenden Modell eine additive Methode verwendet, bei welcher die Beiträge der einzelnen Komponenten addiert und so der Feuerwiderstand des gesamten Bauteils bestimmt werden kann.

Da sich jedoch die einzelnen Schichten gegenseitig beeinflussen, variiert der Beitrag der jeweiligen Schicht nicht nur in Abhängigkeit von Material und Schichtdicke, sondern ebenfalls in Abhängigkeit von der Position der Schicht innerhalb des Bauteils. Damit weißt jeder mögliche Aufbau einen anderen Feuerwiderstand auf. Da die bereits existierenden Modelle aus Versuchen abge-

leitet wurden, ist die Anzahl der Holzbauteile gering, die mit diesen Modellen nachgewiesen werden können. Zur Minimierung von Brandversuchen, wurde daher das vorliegende Modell auf Grundlage von physikalischen Modellen hergeleitet und durch FE-Simulationen überprüft. Die dafür verwendeten FE-Berechnungen basieren auf den thermischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien, die unter Berücksichtigung der thermischen Prozesse der jeweiligen Materialien an Versuche angepasst wurden.

#### 2 Grundlagen

##### 2.1 Beurteilungskriterien

Die raumabschließende Funktion von Bauteilen (EI) beschreibt die Begrenzung der Brandausbreitung in andere Brandabschnitte des Gebäudes. Gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] ist die raumabschließende Funktion eines Bauteils gegeben, wenn Folgendes sichergestellt ist:

- der Erhalt der Dichtigkeit,
- der Erhalt der thermischen Wärmedämmeigenschaften und
- die Begrenzung der Wärmestrahlung auf der feuerabgewandten Seite.

Die Dichtigkeit eines Bauteils wird mit dem Kriterium E (Étanchéité) beschrieben und charakterisiert die Fähigkeit eines Bauteils Flammen oder heiße Gase nicht hindurchzulassen. Die Wärmedämmung wird anhand des Kriteriums I (Isolation) beschrieben und wird durch Temperaturmessungen auf der Oberfläche der feuerabgewandten Seite des Bauteils über Thermolemente kontrolliert. Dabei sind auf der feuerabgewandten Seite des Bauteils der Mittelwert der Temperaturerhöhung auf 140 °C und der Maximalwert der Temperaturerhöhung auf 180 °C begrenzt.

Ebenso ist die Wärmestrahlung durch ein Temperaturkriterium von 300 °C auf der feuerabgewandten Seite des Bauteils begrenzt und ist damit erfüllt, wenn das Kriterium I eingehalten

wird. Ebenfalls kann gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] angenommen werden, dass das Kriterium E erfüllt ist, wenn die Anforderungen an die Wärmedämmung (Kriterium I) erfüllt sind.

## 2.2 Vorhandene Modelle

Berechnungsmodelle für den Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen werden nur in wenige Normen gegeben. In König 2000 [8] werden Berechnungsmodelle aus verschiedenen Ländern miteinander verglichen. Für den Vergleich werden die ENV 1995-1-2 von 1994 (Vorversion der EN 1995-1-2: 2004 [5]), das Nordamerikanische Modell, das dem Modell des kanadischen Codes NBCC: 2005 [10] entspricht, der britische Code BS 5268: 1990 [2] sowie das schwedische Modell berücksichtigt. Auf Grundlage dieser Untersuchung wurde das schwedische Modell in die EN 1995-1-2: 2004 [5] übernommen. Alle diese Modelle verwenden die additive Methode, mit der die Beiträge der einzelnen Schichten addiert und so die Zeit bis zum Verlust der raumabschließenden Funktion des gesamten Bauteils ermittelt wird. Im Gegensatz zur EN 1995-1-2: 2004 [5] vermischen jedoch die Modelle gemäß NBCC: 2005 [10] und BS 5268: 1990 [2] die Beiträge von verschiedenen Schichten miteinander. Weiterhin berücksichtigt das Modell gemäß EN 1995-1-2: 2004 [24] die Fugen der Schichten sowie explizit die Position der Schicht anhand eines Faktors, der einen entscheidenden Einfluss auf den Feuerwiderstand der einzelnen Schicht hat.

Da jedoch das Modell gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] wie die Modelle gemäß NBCC: 2005 [10] und BS 5268: 1990 [2] auf Grundlage von Versuchen hergeleitet wurden, sind alle Modelle begrenzt auf die geprüften Konstruktionen. Dabei bietet der kanadische Code NBCC: 2005 [10] die geringste mögliche Anzahl der Variation von verschiedenen Materialien und Kombination der Schichten im Vergleich mit den Berechnungsmodelle

gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] und BS 5268: 1990 [2].

## 3 Finite Element Modelle

### 3.1 Allgemeines

Die raumabschließende Funktion von mehrschichtigen Holzbauteilen wird durch die Bekleidung und Hohlraumdämmung, falls diese vorhanden ist, erbracht. Die Zeit, wie lange die raumabschließende Funktion des Bauteils erhalten bleibt, hängt vom Brandverhalten dieser Schichten ab. Die Untersuchung des Brandverhaltens der Schichten kann experimentell anhand von Brandversuchen oder mit numerischen Simulationen durchgeführt werden. Die wesentlichen Vorteile der numerischen Analyse liegen zum einem in der Kostenersparnis und zum anderen können mit geringem Aufwand Ausgangsparameter variiert werden.

Als Grundlage für die numerische Analyse wurden Brandversuche [11] mit Plattenelementen durchgeführt. Mit diesen Versuchen wurden die unterschiedlichen Einflüsse wie z.B. Plattendicke, Plattenmaterial und angrenzende Schichten auf das Brandverhalten unterschiedlicher Plattenelemente untersucht und mit den Ergebnissen der Versuche die Finiten Element Modelle verifiziert und kalibriert, die für die Ermittlung des Berechnungsmodells verwendet wurden.

### 3.2 FE-Modell

Die thermische FE-Analyse wurde anhand von Temperaturfeldberechnungen mit dem Finite Element Programm Ansys 11.0 durchgeführt. Die Brandeinwirkung wurde wie bei den Brandversuchen [11] mit der Einheits-Temperaturkurve (ETK) gemäß EN 1991-1-2: 2003 [4] simuliert. Dabei wurde die Wärmeübertragung durch Konvektion gemäß EN 1991-1-2: 2003 [4] mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{\text{ex}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  für die feuerzugewandte Bauteilseite und  $\alpha_{\text{unex}} = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$  für die feuerabgewandte Bauteilseite

berücksichtigt. Für die Wärmeübertragung durch Strahlung wurde für alle Materialien gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] der Emissionskoeffizient  $\epsilon = 0.8$  verwendet.

### 3.3 Materialeigenschaften

Für das Berechnungsmodell wurden Massivholzplatten, OSB- und Spanplatten, Gips- und Gipsfaserplatten sowie als Dämmungen Stein- und Glaswolle untersucht. Da als Brandeinwirkung gemäß der ETK die Temperatur mit der Zeit steigt und ebenfalls die Materialeigenschaften der Werkstoffe sich mit der Temperatur und damit mit der Zeit ändern, sind im FE-Modell die Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur einzugeben. Vorwiegend wurden dafür gemessene Werte für die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und die Rohdichte verwendet, die an Versuche angepasst wurden.

Gemessene Werte z.B. für die spezifische Wärmekapazität von Gipsplatten lagen jedoch nur bis zu Temperaturen von ca. 350 °C vor, während die ETK bei 60 Minuten bereits ca. 950 °C erreicht. Daher wurde unter anderem die Wärmekapazität von Gipsplatten hergeleitet (s.a. [14]). Für diese Herleitung müssen die Phasen bekannt sein, die der Werkstoff mit steigender Temperatur durchläuft, sowie die Energien ermittelt werden, die für die Umwandlung benötigt wird. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Zusammensetzung der Werkstoffe, die bei den Dämmmaterialien nicht vorlag. Für Dämmmaterialien wurde daher auf bereits veröffentlichte Werte zurückgegriffen. Die verwendeten temperaturabhängigen Materialeigenschaften für die FE-Simulationen können [12] entnommen werden.

## 4 Bemessungsmodell

### 4.1 Allgemeines

Das Berechnungsmodell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen be-

ruht auf der Einheits-Temperaturkurve (ETK) gemäß EN 1991-1-2: 2003 [4] und ist auf eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten begrenzt. Anhand des entwickelten Modells ist es möglich, den Zeitpunkt  $t_{ins}$  bis zum Verlust der raumabschließenden Funktion eines Holzbauteils zu berechnen. Das Bauteil kann dabei beliebig aus den folgenden Platten und Dämmungen zusammengesetzt werden:

Platten (Befestigung gemäß Herstellerangaben):

- Massivholzplatten aus mindestens C24 gemäß EN 338
- OSB- Platten gemäß EN 300
- Spanplatten gemäß EN 309
- Gipsplatten Typ A, Typ H und Typ F gemäß EN 520
- Gipsfaserplatten EN 15283-2

Dämmung (Einbau mit Übermaß gemäß Herstellerangaben):

- Steinwolle gemäß EN 13162
- Glaswolle gemäß EN 13162

### 4.2 Aufbau des Modells

Da gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] die raumabschließende Funktion eines Bauteils  $E_I$  nachgewiesen ist, wenn das Kriterium I erfüllt ist, wird für das Berechnungsmodell unter Berücksichtigung des Abfallens der Platten nur der Wärmedurchgang durch das Bauteil betrachtet. Dabei ist bei den massiven Holzbauteilen der eventuell vorhandene Fugenbereich maßgebend.

Bei den zusammengesetzten Bauteilen sind die folgenden Wärmedurchgänge zu berücksichtigen:

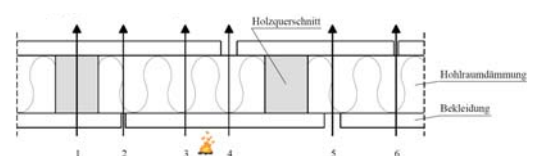


Abb. 1 Mögliche Wärmedurchgänge durch das Bauteil

Wie bei den massiven Holzbauteilen werden auch die Fugen der zusammengesetzten Bauteile nicht anhand von FE-Berechnungen untersucht sondern unter Berücksichtigung von Versuchen gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] beurteilt. Damit entfällt für die Herleitung des Berechnungsmodells anhand von FE-Berechnungen die Wärmedurchgänge 2, 4, 5 und 6. Ebenfalls kann der Wärmedurchgang 1 durch den massiven Holzquerschnitt entfallen, da der Wärmedurchgang 3 außerhalb des Holzquerschnitts im Vergleich mit dem Durchgang 1 maßgebend wird.

Wie die bereits existierenden Modelle wird für das [12] entwickelte Berechnungsmodell die additive Methode verwendet, mit der die Beiträge der einzelnen Schichten addiert werden und somit der Zeitpunkt bis zum Verlust der raumabschließenden Funktion des gesamten Bauteils bestimmt werden kann. Dabei wird hier unterschieden zwischen Schichten, die eine schützende Funktion für die dahinterliegenden Schichten übernehmen, und der letzten Schicht auf der feuerabgewandten Seite des Bauteils, die eine „isolierende“ Funktion erfüllen muss (s. Abb. 2).

Nur bei dieser letzten Schicht muss auf der feuerabgewandten Seite das Kriterium I mit dem einzuhaltenden Temperaturkriterium  $\Delta T_{MW}/\Delta T_{Max} = 140 / 180 \text{ °C}$  erfüllt sein. Die davorliegenden Schichten können einer Brandschutzbekleidung gleichgesetzt werden, die ihre schützende Wirkung verliert, wenn gemäß EN 13501-2: 2003 [6] das Temperaturkriterium  $\Delta T_{MW}/\Delta T_{Max} = 250 / 270 \text{ °C}$  auf ihrer feuerabgewandten Seite erreicht ist. Da bei den FE-Berechnungen die Fugen nicht untersucht werden, wird immer der Mittelwert der Temperaturerhöhung maßgebend und mit einer festgelegten Raumtemperatur von  $20 \text{ °C}$  ergeben sich die Temperaturen:

$$T = 140 + 20 = 160 \text{ °C} \text{ und}$$

$$T = 250 + 20 = 270 \text{ °C}.$$

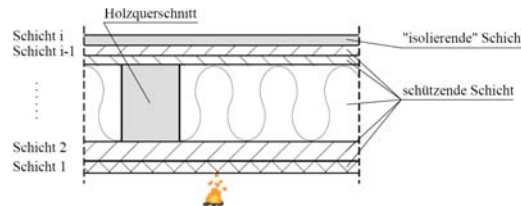


Abb. 2 Mögliche Wärmedurchgänge durch das Bauteil

Das Abfallen von Schichten hat einen großen Einfluss auf die schützende Wirkung für dahinterliegende Schichten. Betrachtet man beispielsweise eine Holzwerkstoffplatte entzündet sich diese zwar beim Erreichen der  $270 \text{ °C}$  auf der feuerzugewandten Seite, brennt jedoch mit einer wesentlich geringeren Abbrandgeschwindigkeit, solange die schützende Schicht am Bauteil verbleibt, als wenn sie direkt dem Feuer ausgesetzt ist. Wie bereits in [7], [13] und [3] wird hier ein Temperaturkriterium eingeführt, um das Abfallen der Schicht zu beschreiben. Anhand von Versuchen wurde für Holzwerkstoffe, Gipsplatten Typ A (alte Bezeichnung: GKB) und Dämmmaterialien das Temperaturkriterium  $T_{Abfallen} = 270 \text{ °C}$  festgelegt. Gipsplatten Typ F (alte Bezeichnung: GKF) sowie Gipsfaserplatten weisen durch die Fasern im Gipskern einen besseren Gefügestandhalt unter Brandbeanspruchung auf und bleiben darum länger an der Konstruktion. Durch die horizontale Lage der Platten in Deckenkonstruktionen fallen sie jedoch bei Decken früher als bei Wandbauteilen. Das hier gewählte Temperaturkriterium beträgt für Deckenkonstruktionen  $T_{Abfallen} = 400 \text{ °C}$  und für Wandkonstruktionen  $T_{Abfallen} = 600 \text{ °C}$ .

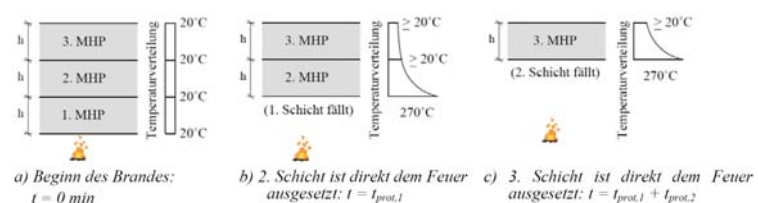


Abb. 3 Vorgehensweise zur Ermittlung der Beiträge der Schichten (MHP)

Um die Beiträge der einzelnen Schichten zu ermitteln, ist für die schützenden Schichten 1 bis  $i-1$  auf der feuerzugewandten Seite jeweils eine Schutzzeit (protection time  $t_{\text{prot},i}$ ) zu bestimmen und für die letzte Schicht  $i$  eine Isolationszeit (insulation time  $t_{\text{ins},i}$ ). In Abb. 3 ist exemplarisch ein Aufbau mit drei Massivholzplatten (MPH) dargestellt, der die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Beiträge veranschaulichen soll. Dabei entsprechen die Schichten 1 und 2 die schützenden Schichten 1 bis  $i-1$  und die dritte und letzte Schicht der isolierenden Schicht  $i$ . Die Schutzzeit der 1. Schicht  $t_{\text{prot},1}$  beginnt zum Zeitpunkt  $t = 0$  min und endet mit dem Erreichen der Temperatur  $T = 270$  °C auf der feuerabgewandten Seite. Sobald die Schutzzeit der 1. Schicht erreicht ist, beginnt die Schutzzeit der 2. Schicht  $t_{\text{prot},2}$ . Da festgelegt wurde, dass eine Massivholzplatte mit dem Erreichen von 270 °C auf ihrer feuerabgewandten Seite von der Konstruktion abfällt, ist zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1}$  also zu Beginn des Beitrages  $t_{\text{prot},2}$  die 2. Schicht nicht nur vorerwärmt, sondern ebenfalls direkt dem Feuer ausgesetzt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1}$  gemäß der ETK im Brandraum höhere Temperaturen herrschen als zum Zeitpunkt  $t = 0$  min.

Aufgrund dieser höheren Temperaturen ist die Schutzzeit der 2. Schicht geringer als wenn sie von Brandbeginn dem Feuer ausgesetzt ist. Daher entspricht die Schutzzeit  $t_{\text{prot},2}$  nicht der Schutzzeit  $t_{\text{prot},1}$ , auch wenn beide Platten das selbe Material und sie selbe Schichtdicke  $h$  aufweisen. Wie die Schutzzeit  $t_{\text{prot},1}$  endet die Schutzzeit  $t_{\text{prot},2}$  mit dem Erreichen der Temperatur  $T = 270$  °C auf ihrer feuerabgewandten Seite zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2}$  und die Isolationszeit der 3. Schicht  $t_{\text{ins},3}$  beginnt. Die 3. Schicht ist vorerwärmt und zusätzlich sind die Temperaturen im Brandraum zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2}$  höher als zum Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1}$ . Die Isolationszeit der

3. Schicht  $t_{\text{ins},3}$  endet mit dem Erreichen der Temperatur  $T = 160$  °C auf ihrer feuerabgewandten Seite. Zu diesem Zeitpunkt  $t = t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2} + t_{\text{ins},3}$  verliert der in Abb. 3 dargestellte Aufbau seine raumabschließende Funktion.

Die Zeit  $t_{\text{ins}}$  bis zum Verlust der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen ergibt sich somit zu:

$$t_{\text{ins}} = \sum t_{\text{prot},i-1} + t_{\text{ins},i} \text{ [min]} \quad (4.1)$$

Die Vorerwärmung sowie die auf die Schicht wirkenden Temperaturen im Brandraum, sind von der Position der Schicht innerhalb des Bauteils abhängig. Der Einfluss der Position einer Schicht wird in dem vorliegenden Modell anhand eines Positionsbeiwertes berücksichtigt. Damit setzt sich die Schutz- bzw. Isolationszeit zusammen aus einer Grundzeit  $t_{0,i}$ , die abhängig von Schichtmaterial,- dicke und -rohichte ist, und einem Positionsbeiwert  $k_{\text{pos}}$  der Position innerhalb des Bauteils berücksichtigt.

$$t_{\text{prot},i} \text{ bzw. } t_{\text{ins},i} = t_{0,i} \cdot k_{\text{pos}} \text{ [min]} \quad (4.2)$$

### 4.3 Grundzeiten und Beiwerte

#### 4.3.1 Grundzeiten $t_{0,i}$

Die Grundzeit  $t_{0,i}$  beschreibt das Brandverhalten einer Schicht ohne den Einfluss von angrenzenden Schichten. Daher wird in den FE-Simulationen die untersuchte Schicht immer direkt dem Feuer ausgesetzt. Da die Schutzzeit und die Isolationszeit unterschiedliche Temperaturkriterien erfüllen müssen ( $T = 270$  bzw.  $160$  °C), wird hier unterschieden zwischen einer Grundschutzzeit  $t_{\text{prot},0,i}$  und einer Grundisolationszeit  $t_{\text{ins},0,i}$ . Die Grundschutzzeit wird gemäß EN 13501-2: 2003 [6] bestimmt, indem die untersuchte Schicht direkt beflammt und mit einer 19 mm dicken Spanplatte hinterlegt ist. Sobald zwischen der Schicht und der Spanplatte die Temperatur 270 °C vorliegt, ist die Grundschutzzeit erreicht.



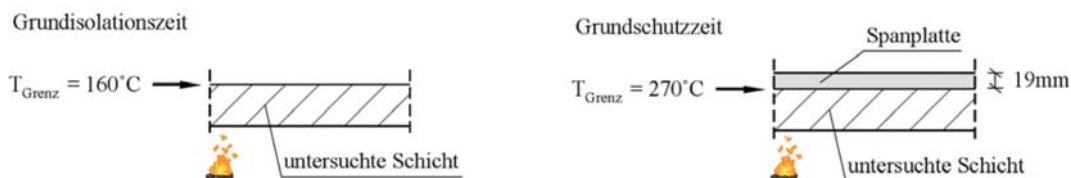


Abb. 4 Temperaturkriterien zur Bestimmung von Grundisolationszeiten und Grundschutzzeiten

Bei der Bestimmung der Grundisolationszeit entfällt die dahinterliegende Spanplatte und das Temperaturkriterium  $T = 160^\circ\text{C}$  wird angewendet. Die Grundschutzzeit  $t_{\text{prot},0,i}$  sowie die Grundisolationszeit  $t_{\text{ins},0,i}$  wird in [12] für die verwendeten Materialien in Abhängigkeit der Schichtdicke und – rohddichte angegeben. Dabei konnte bei den Plattenwerkstoffen auf eine Unterscheidung der Rohddichte verzichtet werden, da die Grundzeiten ähnlich sind für die vorhandenen wenig von einander abweichenden Rohddichten.

#### 4.3.2 Positionsbeiwerte

Der Positionsbeiwert berücksichtigt den Einfluss von angrenzenden Schichten auf die untersuchte Schicht. Damit eine beliebige Kombination der Schichten im Holzbauteil möglich ist, wird zwischen dem Einfluss der davorliegenden Schichten und der Einfluss der dahinterliegenden Schicht unterschieden. Der Einfluss der davorliegenden Schichten wird hier mit dem Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp}}$  (exp – exposed to fire) und der Einfluss der dahinterliegenden Schicht wird hier mit dem Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,unexp}}$  (unexp – unexposed to fire) berücksichtigt.

Der Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp},i}$  der Schicht  $i$  ist abhängig von der Vorerwärmung und den erhöhten Temperaturen im Brandraum zum Zeitpunkt, bei dem die Schutzzeit bzw. Isolationszeit der untersuchten Schicht  $i$  beginnt. Durch Untersuchungen mit FE-Berechnungen konnte festgestellt werden, dass jedoch der Einfluss der Vorerwärmung im Vergleich mit den erhöhten Temperaturen im Brandraum nur gering ist. Dabei sind die erhöhten Temperaturen abhängig von den Schutzzei-

ten der davorliegenden Schichten. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Beiwert ebenfalls vom Material, Dicke und Rohddichte der untersuchten Schicht  $i$  abhängig ist, die bereits in der Grundzeit der Schicht berücksichtigt sind. Damit konnte der Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp},i}$  der Schicht  $i$  als Funktion der Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schicht sowie der Grundzeit der untersuchten Schicht  $i$  dargestellt werden. Diese Positionsbeiwerte basieren auf der Annahme, dass die schützende Schicht bei einer Temperatur von  $270^\circ\text{C}$  vom Bauteil abfällt. Dies trifft jedoch nicht für die Gipsplatten Typ F und Gipsfaserplatten zu, die gemäß Kapitel 4.2 abhängig von einem Decken- oder Wandaufbau bei  $400^\circ\text{C}$  bzw.  $600^\circ\text{C}$  abfallen. Durch das spätere Abfallen der schützenden Schicht, verlängert sich die die Schutzzeit bzw. Isolationszeit der dahinterliegenden Schicht.

Da jedoch diese Zeiten mit dem Erreichen der  $270^\circ\text{C}$  beginnen, wird nicht der Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp}}$  angepasst, sondern die gesamte Schutzzeit bzw. Isolationszeit der untersuchten Schicht anhand einer Zeitdifferenzen  $\Delta t_i$  erhöht.

Der Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,unexp}}$  berücksichtigt den Einfluss von dahinterliegenden Schichten auf die untersuchte Schicht. Dahinterliegende Schichten sind jedoch nur bei Schichten vorhanden, bei denen eine Schutzzeit zu bestimmen ist. Daher wird bei der Ermittlung der Isolationszeit die Grundzeit der untersuchten Schicht nur mit dem Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp}}$  multipliziert. Anhand von Versuchen und FE-Berechnungen konnte festgestellt werden, dass der ungünstige Einfluss von dahin-

terliegenden Dämmmaterialien relevant ist, der sich jedoch unterschiedlich auf die davorliegenden Materialien auswirkt.

#### 4.3.3 Fugenbeiwerte

Es lagen nur wenige Versuche vor, mit denen Fugen untersucht wurden. Daher wurde die Beurteilung der Fugen anhand den Angaben der EN 1995-1-2: 2004 [5] unter Berücksichtigung der vorliegenden Versuche durchgeführt. Damit werden im Berechnungsmodell die Beiträge der Schichten mit einem Fugenbeiwert  $k_{j,i}$  multipliziert. Um Durchbrüche durch Bekleidungen im Berechnungsmodell berücksichtigen zu können, wie z.B. für die Installation von Steckdosen oder Lichtschalter benötigt werden, sind mögliche Ausführungen in der Lignum- Dokumentation Brandschutz 4.1 2007 [9] gegeben (s. Abb. 5).

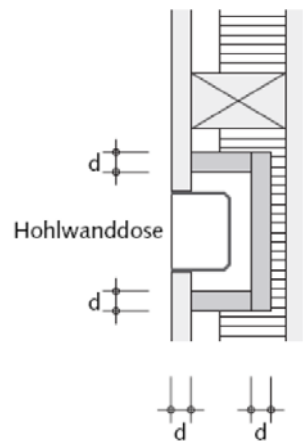


Abb. 5 Mögliche Ausführungen von Hohlräumeinstellungen gemäß Lignum-Dokumentation 2007 [9]

Für den Nachweis der raumabschließenden Funktion dieser Bauteile kann jedoch nur die verbleibenden Schichten mit den vorhandenen Dicken angesetzt werden. Damit ergibt sich die Isolationszeit  $t_{ins,i}$  und Schutzzeit  $t_{prot,i}$  zu:

$$t_{ins,i} = (t_{ins,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad [\text{min}] \quad (4.3)$$

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad [\text{min}] \quad (4.4)$$

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wird ein neu entwickeltes Berechnungsmodell zum Nachweis der raumabschließenden Funktion (EI) von massiven und zusammengesetzten Holzbauteilen bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erläutert. Anhand des Berechnungsmodells wird rechnerisch das Kriterium der Wärmedämmung (I) nachgewiesen und in Analogie zur EN 1995-1-2: 2004 [5] angenommen, dass damit ebenfalls das Kriterium der Dichtigkeit (E) erfüllt ist. Das Modell verwendet die „additive Methode“. D.h., zur Ermittlung des Feuerwiderstands des Gesamtbauteils werden die Beiträge der jeweiligen Schichten addiert. Im Gegensatz zu vorhandenen Nachweisverfahren wurden diese Beiträge im vorliegenden Modell nicht direkt aus Versuchen, sondern anhand von physikalischen Modellen und von FE-Berechnungen mit dem Finiten Element Programm ANSYS 11.0 hergeleitet. Dabei wurden die FE-Modelle an Versuchen kalibriert. Als Grundlage für die FE-Modelle wurden die temperaturabhängigen Materialeigenschaften der jeweiligen Werkstoffe basierend auf der Literatur zusammengestellt und an die vorliegenden Versuche angepasst. Mit diesen FE-Modellen konnte systematisch die Eingabedaten für das Berechnungsmodell ermittelt werden.

Das vorliegende Berechnungsmodell basiert auf der Einheits-Temperaturkurve (ETK) gemäß EN 1991-1-2: 2003 [4] als Brandeinwirkung. Da das Brandverhalten von Plattenelementen unter anderen Brandbeanspruchungen wie z.B. Naturbrandbeanspruchung von dem Brandverhalten unter Normbrandbeanspruchung deutlich abweicht, ist das Berechnungsmodell für den klassischen Feuerwiderstandsnachweis anwendbar, bei dem die Einheits-Temperaturkurve vorausgesetzt wird. Die amerikanische Standard Temperatur-Zeit Kurve ASTM E119: 1992 [1] ist der ETK so ähnlich, dass eine Anwendung möglich ist.

Da das Modell ebenfalls eine Schutzzeit von Brandschutzbekleidungen liefert und so der Entzündungszeitpunkt von dahinterliegenden Holzkonstruktionen sowie den Einfluss der Bekleidung auf das Brandverhalten der dahinterliegenden Holzbauteile bestimmt werden kann, bietet dieses Modell auch die Grundlage für den Tragwiderstandsnachweis bekleideter Holzkonstruktionen im Brandfall.

Das Modell berücksichtigt jedoch nur die wichtigsten Materialien. Andere Materialien wie z.B. die Sperrholzplatte als Bekleidung sind nicht erfasst, da keine Brandversuche zur Herleitung der temperaturabhängigen Materialwerte von Sperrholz vorliegen. Bekleidungen aus Sperrholz oder anderen Materialien können jedoch in das Modell integriert werden. Hierfür sind die Grundschutzzeit bzw. Grundisolationszeit sowie die Positionsbeiwerte anhand von FE-Berechnungen und von Versuchen zu ermitteln.

Der Einfluss der Fugen auf den Beitrag der Schicht zum Raumabschluss des Bauteils hängt vom Material der Bekleidung sowie von der Fu-

genausbildung ab. Für eine Beurteilung der Fugen liegen jedoch nicht genügend Versuchsergebnisse vor. Daher wurden für das Berechnungsmodell die Fugenbeiwerte der EN 1995-1-2: 2004 [5] zum größten Teil übernommen. Da die Fugen auf der feuerabgewandten Seite des Bauteils einen relativ großen Einfluss haben und die Beiwerte gemäß EN 1995-1-2: 2004 [5] konservative Ergebnisse liefern, kann durch eine genauere Untersuchung der Fugen das Modell weiter verbessert werden.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass das Abfallen der Bekleidungen sowie das Herausfallen der Hohlraumdämmungen einen großen Einfluss auf den Raumabschluss der Konstruktion hat. Die hier getroffenen konservativen Annahmen für den Zeitpunkt des Abfallens der einzelnen Schichten basieren auf Temperaturen. Einen maßgebenden Einfluss auf den Zeitpunkt des Abfallens hat jedoch die Befestigung. Durch die Festlegung von brandschutztechnisch günstigeren Ausführungen der Befestigung, die anhand von Versuchen überprüft werden, kann das Modell ebenfalls verbessert werden.

**Quellen**

- [1] ASTM E119: Annual book of ASTM standards - Standard test methods for fire tests of building construction and materials, ASTM, Vol. 04.07, Philadelphia, USA, 1992
- [2] British Standard BS 5268-4: Structural use of timber - Section 4.2. Recommendations for calculating fire resistance of timber stud walls and joisted floor constructions, BSI, 1990.
- [3] Cooper Y.: The thermal response of gypsum-panel/steel stud wall systems exposed to fire - Environments - a simulation for use in zone-type fire models, NISTIR 6027, Building and Fire Research Laboratory, June 1997.
- [4] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2 Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Entwurf, CEN Brüssel, September 2003.
- [5] EN 1995-1-2, Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauteilen, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel 2004
- [6] EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahmen von Lüftungsanlagen, CEN Brüssel, Dezember 2003.
- [7] König J., Walleij L.: One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situation, Trätek, Rapport I 9908029, Stockholm, August 1999.
- [8] König J., Oksanen T., Towler K.: A review of component additive methods used for the determination of fire resistance of separating light timber frame construction, International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Working Commission W18 - Timber Structures, CIBW18/33-16-2, Delft, Netherlands, August 2000.
- [9] Lignum-Dokumentation Brandschutz 4.1 Bauteile - Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand, Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, Oktober 2007
- [10] National Building Code of Canada NBCC - Volume 2, Canadian Commission on Building and Fire Codes, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, - 7 – 2005
- [11] Schleifer V., Frangi A., Fontana M.: Experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Plattenelementen, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, IBK Bericht Nr. 302, vdf Hochschulverlag AG, Mai 2007.
- [12] Schleifer V.: Zum Verhalten von raumabschließenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall, Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, 2009.
- [13] Sultan M. A.: A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire, Fire Technology, Volume 32, Number 3, August 1996.
- [14] Thomas G.: Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures, Fire and Materials, 26: 37-45. 2002.
- [15] VKF: Brandschutznorm, VKF (Vereinigung Kantonaler Feuerversicherung), Bern, März 2003.



## 11.4 Dauerhaftigkeit

### Dauerhaftigkeit im Holzbau

**Norbert Rüter**

#### 1 Allgemeines

Die Frage der Dauerhaftigkeit steht bei allen Bauprodukten und Bauwerken an vorderer, wenn nicht gar an vorderster Stelle. Dabei gibt es hinsichtlich der Definitionen und Erwartungen sehr große Unterschiede. PKWs gelten nach wenigen Jahren als „alt“. Die aktuellen Diskussionen um die sogenannte Umweltprämie bei „Altfahrzeugen“ definieren ein mehr als neun Jahre altes Auto als schrottreif. Selbst tragende Teile dürfen jedoch bereits bis dahin zumindest schon angerostet sein. Bei Fassaden und der Witterung ausgesetzten Bauteilen werden Wartungsintervalle vorgegeben und die zu wartende Fassadenoberfläche hat innerhalb dieser Zeit dauerhaft zu sein. Da die Gewährleistungsfrist für verdeckte Mängel im Bauwesen nach 30 Jahren abläuft, kann der Zeitraum der Dauerhaftigkeit auf diesen Zeitraum definiert werden. Im allgemeinen Volksverständnis ist jedoch ein wesentlich längerer Zeitraum für die geforderte Dauerhaftigkeit von Bauwerken vorhanden. Niemand würde Verständnis dafür aufbringen, wenn ein Wohngebäude nach 30 Jahren abgerissen werden müsste. Bei Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton muss eine Dauerhaftigkeit über einen Zeitraum von 50 Jahren sichergestellt sein.

Aus Vorgenanntem wird deutlich, dass bei der Frage der Dauerhaftigkeit immer auch ein Zeitraum definiert werden muss. Neben dieser sind jedoch etliche weitere Fragestellungen zu klären, auf die im Folgenden eingegangen wird:

#### 2 Definitionen

Im Holzbau spendiert DIN 1052 (ab Ausgabe 2004) der Dauerhaftigkeit ein ganzes Kapitel und liefert folgende Definition:

„Die Forderung nach einem angemessen dauerhaften Tragwerk gilt als erfüllt, wenn es während

der vorgesehenen Nutzungsdauer seine Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften und mit einem vertretbaren Instandhaltungsaufwand behält.“

Mit diesem Satz ist alles Wesentliche gesagt und somit sind auch alle anderen Sätze der DIN 1052, Kapitel 6 „Anforderungen an die Dauerhaftigkeit“, weitestgehend nur noch Erklärungen bzw. Hinweise dahingehend, wie die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit möglicherweise erfüllt werden können.

So einfach die oben aufgeführte Grunddefinition der Dauerhaftigkeit ist, so vielfältig sind die jeweils auf die einzelne Situation zugeschnittenen Definitionen und die Möglichkeiten der Nachweisführung. Da dieses Kapitel unter der großen Überschrift „ZUKUNFT-HOLZ“ verfasst wird, wird hier im Folgenden hauptsächlich auf die Dauerhaftigkeit im Holzbau eingegangen. Es ist jedoch wichtig zu wissen, dass andere Branchen ein teilweise komplett anderes Verständnis für den Begriff der Dauerhaftigkeit haben.

#### 2.1 Dauerhaftigkeit im Holzbau

Bei der Betrachtung der Dauerhaftigkeit im Holzbau sind die Fragestellungen nach der Optik, dem Trag- und Verformungsverhalten, der Dichtheit und dem Wetterschutz zu beantworten. Alle einzelnen Fragestellungen beziehen jedoch immer weitere mit ein. So können z.B. metallische Verbindungsmittel zwar oberflächlich rosten und somit die Optik beeinträchtigen, jedoch das Trag- und Verformungsverhalten nur unwesentlich beeinträchtigen. Der umgekehrte Fall ist genauso gut möglich, wenn z.B. durch Muldenkorrosion eine Kerbwirkung eintritt, die das Tragverhalten erheblich abmindert, die jedoch mit bloßem Auge nur schwer zu erkennen ist. Die Dauerhaftigkeit einer Dichtfuge wird erheblich von dem Verformungsverhalten der angrenzenden Bauteile be-

einflusst. Erfüllt eine Dichtfuge nicht mehr ihre Funktion, so können andere – dahinter befindliche Bauteile – schnell in Mitleidenschaft gezogen werden und ihre Dauerhaftigkeit verlieren. Somit ist immer zwischen Ursache und Wirkung zu unterscheiden. Die Optik einer natürlich belassenen Holzfassade wird sich innerhalb kurzer Zeit erheblich verändern (z.B. vergrauen) wird dann jedoch – bei richtiger Ausführung – über Jahrzehnte dauerhaft bleiben.

Im Holzbau sind zwei Grundsätze mit oberster Priorität zu behandeln:

Die sogenannte natürliche Dauerhaftigkeit der unterschiedlichen Holzarten ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu berücksichtigen.

Mit geeigneten konstruktiven Maßnahmen (konstruktiver Holzschutz) lässt sich die Beanspruchung einer Holzkonstruktion erheblich und dauerhaft verringern.

Chemische Holzschutzmittel können zwar die Dauerhaftigkeit von Hölzern erhöhen, jedoch sind selbst die Holzschutzmittel nicht dauerhaft wirksam. Zudem können sie bewirken, dass aus einem Naturprodukt plötzlich Sondermüll wird.

## 2.2 Natürliche Dauerhaftigkeit von Holz

Der Begriff der natürlichen Dauerhaftigkeit wird in erster Linie für Vollhölzer verwendet. DIN EN 335 hat den Titel „Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten“, definiert im Teil 1 die sogenannten Gebrauchsklassen und im Teil 2 die Anwendung der Norm bei Vollholz. Dort wird neben dem Begriff der natürlichen Dauerhaftigkeit auch die sogenannte erzielte Dauerhaftigkeit verwendet, und meint damit die Veränderung der Dauerhaftigkeit durch chemischen Holzschutz. In DIN EN 350 werden im Teil 1 Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz beschrieben und der Teil 2 ist ein Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit

und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. DIN EN 460 sieht sich als Leitfaden für die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung in den Gefährdungsklassen und wird auch überschrieben mit „Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz“.

Die Vollhölzer können in die Kategorien „sehr dauerhaft“ bis „nicht dauerhaft“ eingestuft werden, wobei hier ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass die nachstehend aufgeführten Hölzer unter den entsprechenden Bedingungen, bei denen holzerstörende Pilze wachsen können als ... dauerhaft eingestuft werden. Natürlich sind Fichte und Esche unter trockenen Bedingungen auch sehr dauerhaft, jedoch nur unter trockenen Bedingungen!

Tab. 1: Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit gegen holzerstörende Pilze

1	sehr dauerhaft	z.B. Afzelia, Bilinga, Greenheart, Makoré, Maobi, Padouk, Teak
1-2		z.B. Robinie (Kernholz)
2	dauerhaft	z.B. Bankirai, Bongossi, Bubinga, Edelkastanie, europ. Eiche, Merbaum, Mahagoni, amer. Western Red Cedar,
2-3		z.B. Yellow Cedar, amerik. Weißeiche
3	mäßig dauerhaft	z.B. Pitch Pine
3-4		z.B. europ. Douglasie, europ. Lärche
4	wenig dauerhaft	z.B. Fichte, Yellow Meranti, Roteiche, Tanne, Ulme
5	nicht dauerhaft	z.B. Birke, Buche, Esche, Linde, White Meranti

### 2.3 Dauerhaftigkeit von metallischen Verbindungsmitteln

Die Dauerhaftigkeit von Metallen in Verbindung mit Holz wird vorrangig in DIN 1052 – auch im bereits zitierten Kapitel 6 der Norm beschrieben. In Tabelle 2 der Norm sind Mindestanforderungen an den Korrosionsschutz für metallische Bauteile und Verbindungsmittel aufgeführt. Im Absatz 3 von Kapitel 6.3 wird erwähnt, dass andere, gleichwertige Maßnahmen zulässig sind, wobei kein Hinweis darauf gegeben ist, wie der Nachweis der Gleichwertigkeit zu führen ist. Am Fraunhofer WKI wurden zwei Nachweisverfahren entwickelt (s.a. 10.1 Korrosionsverhalten Bausteine bei Holzkontakt) mit denen diese Lücke geschlossen werden kann. Während das eine Verfahren ausschließlich einen Vergleich zwischen dem in DIN 1052 genannten Korrosionsschutz und einer anderen Maßnahme liefert, wird mit dem anderen Verfahren ein Nachweis der Dauerhaftigkeit geführt. Beim Vergleich der beiden Verfahren wird die Problematik der Nachweisführung einer Dauerhaftigkeit deutlich. Während das Vergleichsverfahren klar und eindeutig als eine Prüfnorm beschrieben ist, werden beim anderen Verfahren vorrangig die zu klärenden Fragestellungen beschrieben. Die Nachweisführung einer Dauerhaftigkeit ist eine herausgehobene Ingenieursleistung und kann jeweils nur individuell für eine jeweilige Situation erfolgen.

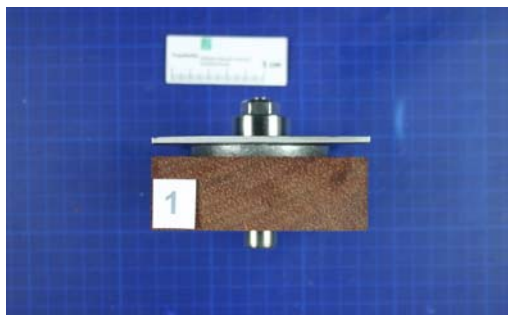


Abb. 1a: Prüfkörper eines Dauerhaftigkeitsversuchs vor der Beanspruchung



Abb. 1b: Prüfkörper eines Dauerhaftigkeitsversuchs nach der Beanspruchung

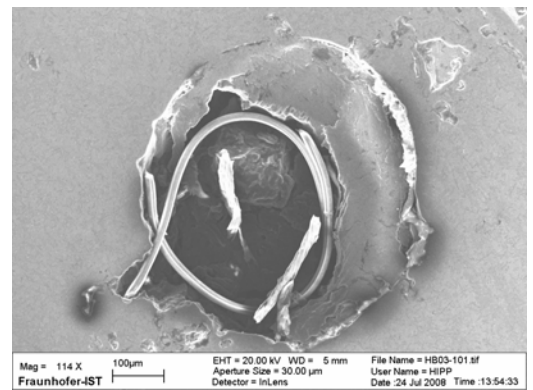


Abb. 2: REM- Aufnahme von Salzkristallenablagerungen in den Poren eines Verbinders aus Metallguss

### 3 Möglichkeiten der Nachweisführung

So vielfältig wie die Definitionen der Dauerhaftigkeit sein können, so vielfältig sind die Möglichkeiten der Nachweisführung. Prinzipiell kann jedoch in drei grundsätzlich voneinander zu unterscheidenden Verfahren eingeteilt werden:

- Erfahrung / Nachweis über bereits existierende Bausituationen
- Labortechnische Nachweiseverfahren
- Numerische Nachweiseverfahren

Die labortechnischen und die numerischen Verfahren werden beide unter dem Überbegriff der Umweltsimulation geführt. Da die Umweltsimulation ein überaus komplexes Gebiet darstellt, wurde im Jahr 1969 die Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. (GUS) gegründet. Sie ist die Fach-



organisation von Personen, Institutionen und Firmen, die auf dem Gebiet der Umweltsimulation arbeiten und fördert gemeinnützig die Entwicklung der Umweltsimulation, z.B. durch fachlichen Austausch. Sie vermittelt Kontakte zu Umweltlabors sowie zwischen Anwendern und Herstellern von Umweltsimulationseinrichtungen und der damit verbundenen Messtechnik.

Die Dauerhaftigkeit eines Holzbauteils hängt in hohem Maße vom klimatisch hervorgerufenen Feuchteverhalten ab. Materialfeuchteänderungen können zum einen Aufweichungen bewirken, die einen biologischen Befall und damit verbundenen Substanzabbau ermöglichen. Ab bestimmten Holzfeuchten, in der Regel deutlich über dem Fasersättigungsbereich, bauen Holz zerstörende Pilze die jeweiligen Holzbestandteile, zum Beispiel Zellulose oder Lignin, ab. Das Larvenwachstum Holz besiedelnder Insekten ist, neben der Temperatur, ebenfalls vom Holzfeuchtegehalt abhängig. Andererseits verursachen Materialfeuchteänderungen aufgrund der Hygroskopizität und polymeren Struktur des Holzes Volumenänderungen. Unterhalb des Fasersättigungsbereichs quellen Holz oder Holzwerkstoffe bei einer Aufweichung und schwinden bei einer Trocknung. Zur Beurteilung einer möglichen Dauerhaftigkeit einer Holzkonstruktion sind, neben vielen anderen, vor allem jedoch vorgenannte Punkte zu berücksichtigen.

### 3.1 Erfahrung / Nachweis über bereits existierende Bausituationen

Die Nachweisführung über die Erfahrung ist in vorangegangenen Jahrhunderten die einzig zur Verfügung stehende Möglichkeit gewesen. Bei der überschaubaren Anzahl unterschiedlicher Baustoffe und über Jahrhunderte gleichbleibender Baukultur war das Verfahren legitim. Auch das fehlende technische Wissen und Laborausstattung damaliger Zeit ließen keine anderen Möglichkeiten zu. Aber auch heute wird dieses

Verfahren zumindest noch hilfstellend verwendet. So werden z.B. Wärmedämmverbundsysteme im Holzbau, jeweils bei Beantragung der Verlängerung der Gültigkeitsdauer einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ), an bestehenden Objekten auf systematische Schäden untersucht, obwohl diese vor Erteilung der abZ einer intensiven Untersuchung im Labor unterzogen werden.

### 3.2 Labortechnische Nachweisverfahren

Die labortechnischen Nachweisverfahren bilden die wahrscheinlich vielfältigste Gruppe der möglichen Nachweisverfahren. Charakteristisch für diese Verfahren ist, dass die Verfahren für eine jeweilige Situation zugeschnitten und die Ergebnisse reproduzierbar sind, sowie eine relativ kurze Versuchsdauer haben. Prinzipiell können fast alle Laborverfahren, bei denen ein Material vor der eigentlichen (zerstörerischen) Prüfung der zu untersuchenden Eigenschaft einer thermischen, chemischen, biologischen, mechanischen oder anderweitig physikalischen (Feuchte) Behandlung unterzogen wird, in die Gruppe der labortechnischen Nachweisverfahren eingestuft werden.

Da die Aufzählung sämtlicher Verfahren den Rahmen hier sprengen und trotzdem niemals vollständig sein würde, werden nachstehend nur einige beispielhaft aufgeführt:

DIN EN ISO 9227, DIN EN 13528-3 und diverse weitere (sog. Salzsprühnebeltest)  
DIN EN 13354, DIN 321, ISO 16987, DIN 314, DIN EN 391 (Klebefestigkeit bei Holzwerkstoffen)  
DIN EN 12038, DIN EN 350 (Beständigkeit gegenüber Pilzen o.ä.)  
EOTA-Zyklen nach ETAG 004, sog. WKI-Zyklen (Wärmedämmverbundsysteme)  
DIN EN 12467 (Mineralische Plattenwerkstoffe)  
DIN EN 12793 (Glas im Bauwesen)  
DIN EN 12153, DIN EN 12155, DIN EN 12179, DIN EN 13050 (Vorhangfassaden)



Abb. 3: Verbindungsmittel nach Korrosionsprüfung

Zusätzlich zu den nahezu unzähligen genormten Verfahren werden permanent weitere Verfahren entwickelt, teilweise nur für einen bestimmten Untersuchungsschwerpunkt, der in keiner Norm abgebildet ist. So wurde vom WKI ein Verfahren entwickelt, das die Dauerhaftigkeit eines Außenputzes gegenüber Algenbefall ermittelt. Abb. 4 zeigt eine stark vereinfachte grafische Darstellung des multifaktoriellen Problems, das im Labor auf wenige relevante Faktoren reduziert werden muss und verdeutlicht somit die überaus komplexe Problematik der Entwicklung von Dauerhaftigkeitsversuchen.

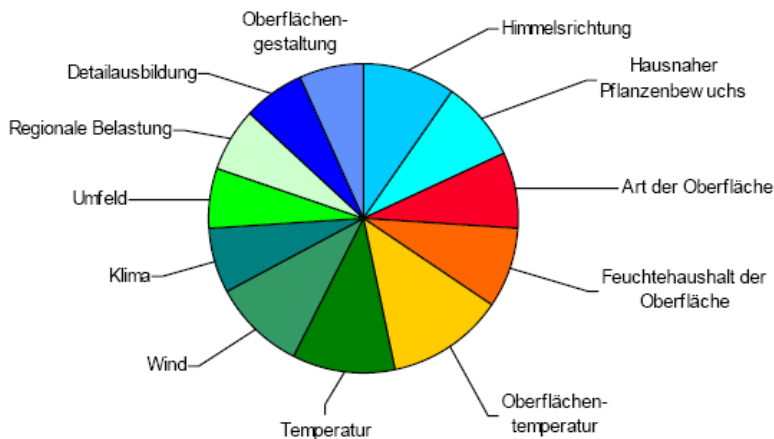


Abb. 4: Vereinfachte grafische Darstellung des multifaktoriellen Problems des Algenbewuchses auf Putzen

### 3.2 Numerische Nachweisverfahren

In der Umweltsimulation nimmt die Verwendung numerischer Simulationen zur Beurteilung zeitabhängiger Eigenschaftsänderungen von Materialien oder Bauteilen (und somit der Dauerhaftigkeit) an Bedeutung zu. Im Bauwesen werden auf der Basis grundlegender Arbeiten mehrere Computerprogramme zu numerischen Simulationen des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen eingesetzt. Die Ergebnisse dienen zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit, das heißt der Funktionsfähigkeit über die Nutzungsdauer und somit der Dauerhaftigkeit.

Ähnlich wie bei den labortechnischen Verfahren gibt es auch bei den numerischen Verfahren „Spezialisten“ und „Allrounder“. Während jedoch die standardisierten Laborverfahren mit gut ausgebildetem Laborpersonal durchführbar sind, da die Handlungsabläufe in der Regel detailliert vorgegeben sind, ist zur richtigen Verwendung der numerischen Verfahren ein detailliertes Spezialwissen erforderlich. Die Programme stellen ein hochkomplexes Handwerkzeug für den Ingenieur dar.

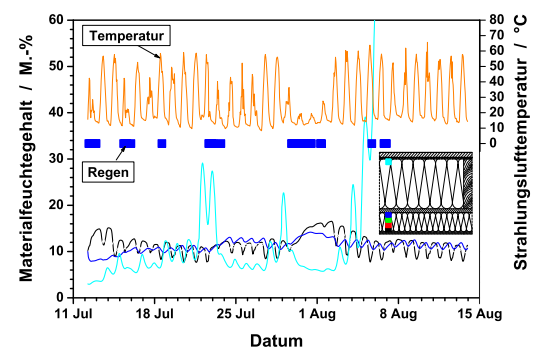


Abb. 5: Feuchteverläufe ausgesuchter Elemente einer Holztafelwand mit einem WDVS direkt befestigt auf Konstruktionshölzern über eine Sommerperiode unter Angabe der Strahlungslufttemperaturen und Regenereignisse

Die zunehmende Anwendung numerischer Verfahren ist vor allem begründet durch die Vorteile dieser im Vergleich zu labortechnischen Verfahren. Zudem werden die Berechnungen mit zunehmender Rechnerleistung schneller und können detaillierter ausgeführt werden. Mit Hilfe numerischer Verfahren sind schneller und zahlreichere Ergebnisse mit verhältnismäßig geringerem Aufwand als durch Experimente erzielbar. Nachteilig sind bei numerischen Verfahren die Abhängigkeit der Qualität der Ergebnisse von den Eingangsparametern für die Berechnungen sowie die Idealisierung und Reduzierung der komplexen Vorgänge der Realität auf wenige vereinfachte Wirkungsbeziehungen. Jedoch sind bei der experimentellen Untersuchung auch Vereinfachungen erforderlich und auch hier haben die Randbedingungen des Versuchs relativ großen Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

Die Vor- und Nachteile numerischer Verfahren sind auch bei der Beurteilung des Feuchteverhaltens von Holzbauteilen wieder zu finden. Stehen im Gegensatz zu Praxisuntersuchungen oder labortechnischen Bewitterungen die Rechenergebnisse nach Minuten oder Stunden zur Verfügung, sind häufig die Materialparameter nicht bekannt oder unterliegen hohen Streuungen, so dass die Aussagefähigkeit der Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren ist. Die Prognosegüte von Rechenergebnissen kann einerseits durch einen Vergleich mit Ergebnissen aus Experimenten validiert werden, andererseits können statistische Methoden zu einer besseren Interpretation numerischer Verfahren beitragen.

Die üblichen Computerprogramme berechnen gekoppelte instationäre Wärme- und Feuchteströme und berücksichtigen die in DIN EN 15026 aufgeführten Bedingungen zur Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Nach Einteilung eines Bauteils in definierte (finite) Elemente werden für jedes

Element bei jedem Rechenzeitschritt eine Wärmebilanz und eine Feuchtebilanz aufgestellt. Bei der Wärmebilanz muss die zeitliche Änderung der Enthalpie gleich der räumlichen Änderung des Wärmestroms sein, bei der Feuchtebilanz muss die Änderung der Feuchtekonzentration der räumlichen Änderung des Diffusionsstroms entsprechen. Die Wärmeströme werden aus der Fourier'schen Differentialgleichung abgeleitet, die Feuchteströme infolge Wasserdampfdiffusion nach den Fick'schen Gesetzen. Für den kapillaren Feuchte-transport wird das von Kiessl (1983) beschriebene Lösungsverfahren eingesetzt. Aus dem Wärmestrom wird infolge des Temperaturgefälles die Zustandsgröße Materialtemperatur und aus dem Diffusionsfeuchtestrom wird infolge des Partialdampfdruckgefälles über die Beziehung zwischen Sorptionsisotherme und Partialdampfdruck die Zustandsgröße Materialfeuchte berechnet. Bei der Kapillarleitung wird infolge des Konzentrationsgefälles über die Rohdichte ebenfalls die Zustandsgröße Materialfeuchte berechnet. Mit guten Rechenprogrammen können neben eindimensionalen auch zwei- und dreidimensionale Wärme- und Feuchteströme berechnet werden.

Für die Berechnung ist die Eingabe der Materialkennwerte und der Klimarandbedingungen erforderlich. Zu den Materialkennwerten zählen die Rohdichte, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die Kapillarleitfähigkeit sowie die Sorptionsisotherme. In der Regel berücksichtigen die Programme die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl.

Die Klimarandbedingungen Lufttemperatur, Taupunkttemperatur oder Luftfeuchte können entweder als Sinusfunktion vorgegeben oder aus Datensätzen eingelesen werden. Strahlungslufttemperaturen aus Sonnenstrahlung sowie Aufwech-

tungen infolge Schlagregens können ebenfalls als Klimalasten generiert werden. Zur Berechnung der Zustandsgrößen Materialtemperatur und –feuchte in den Randelementen des Bauteils werden die in der Bauphysik gebräuchlichen Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten verwendet.

Numerische Verfahren können sinnvoll als Ergänzung zu anderen Methoden zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Holzbauteilen eingesetzt werden. Für Holzbauteile berechnen numerische Simulationen den instationären, gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport. Die Güte der Rechenergebnisse sollte jedoch immer mit Messungen aus künstlichen Bewitterungsversuchen oder Praxismessungen überprüft werden. Ohne eine solche Validierung kann die Aussagewahrscheinlichkeit durch statistische oder stochastische Methoden verbessert werden.

Eine andere Grenze ist den numerischen Verfahren durch die Idealisierung und Reduzierung der komplexen Vorgänge der Realität auf wenige vereinfachte Wirkungsbeziehungen gesetzt. So sind zum Beispiel konvektiv verursachte Wärme- und Feuchtetransportvorgänge schwierig in die Gleichungssysteme für Wärmeleitung oder Wasserdampfdiffusion zu integrieren. Weiterhin besteht Entwicklungsbedarf bei der Kopplung von berechneten Materialtemperaturen und –feuchten mit hierdurch verursachten Verformungen.

Besonders gut geeignet sind numerische Simulationen, wenn nicht absolute Werte, zum Beispiel für Materialfeuchten, mit hoher Genauigkeit berechnet werden sollen, sondern wenn grundsätzliche Feuchtetransportphänomene und Abhängigkeiten des Feuchteverhaltens von Konstruktionsvarianten gezeigt werden sollen, da auch aufgrund der Rechnerleistungsfähigkeit in kurzer Zeit Ergebnisse erzielt werden.

#### Quellen

- [1] Manier, G.: Umweltbezogene numerische Wirkungssimulation. 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Umweltsimulation (GUS), Pfinztal bei Karlsruhe, 26.-28. März 2003
- [2] Kiessl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen – Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Essen, 1983
- [3] Häupl, P., Stopp, H.: Feuchtetransport in Baustoffen und Bauteilen. Dissertation, TU Dresden, 1987
- [4] Greubel, D.: Messen und Berechnen instationärer Feuchteströme durch Holzbaustoffe. WKI-Bericht, unveröffentlicht
- [5] Greubel, D.: Rechenmodelle und Simulationsversuche zur Beurteilung des feuchte-technischen Verhaltens von Bauteilen, Teil 2. wksb, H. 24, 1988, S. 42-45
- [6] Künzel, H.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [7] Herlyn, J.W.: Simulationsmodelle für Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen von Holzbauteilen durch künstliche Bewitterung. 32. Jahrestagung der GUS, Stutensee-Blankenloch bei Karlsruhe, 26.-28. März 2003
- [8] Richtlinie 3958 des Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltsimulation Grundlagen und Methoden, 12/1995
- [9] Kraus, E.: Untersuchung des Einflusses von Stoffkennwerten und Klimamodellvariationen bei der Berechnung instationärer Wärme- und Feuchteströme. Studienarbeit, Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI u. TU Braunschweig, 1999

- [10] Holm, A.; Gertis, K.: Bestimmung der Genauigkeit hygrothermischer Bauteilberechnungen mit Hilfe eines stochastischen Konzepts. Bauphysik 24, 2002, Heft 5, S. 273-281
- [11] Schliesing, S.: Numerische Simulation des Feuchteverhaltens moderner Wand- und Dachkonstruktionen in Holzbauart unter Variation der Bauteilgeometrien, Materialkennwerte und Klimarandbedingungen zur Ableitung repräsentativer experimenteller Bewitterungsversuche. Diplom-Arbeit, Fraunhofer-Institut für Holzforschung WKI u. Fachhochschule Eberswalde, 2003
- [12] DIN 68800-2 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau (1996-05)
- [13] Herlyn, J.W.; Rüter, N.: Ermittlung des Gefährdungsrisikos von Holzaußenbauteilen mit Plattenwerkstoffen infolge Schwind- und Quellverformungen anhand praxisnaher Untersuchungen. Abschlussbericht 2007. Fraunhofer IRB-Verlag
- [14] Herlyn, J.W.; Rüter, N.: Gefährdung von Holzkonstruktionen bei Verzicht auf wasserableitende Schichten in Außenwänden ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz nach DIN 68800-2. Abschlussbericht 2006. Fraunhofer IRB-Verlag