

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

# DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

## WANDAUFBAUTEN FÜR NIEDRIGENERGIEHÄUSER IN HOLZBAUWEISE

### BAUPHYSIKALISCHE UND ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG

Timber Wall Construction for Low-Energy-Houses  
Observed from a building physics und ecological standpoint

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

**Univ.Prof. DI Dr.techn. Andreas Kolbitsch**

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

**Univ. Ass. DI Dr.techn. Sinan Korjenic**

am

**Institut für Hochbau und Technologie**

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Renate Brocza**

**0026064**

Arndtstraße 42/R28

A – 1120 Wien

Wien, im Juni 2007

.....

Renate Brocza

## ***Danksagung***

Am Ende meiner Studienzeit angelangt, möchte ich mich bei jenen Leuten bedanken, die dazu beitrugen, dass ich die vergangenen Jahre in bester Erinnerung behalten werde. Dazu gehören vor allem die engagierten Professoren und Assistenten, die uns Studenten die zahlreichen Exkursionen im In- und Ausland ermöglichten und jene, die ihre Vorträge interessant gestalteten und immer Zeit fanden, um Fragen der Studenten zu beantworten.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen lieben Studienkolleginnen. Die gemeinsamen Stunden in der Bibliothek, beim Lernen, Diskutieren oder Tratschen, genauso wie unsere gemeinsamen Projekte und Reisen während der Studienzeit bleiben mir unvergesslich.

Bei Herrn Professor Kolbitsch und Herrn Korjenic möchte ich mich für die wertvollen Hinweise und Ratschläge bedanken, und vor allem, dass ich die Möglichkeit bekam, über dieses interessante Thema meine Arbeit zu verfassen.

Mein Dank gilt all jenen, die sich die Zeit nahmen, diese Arbeit Korrektur zu lesen, im Besonderen meiner Schwester.

Meinem Freund, der mich durch meine gesamte Studienzeit begleitet hat, danke ich für seine Liebe und sein Verständnis.

## **Zusammenfassung**

Holz zählt zu den ältesten Baustoffen der Menschheit. Die grundlegende Aufgabe der Häuser, Schutz vor Witterung zu bieten, hat sich nicht geändert, die Anforderungen an die Außenhülle sind – nicht zuletzt auf Grund der strengeren Vorschriften – heute jedoch wesentlich höher.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über unterschiedliche Holzbauweisen, die sich grundsätzlich für Außenwände von Niedrigenergiehäusern eignen. Es werden sowohl traditionelle als auch neue, innovative Systeme vorgestellt. Neben der bauphysikalischen Eignung eines Wandaufbaus wurde auch dessen Ökologie und Nachhaltigkeit beleuchtet.

Da die Auswahl des Dämmstoffs für die meisten Niedrigenergiehäuser entscheidend ist, befasst sich ein Kapitel mit den bauphysikalischen und ökologischen Eigenschaften von Dämmstoffen. Neben den konventionellen Vertretern, Mineralwolle und Polystyrol, werden vor allem nachwachsende Dämmmaterialien betrachtet.

Mit Hilfe der Computerprogramme THERM 5.2, WUFI und WUFI 2D wurde der Wärme- und Feuchtestrom von unterschiedlichen Wandaufbauten berechnet und die Ergebnisse zur Veranschaulichung graphisch dargestellt.

## **Abstract**

Timber is one of the oldest building materials used by mankind. The basic function of houses, that is, the protection against atmospheric conditions, has not changed, but the requirements on building envelopes are – also because of the stricter regulations – considerably higher today.

This paper gives an overview of different types of timber construction of external walls that are suitable for low-energy houses. Traditional systems, as well as more innovative ones, are discussed. Besides the suitability of buildings and the physics of wall construction, the ecology and sustainability are also considered.

As the choice of the insulation material is essential for most low-energy houses, one chapter deals with the structural and ecological characteristics. Besides the conventional types of insulation like mineral wool and polystyrene, the renewable insulations come under particular consideration.

By means of the computer programmes THERM 5.2, WUFI and WUFI 2D, the heat and the humidity flow of different constructions are calculated, and, for visualisation purposes, represented in the form of diagrams.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>7</b>
<b>I. GRUNDLAGEN</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ENERGIEEFFIZIENTE BAUWEISEN</b> .....	<b>8</b>
1.1 EINLEITUNG .....	8
1.2 DEFINITION NIEDRIGENERGIEBAUWEISE LAUT ÖNORM.....	9
1.3 BEGRIFFE UND DEFINITIONEN DER WIENER BAUORDNUNG .....	10
1.4 BEGRIFFE UND DEFINITIONEN DER OIB-RICHTLINIE 6.....	11
1.5 BEGRIFFE UND DEFINITIONEN DER WIENER WOHNBAUFÖRDERUNG .....	12
1.6 ENERGIEEINSPARVERORDNUNG IN DEUTSCHLAND .....	13
1.7 EUROPÄISCHE RICHTLINIE ÜBER DIE GESAMTENERGIEEFFIZIENZ VON GEBÄUDEN .....	14
1.7.1 ENTSTEHUNG UND UMSETZUNG IN ÖSTERREICH .....	14
1.7.2 ZIELE DER EPBD .....	15
<b>2 ANFORDERUNGEN AN WÄNDE</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 BAUPHYSIKALISCHE ANFORDERUNGEN</b> .....	<b>16</b>
2.1.1 WÄRMESCHUTZ.....	16
2.1.2 FEUCHTIGKEITSSCHUTZ .....	17
2.1.3 SCHALLSCHUTZ.....	17
2.1.4 BRANDSCHUTZ.....	18
<b>2.2 STATISCHE ANFORDERUNGEN</b> .....	<b>20</b>
<b>3 VOR- UND NACHTEILE DES BAUENS MIT HOLZ</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 TRAGFÄHIGKEIT</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 LANGLEBIGKEIT</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3 ÖKOLOGIE DES HOLZES</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4 WEITERE VORTEILE DES HOLZES</b> .....	<b>24</b>
<b>3.5 NACHTEILIGE EIGENSCHAFTEN DES HOLZES</b> .....	<b>25</b>
<b>4 BETRACHTUNG DER DÄMMSTOFFE</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1 BAUPHYSIKALISCHE VORTEILE VON NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN</b> .....	<b>25</b>
4.1.1 BRANDSCHUTZ.....	26
4.1.2 HYGROSKOPIZITÄT .....	26
4.1.3 SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ .....	27
<b>4.2 ÖKOINDEX 3 DER THERMISCHEN GEBÄUDEHÜLLE</b> .....	<b>27</b>
<b>4.3 ÖKOLOGISCHE UND BAUPHYSIKALISCHE BETRACHTUNG EINIGER DÄMMSTOFFE</b> .....	<b>30</b>
4.3.1 STEINWOLLE / GLASWOLLE .....	30

4.3.2	POLYSTYROL (EPS, XPS) .....	31
4.3.3	ZELLULOSE .....	32
4.3.4	FLACHS .....	33
4.3.5	HANF .....	34
4.3.6	HOLZFASERDÄMMSTOFFE .....	35
4.3.7	HOLZSPÄNE, LOSE .....	35
4.3.8	SCHAFWOLLE .....	36
4.3.9	KARTONWABENDÄMMUNG .....	37
4.3.10	KALZIUMSILIKATPLATTE .....	38
<b>4.4</b>	<b>LATENTER WÄRMESPEICHER - PCM .....</b>	<b>39</b>
<b>II.</b>	<b>WANDAUFBAUTEN .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>WANDAUFBAUTEN IN LEICHTBAUWEISE .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>BAUWEISEN DES HOLZLEICHTBAUS .....</b>	<b>41</b>
5.1.1	SKELETTBAUWEISE .....	41
5.1.2	RAHMENBAUWEISE .....	42
5.1.3	TAFELBAUWEISE .....	42
<b>5.2</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DES HOLZLEICHTBAUS .....</b>	<b>43</b>
5.2.1	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN .....	43
5.2.2	FEUCHTEMPFINDLICHKEIT .....	43
5.2.3	BRANDVERHALTEN .....	44
5.2.4	SCHALLSCHUTZ .....	44
<b>5.3</b>	<b>WEITERE VORTEILE UND NACHTEILE DES HOLZLEICHTBAUS .....</b>	<b>44</b>
5.3.1	VORFERTIGUNG .....	44
5.3.2	WERTVERLUST .....	45
5.3.3	RESSOURCENSCHONUNG .....	45
<b>5.4</b>	<b>MÖGLICHE AUFBAUTEN VON WÄNDEN IM LEICHTBAU .....</b>	<b>45</b>
5.4.1	SCHLANKER WANDAUFBAU .....	45
5.4.2	WANDAUFBAU MIT VOLLHOLZSCHALUNGEN .....	46
5.4.3	WANDAUFBAU MIT INSTALLATIONSEBENE .....	47
5.4.4	HINTERLÜFTETER WANDAUFBAU .....	48
<b>6</b>	<b>WANDAUFBAUTEN AUS MASSIVHOLZ .....</b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>BLOCKBAUWEISE .....</b>	<b>49</b>
6.1.1	HORIZONTALE BOHLEN .....	49
6.1.2	SENKRECHTE BOHLEN .....	50
<b>6.2</b>	<b>MASSIVE TAFELBAUWEISE .....</b>	<b>50</b>
6.2.1	VERLEIMTES BRETTSPERRHOLZ .....	50
6.2.2	VERDÜBELTES BRETTSPERRHOLZ .....	51
<b>6.3</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN MASSIVER HOLZWÄNDE .....</b>	<b>52</b>
6.3.1	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN .....	52
6.3.2	FEUCHTEMPFINDLICHKEIT .....	53
6.3.3	BRANDVERHALTEN .....	54

6.3.4	SCHALLSCHUTZ.....	54
<b>6.4</b>	<b>WEITERE VORTEILE UND NACHTEILE MASSIVER HOLZWÄNDE .....</b>	<b>55</b>
6.4.1	HOLZVERBRAUCH, TRANSPORT .....	55
6.4.2	BLOCKHÄUSER AUS DEM NORDEN .....	55
6.4.3	WOHNKLIMA.....	55
<b>6.5</b>	<b>MÖGLICHE WANDAUFBAUTEN IN BLOCKBAUWEISE.....</b>	<b>56</b>
6.5.1	BLOCKBOHLENWAND MIT ZWISCHENDÄMMUNG.....	56
6.5.2	BLOCKBOHLENWAND MIT INNENDÄMMUNG .....	56
6.5.3	BLOCKBOHLENWAND MIT AUßENDÄMMUNG .....	57
<b>6.6</b>	<b>MÖGLICHE WANDAUFBAUTEN IN MASSIVER TAFELBAUWEISE .....</b>	<b>58</b>
6.6.1	EINSCHALIGE MASSIVHOLZWAND.....	58
6.6.2	VERDÜBELTES BRETTSPERRHOLZ MIT ZWISCHEN- UND AUßENDÄMMUNG .....	59
6.6.3	VERLEIMTES BRETTSPERRHOLZ MIT AUßENDÄMMUNG .....	59
<b>7</b>	<b>HOLZMODUL-STECKSYSTEM.....</b>	<b>60</b>
<b>7.1</b>	<b>GESCHICHTE UND BESCHREIBUNG DES HOLZMODUL-STECKSYSTEMS .....</b>	<b>60</b>
<b>7.2</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DES HOLZMODUL-STECKSYSTEMS .....</b>	<b>61</b>
7.2.1	MATERIALKENNWERTE DES GRUNDELEMENTES.....	61
7.2.2	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN .....	61
7.2.3	FEUCHTEEMPFLINDLICHKEIT .....	62
7.2.4	BRANDVERHALTEN .....	62
7.2.5	SCHALLSCHUTZ.....	63
<b>7.3</b>	<b>WEITERE VORTEILE UND NACHTEILE DER „STEKO-WAND“ .....</b>	<b>63</b>
7.3.1	PLANUNG UND AUFBAU.....	63
7.3.2	MAßGENAUIGKEIT UND TRAGVERHALTEN .....	63
7.3.3	GESTALTUNGSFREIHEIT .....	63
7.3.4	NACHTEILE EINES NEUEN BAUSYSTEMS .....	64
<b>7.4</b>	<b>MÖGLICHE WANDAUFBAUTEN DES HOLZMODUL-STECKSYSTEMS.....</b>	<b>64</b>
7.4.1	„STEKO-WAND“ MIT VERPUTZTER FASSADE.....	64
7.4.2	„STEKO-WAND“ MIT HINTERLÜFTETER FASSADE UND INSTALLATIONSEBENE.....	65
<b>8</b>	<b>WANDAUFBAUTEN MIT STROHBALLENDÄMMUNG.....</b>	<b>66</b>
<b>8.1</b>	<b>GESCHICHTE DER STROHBALLENHÄUSER.....</b>	<b>66</b>
8.1.1	ENTSTEHUNG DER STROHBALLENHÄUSER IN DEN USA.....	66
8.1.2	DER STROHBALLENSHAUSBAU IN EUROPA .....	67
8.1.3	TRAGENDE VERSUS NICHT-TRAGENDE STROHBALLENWÄNDE .....	68
<b>8.2</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DER STROHBALLEN .....</b>	<b>69</b>
8.2.1	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN.....	69
8.2.2	FEUCHTEEMPFLINDLICHKEIT .....	69
8.2.3	BRANDVERHALTEN .....	71
8.2.4	SCHALLSCHUTZ.....	71
<b>8.3</b>	<b>WEITERE VORTEILE UND NACHTEILE DER STROHBALLENWÄNDE .....</b>	<b>72</b>
8.3.1	KOSTEN.....	72
8.3.2	ÖKOLOGIE .....	72

8.3.3	INDIVIDUALITÄT UND LOW-TEC .....	73
8.3.4	ERDBEBENSICHERHEIT .....	73
8.3.5	NACHTEILE DER STROHDÄMMUNG .....	74
<b>8.4</b>	<b>MÖGLICHE AUFBAUTEN VON STROHBALLENWÄNDE .....</b>	<b>74</b>
8.4.1	WANDAUFBAU MIT SCHILFPLATTE .....	74
8.4.2	WANDAUFBAU MIT MAGNESITGEBUNDEN HOLZWOLLEPLATTEN .....	75
8.4.3	HINTERLÜFTETER WANDAUFBAU MIT TRAGENDEN KLH-PLATTEN .....	76
<b>9</b>	<b>WANDAUFBAUTEN MIT VAKUUMDÄMMUNG .....</b>	<b>78</b>
<b>9.1</b>	<b>BESCHREIBUNG DER VAKUUMDÄMMUNG .....</b>	<b>78</b>
<b>9.2</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DER VAKUUMDÄMMUNG .....</b>	<b>79</b>
9.2.1	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN .....	79
9.2.2	FEUCHTEEMPFLINDLICHKEIT .....	80
9.2.3	BRANDVERHALTEN .....	80
9.2.4	SCHALLSCHUTZ .....	80
<b>9.3</b>	<b>WEITERE VORTEILE UND NACHTEILE DER VAKUUMDÄMMUNG .....</b>	<b>80</b>
9.3.1	PLATZGEWINN .....	80
9.3.2	FERTIGUNG UND PREIS .....	81
9.3.3	ÖKOLOGIE .....	81
9.3.4	PROTOTYP – CHARAKTER .....	82
<b>9.4</b>	<b>MÖGLICHE AUFBAUTEN VON WÄNDEN MIT VAKUUMDÄMMUNG .....</b>	<b>82</b>
9.4.1	WAND MIT „QASA-ELEMENT“ IN HOLZSANDWICHKONSTRUKTION .....	82
9.4.2	WAND AUS BRETTSPERRHOLZ UND VAKUUMDÄMMUNG .....	83
<b>10</b>	<b>BAUPHYSIKALISCHE BERECHNUNGEN .....</b>	<b>84</b>
<b>10.1</b>	<b>BERECHNUNG DES WÄRMEFLUSSES .....</b>	<b>84</b>
<b>10.2</b>	<b>BERECHNUNG DES FEUCHTETRANSPORTES .....</b>	<b>86</b>
10.2.1	FEUCHTEGEHALT VON LEICHTBAUWÄNDEN .....	86
10.2.2	FEUCHTEGEHALT VON MASSIVEN HOLZWÄNDEN .....	88
10.2.3	FEUCHTEGEHALT EINER STROHBALLENWAND .....	90
10.2.4	FEUCHTEGEHALT EINER MASSIVEN HOLZWAND MIT VAKUUMDÄMMUNG .....	91
<b>III.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>92</b>
<b>IV.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>94</b>
<b>11</b>	<b>ALLGEMEINE BAUTEILANFORDERUNGEN DES BRANDSCHUTZES .....</b>	<b>94</b>
<b>12</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>96</b>
<b>13</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....</b>	<b>101</b>

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

$A_B$	Fläche der thermischen Hülle (Oberfläche)
BGF	Konditionierte Brutto-Grundfläche, Bruttogeschoßfläche
BSH	Brettschichtholz (Leimholz)
BSP	Brettsperrholz
EAVG	Energieausweis-Vorlage-Gesetz
E-Modul	Elastizitätsmodul
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive Europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
EPS	Expandiertes Polystyrol
ESG	Einscheibensicherheitsglas
EV	Energieverbrauch
GFK	Gipskartonfeuerschutzplatte
HGT	Heizgradtage
HWB	Jährlicher Heizwärmebedarf
$HWB_{BGF}$	Jährlicher Heizwärmebedarf bezogen auf die konditionierte Bruttogrundfläche
$HWB_{BGF, WG, Ref}$	Jährlicher Heizwärmebedarf für Wohngebäude - Neubau bezogen auf die konditionierte Brutto-Grundfläche und das Referenzklima
IBO	Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie
KLH	Kreuzlagenholz (geschützter Markenname für BSP)
$l_c$	Charakteristische Länge eines Gebäudes, $l_c = V_B / A_B$
LEK-Wert	Linie europäischer Kriterien Kennlinie/Kennwert für den Wärmeschutz der Gebäudehülle
$LEK_{eq}$	Äquivalenter LEK-Wert berücksichtigt neben der Geometrie des Hauses auch Standortbedingungen
MDF	Mitteldichte Faserplatte
NEH	Niedrigenergiegebäude
$n_{50}$ -Wert	Luftwechselrate gemessen bei 50 Pa Druckdifferenz zwischen innen und außen
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
OSB-Platte	Oriented strand board, Platte aus parallel zur Oberfläche liegenden Holzspänen
PCM	Phase Changing Material / Latenter Wärmespeicher
PVC	Polyvinylchlorid
$R_w$	Bewertetes Schalldämmmaß
$s_d$ -Wert	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
$V, V_B$	Konditioniertes Brutto-Volumen eines Gebäudes/Bauteils
VIP	Vakuuminisationspaneel
XPS	Extrudiertes Polystyrol
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit

## I. Grundlagen

### 1 ENERGIEEFFIZIENTE BAUWEISEN

#### 1.1 Einleitung

In Österreich fallen bis zu 35% der Endenergie in den Bereich der Raumwärme [Österreichische Energieagentur, 2007]. Betrachtet man den Energieverbrauch von privaten Haushalten in Deutschland, so werden etwa 30% für Verkehr und etwa 50% für die Heizung aufgewendet [Baratta, 2005]. Obwohl die Vorschriften bezüglich der thermischen Hülle eines Hauses immer strenger wurden, stieg der Bruttoinlandsverbrauch an Energie in Österreich stetig an, seit den 1970er Jahren bis zum Jahr 2004 um etwa 75% [Österreichische Energieagentur, 2007].

Dies hat mehrere Gründe: Wie die Abbildung 1-1 zeigt, korreliert das Bruttoinlandsprodukt eindeutig mit dem Energieverbrauch. Der Wohlstand und somit die Nachfrage von Gütern und Dienstleistungen nehmen ebenso wie die durchschnittliche Wohnfläche pro Einwohner zu. Daher steigt auch der Heizenergiebedarf pro Person stetig an. Außerdem entfallen nur ein geringer Teil der bestehenden Gebäude auf energieoptimierte Neubauten, der überwiegende Teil sind ältere Bauwerke, die eine thermische Sanierung dringend notwendig hätten.

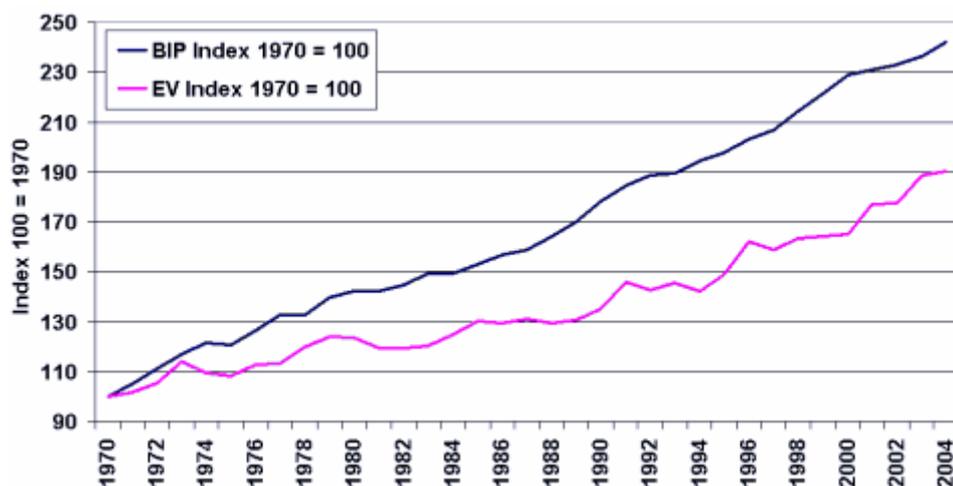


Abb. 1-1 Energieverbrauch in Österreich [Österr. Energieagentur]

Weiters müssen bei energieeffizienten Neubauten auch andere Größen in Betracht gezogen werden, wie etwa der Verbrauch für Beleuchtung oder Kühlung der Raumluft im Sommer (auf die man in unseren Breiten mit einer intelligenten Architektur und entsprechendem Nutzerverhalten gänzlich verzichten könnte). Aber auch der Standort eines Hauses ist ausschlaggebend: ein Passivhaus, das abseits jeder Infrastruktur liegt, und dessen Bewohner für alle täglichen Aktivitäten (Einkauf, Arbeit, Freizeit) das Auto benutzen, wird wenig zum Klimaschutz beitragen, obwohl sein Heizwärmebedarf äußerst gering ist. Ob aus ökologischer Sicht für Neubauten, dessen infrastrukturelle Erschließung hohen Energie- und

Baumaterialieneinsatz erfordert, überhaupt eine Förderung gewährt werden soll, ist in Frage zu stellen. Dieser Aspekt wird jedoch in vorliegender Arbeit nicht weiter behandelt.

Auch die verwendeten Baustoffe sind entscheidend für die ökologische Beurteilung eines Hauses. Nicht nur deren Herstellung, sondern auch deren mögliches Recycling, die Entsorgung und nicht zuletzt das gesundheitsschädigende Potential eines Stoffes sind bei der ökologischen Betrachtung relevant.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich nur mit einigen Teilaspekten des energieeffizienten Bauens, nämlich hauptsächlich mit der Reduktion des Heizwärmebedarfs unter Verwendung von ökologischen Baumaterialien bei Neubauten. Andere Aspekte, wie etwa die Wirtschaftlichkeit oder Life-Cycle-Betrachtungen werden mitunter kurz angeschnitten, sind aber nicht Thema dieser Arbeit.

## 1.2 Definition Niedrigenergiebauweise laut ÖNORM

Die ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01 (Vornorm): „Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5: Niedrig- und Niedrigstenergie-Gebäude“ befasst sich mit den Anforderungen und Nachweisverfahren von Niedrigenergie-, Niedrigstenergie- und Passivhäusern. Die Norm ist im Dezember 2002 erschienen, jedoch nur als Vornorm, da „die Entwicklungen auf diesem Fachgebiet noch im Fluss sind und weitere praktische Erfahrungen abgewartet werden sollen“ [ÖNORM B 8110-5, 2002].

Die besagte ÖNORM beschreibt Niedrig- und Niedrigstenergiegebäude mit dem maximal zulässigen Höchstwert des Heizwärmebedarfs pro Bruttogeschoßfläche und Jahr ( $HWB_{BGF}$ ) in  $kWh/m^2$  bzw. dem  $LEK_{eq}$ -Wert [dimensionslos]. Der höchst zulässige  $HWB_{BGF}$ , hängt von der Geometrie des Gebäudes ab, welche mit der charakteristischen Länge ( $l_c$ ), die das Verhältnis des beheizten Brutto-Volumens zur umschließenden Oberfläche (=Gebäudehüllfläche) angibt, beschrieben wird. Demnach ergibt sich, dass ein Haus, dessen Geometrie ungünstiger ist, d.h. mehr wärmeabgebende Oberfläche zur vorhandenen Bruttogeschoßfläche besitzt, einen höheren zulässigen Heizwärmebedarf haben darf.

**Tabelle 1–1  $HWB_{BGF,zul}$  gemäß [ÖNORM B 8110-5, 2002]**

	$HWB_{BGF,zul}$ [ $kWh/m^2a$ ]
Niedrigenergiegebäude	$16 \times (1+2/l_c)$
Niedrigstenergiegebäude	$8 \times (1+2/l_c)$

**Tabelle 1–2  $LEK_{eq,zul}$  gemäß [ÖNORM B 8110-5, 2002]**

	$LEK_{eq,zul}$ [-]
Niedrigenergiegebäude	$20 \times \frac{3400}{HGT_{STANDORT}}$
Niedrigstenergiegebäude	$10 \times \frac{3400}{HGT_{STANDORT}}$

Der äquivalente LEK-Wert „kennzeichnet den jährlichen Heizwärmebedarf des Gebäudes in Form des äquivalenten Wärmeschutzes der Gebäudehülle, wobei die Wirkung von Widmungs- und Standortfaktoren berücksichtigt wird“ [Dreyer, 2004]. Die Berechnung des LEK-Werts und des äquivalenten LEK-Wertes ist in der ÖNORM B 8110-1: 2004-12-01 geregelt.

Weiters muss die Dichtheit der Gebäudehülle mit Hilfe des „Blower Door“-Verfahrens nachgewiesen werden. Bei Messung der Dichtheit der Gebäudehülle nach [ÖNORM EN 13829, 2001] bei einer Referenzdruckdifferenz von 50 Pa dürfen folgende Grenzwerte nicht überschritten werden:

**Tabelle 1–3 Grenzwerte für den Luftwechsel [ÖNORM B 8110-5, 2002]**

	Grenzwerte für den Luftwechsel
Niedrigenergiegebäude (ohne mech. Belüftung)	$n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$
Niedrigenergiegebäude (mit mech. Belüftung)	$n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$
Niedrigstenergiegebäude (bei Wärmerückgewinnung)	$n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$

Im April 2007 veröffentlichte das Österreichische Normungsinstitut den Entwurf der ÖNORM B 8110-5: „Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile“. Diese Norm enthält jedoch keine Bestimmungen über Niedrig- und Niedrigstenergiegebäude, sondern hauptsächlich Klimadaten verschiedener Regionen. Der Inhalt der Vornorm ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01 wird auf Grund dessen Wichtigkeit in den ersten Teil der ÖNORM B 8110 integriert. Diese Norm ist zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Diplomarbeit noch in Vorbereitung. Im Vorschlag zur ÖNORM B 8110-1: 2007-03-15 ist der höchstzulässige HWB bezogen auf die BGF und bezogen auf das Brutto-Gebäudevolumen jeweils für Niedrigenergie- und Niedrigstenergiegebäude angegeben. Die Werte liegen höher als diese in der Vornorm ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01 angegeben wurden.

Weiters enthält der Vorschlag zur ÖNORM B 8110-1: 2007-03-15 den höchstzulässigen  $\text{HWB}_{\text{BGF,Ref}}$  sowie die höchstzulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten der unterschiedlichen Bauteile. Diese Werte betreffen alle Neubauten und korrespondierten mit jenen der OIB-Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“ (siehe Kapitel 1.4).

### 1.3 Begriffe und Definitionen der Wiener Bauordnung

In der Wiener Bauordnung ist der Begriff „Niedrigenergiegebäude“ nicht erwähnt. Ein Passivhaus ist hingegen laut Wiener Bauordnung § 112 (1) genau definiert und – konform mit der ÖNORM B 8110-1: 2004-12-01 – ein Gebäude, dessen  $\text{HWB}_{\text{BGF}}$  geringer als 15 kWh ist. Zusätzlich darf ein Passivhaus nur maximal 10 W/m<sup>2</sup> Heizenergie pro Quadratmeter Nettogeschossfläche und Jahr benötigen [Moritz, 2007].

Die Wiener Bauordnung schreibt Grenzwerte der U-Werte für alle Neubauten vor. Diese liegen, verglichen mit U-Werten von Niedrigenergiehäusern, relativ hoch (Tabelle 1-4).

**Tabelle 1–4 Höchstzulässige U-Werte gemäß Wr. Bauordnung** [Moritz, 2007]

Bauteil	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
Außenwand	< 0,50
Dach bzw. Decke zu Außenluft und Dachboden	< 0,25
Kellerdecke bzw. erdberührter Fußboden	< 0,50
Fenster, Türen	< 1,90

Zusätzlich müssen laut Wiener Bauordnung die Grenzwerte für den spezifischen Transmissionswärmeverlust, der vom beheizten Volumen abhängt und zwischen 0,36 und 0,23 W/m<sup>3</sup>K beträgt, eingehalten werden.

## 1.4 Begriffe und Definitionen der OIB-Richtlinie 6

Zum vorliegenden Zeitpunkt besitzt jedes Bundesland seine eigene Bauordnung. Mit der Erklärung einer rechtlichen Verbindlichkeit der OIB-Richtlinien, welche den Bundesländern vorbehalten ist, soll dies geändert werden. Die OIB-Richtlinien basieren „auf den Beratungsergebnissen der eingesetzten Länderexpertengruppe zur Ausarbeitung eines Vorschlages zur Harmonisierung bautechnischer Vorschriften“ [OIB-Richtlinie 6, 2007] und wurden im April 2007 in der Generalversammlung des OIB unter Anwesenheit der Vertreter aller Bundesländer beschlossen. Der genaue Zeitpunkt des Inkrafttretens der rechtlichen Verbindlichkeit ist noch nicht bekannt.

Die OIB-Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“ hat weiters die Aufgabe, die Vorgaben der EPBD (siehe Kapitel 1.6.2) in nationales Recht umsetzen [OIB, 2007].

Der Begriff Niedrigenergiehaus wird in der OIB-Richtlinie 6 nicht erwähnt. Es werden jedoch Anforderungen bezüglich des Heizwärmebedarfs, des LEK-Wertes und des Endenergiebedarfs von Neubauten und sanierten Gebäuden gestellt. Ab 2010 werden die höchst zulässigen Werte einmalig herabgesetzt. Die Formel des  $HWB_{BGF,zul,Ref}$  wird zusätzlich leicht angepasst um „für das strengere Anforderungsniveau ab 2010 die Ausgewogenheit zwischen Einfamilienhäuser und großvolumigen Wohngebäuden sicherzustellen“ [OIB, 2007 A]. Eine absolute Obergrenze der  $HWB_{BGF,zul,Ref}$  wird angegeben, „um zu verhindern dass insbesondere bei kleinen Gebäuden unkompakte Bauweise [...] belohnt wird“ [OIB, 2007 A]. Der zulässige Heizwärmebedarf der OIB-Richtlinie 6 ist neben der Geometrie auch vom Klima abhängig. Die Werte der Tabelle 1-5 gelten für Neubauten und beziehen sich auf das Referenzklima gemäß OIB-Leitfaden, welches einem Gebäudestandort mit einer jährlichen HGT-Anzahl von 3400 entspricht.

**Tabelle 1–5  $HWB_{BGF,WG,zul,Ref}$  gemäß** [OIB-Richtlinie 6, 2007]

	$HWB_{BGF,WG,zul,Ref}$ [kWh/m <sup>2</sup> a]	Höchster zul. Wert [kWh/m <sup>2</sup> a]
ab Inkrafttreten bis 31.12.2009	$26 \times (1+2/l_c)$	78
ab 1.1.2010	$19 \times (1+2,5/l_c)$	66,5

Verfügt das Gebäude über eine Wohnraumlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung so reduziert sich der  $HWB_{BGF,zul,Ref}$  um  $8 \text{ kW/m}^2\text{a}$ .

Zusätzlich zu den Anforderungen an den Heizwärmebedarf können laut OIB-Richtlinie Anforderungen an den maximal zulässigen LEK-Wert gestellt werden. Von Inkrafttreten der Richtlinie bis 31.12.2009 beträgt dieser 32, danach 27. Der äquivalente LEK-Wert für Neubauten (in der Richtlinie mit  $LEK_{Standort}$  benannt) errechnet sich in Anlehnung an die ÖNORM B 8110-5: 2002-12-1 gemäß Formel (1).

$$LEK_{Standort} = LEK_{max} \frac{3400}{HGT_{Standort}} \quad (1)$$

Der zulässige Endenergiebedarf EEB ist ebenfalls in der OIB- Richtlinie 6 angegeben und beinhaltet den Heizwärmebedarf, den Warmwasserwärmebedarf und den Heiztechnikenergiebedarf und ist laut OIB-Leitfaden zu berechnen.

Des Weiteren enthält die Richtlinie Bestimmungen über die höchst zulässigen U-Werte von wärmeübertragenden Bauteilen, welche deutlich geringer als in der noch gültigen Wiener Bauordnung ausfallen. Die wichtigsten Werte sind in Tabelle 1-6 zusammengefasst

**Tabelle 1–6 Höchstzulässige U-Werte gemäß [OIB-Richtlinie 6, 2007]**

Bauteil	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
Wand gegen Außenluft und unbeheizten Dachraum	< 0,35
Decke gegen Außenluft und Dachboden (durchlüftet od. ungedämmt), Dachschräge	< 0,20
Decke gegen unbeheizte Gebäudeteile bzw. erdberührter Fußboden, erdberührte Wand	< 0,40
Fenster, Fenstertüren	< 1,70

Die Berechnung des Energieausweises gemäß EPDB ist ebenfalls in der OIB-Richtlinie 6 geregelt.

## 1.5 Begriffe und Definitionen der Wiener Wohnbauförderung

Die Begriffe Niedrigenergiehaus und Niedrigenergiehaus-Plus sind im Zusammenhang mit der Förderung, die die Wiener Magistratsabteilung 50 gewährt, von Bedeutung. Um eine Förderung für ein Niedrigenergiehaus oder Niedrigenergiehaus-Plus zu erlangen, ist der  $HWB_{BGF}$  ausschlaggebend. Der zulässige Wert für ein Niedrigenergiehaus laut MA 50 liegt höher als jener der ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01. Ein Niedrigenergiehaus laut ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01 entspricht laut den Förderungsbestimmungen der MA 50 schon einem Niedrigenergiehaus-Plus.

**Tabelle 1–7 HWB<sub>BGF,zul</sub> gemäß Wr. Wohnbauförderung [MA 50, 2004]**

	HWB <sub>BGF,zul</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]
Niedrigenergiehaus	20 x (1+2/l <sub>c</sub> )
Niedrigenergiehaus-Plus	16 x (1+2/l <sub>c</sub> )

Die U-Werte der Wände unterliegen keinem Grenzwert, doch empfiehlt die MA 50 folgende Werte für die Gebäudehülle eines Niedrigenergiehauses:

**Tabelle 1–8 Höchstzulässige U-Werte gemäß Wr. Wohnbauförderung [MA 50, 2004]**

Bauteil	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
Außenwand	< 0,25
Dach bzw. Decke zu Außenluft und Dachboden	< 0,20
Kellerdecke bzw. erdberührter Fußboden	< 0,30
Fenster/Türen	< 1,30

Weitere Anforderungen zur Erlangung der Förderung eines Niedrigenergiehauses sind:

- **Der Einsatz ökologischer Baustoffe:** Wobei hier der Begriff „ökologisch“ übertrieben erscheint, da nur das Verbot von treibhauswirksamen Wärmedämmstoffen und Montageschäumen und von Polyvinylchlorid (PVC) in Fensterkonstruktionen vorgeschrieben wird.
- **Luftdichte Gebäudehülle:** Bei Gebäuden mit mechanischer Zu- und Abluftanlage und Wärmerückgewinnung ist der n<sub>50</sub>-Wert, der die Luftwechselrate bei einer Differenz von innerem und äußerem Luftdruck von 50 Pa beschreibt, unter 1,5 h<sup>-1</sup> zu halten. Bei allen Niedrigenergiegebäuden muss die Gebäudedichtheit mittels Differenzdruckmessung gemäß ÖNORM EN 13829 nachgewiesen werden.
- **Vermeidung von Wärmebrücken:** Der Einfluss von konstruktiven Wärmebrücken ist so gering wie möglich zu halten.

In Wien muss im Geschoßwohnbau jedes neu errichtete Wohngebäude dem Niedrigenergiestandard entsprechen. Im kleinvolumigen Hausbau gibt es für diesen Standard finanzielle Anreize.

Die Anforderungen an Niedrigenergiehäuser in den übrigen Bundesländern unterscheiden sich leicht von jenen in Wien. Im Allgemeinen sowie auch in der Literatur wird von einem Niedrigenergiehaus gesprochen, wenn der HWB<sub>BGF</sub> zwischen 25 und 50 kWh/m<sup>2</sup>a liegt.

## 1.6 Energieeinsparverordnung in Deutschland

Auch in Deutschland gibt es keine allgemein gültige Definition des Begriffs „Niedrigenergiehaus“. In der Energieeinsparverordnung von 2004 sind jedoch Mindestanforderungen für Neubauten angegeben, wobei nicht nur der Heizwärmebedarf sondern der gesamte Jahresprimärenergiebedarf, also u. a. auch die Energie, die für die

Warmwassererwärmung aufgewendet wird, ausschlaggebend ist. Außerdem sind auch Obergrenzen des U-Wertes der verschiedenen Gebäudeteile angegeben, die aber verglichen mit den empfohlenen Werten für Niedrigenergiehäuser höher sind, jedoch etwas strenger als die Wiener Bauordnung.

## 1.7 Europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

### 1.7.1 Entstehung und Umsetzung in Österreich

Bereits im Mai 2001 legte die Europäische Kommission einen ersten, ambitionierten Entwurf zur Gebäude-Richtlinie vor. Nach einigen Diskussionen und Abänderungen wurde schließlich am 16. Dezember 2002 die EU-Richtlinie 2002/91/EG „Energy Performance of Buildings Directive“, kurz EPBD, verabschiedet und hätte bis zum 1. Jänner 2006 in nationales Recht umgewandelt werden müssen. Dies ist jedoch nicht geschehen.

Erst im August 2006 wurde in Österreich das Energieausweis-Vorlage-Gesetz, kurz EAVG, erlassen, welches die Umsetzung der EPBD hätte regeln sollen. Der Paragraph 3 des EAVG besagt, dass bei Verkauf oder Vermietung einer Immobilie ein höchstens 10 Jahre alter Energieausweis vorzulegen ist. Doch der Paragraph 5 dieses Gesetzes mit dem Titel „Rechtsfolge unterlassener Vorlage“, macht oben genannten Paragraphen de facto wirkungslos, da geschrieben steht, dass bei Nichteinhaltung keine Konsequenzen zu erwarten sind. Wörtlich zitiert:

„§ 5. Wird dem Käufer oder Bestandnehmer entgegen § 3 nicht bis spätestens zur Abgabe seiner Vertragserklärung ein Energieausweis vorgelegt, so gilt zumindest eine dem Alter und der Art des Gebäudes entsprechende Gesamtenergieeffizienz als vereinbart“ [BGBl. 1 Nr. 137/2006]

Dieses Gesetz tritt spätestens am 1. Jänner 2008 in Kraft. Die Umsetzung der Europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden ist jedoch mit diesem Gesetz noch nicht erfolgt, sondern erst wenn die Bestimmungen der OIB-Richtlinie 6 (siehe Kapitel 1.4) als Gesetz verabschiedet werden.

In Wien gelten ab 2008 strengere Richtlinien als das EAVG vorschreibt. Ab diesem Zeitpunkt müssen nämlich für alle Neubauten und Sanierungen Energieausweise ausgestellt werden. Bei Verkauf oder Vermietung bestehender Gebäude wird der Energieausweis ab dem Jahr 2009 verpflichtend. Einerseits ist diese Vorreiterrolle in Wien zwar begrüßenswert, andererseits, so Martin Treberspurg, Professor am Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur und gleichzeitig Projektleiter der Arbeitsgruppe für ressourcenorientiertes Bauen, „sind die Ausweise nicht mehr vergleichbar [...], wenn jedes Bundesland seine eigenen Berechnungsvorschriften umsetzt“ [Rösner, 2006].

### 1.7.2 Ziele der EPBD

„Ziel dieser Richtlinie ist es, die Verbesserungen der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kostenwirksamkeit zu unterstützen“ [EU-Richtlinie 2002/91/EG].

Dadurch sollen neben der Vergleichbarkeit der Gebäude und deren Energieeffizienz die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Heizung, Kühlung und durch andere haustechnische Anlagen entstehen, reduziert werden, um dem Ziel der im Rahmen des Kyoto-Protokolls vereinbarten Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes näher zu kommen.

Die Richtlinie enthält unter anderem Anforderungen hinsichtlich

- „der Anwendung von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer Gebäude“ sowie „bestehender großer Gebäude, die einer größeren Renovierung unterzogen werden sollen“
- „der Erstellung von Energieausweisen für Gebäude und
- regelmäßiger Inspektion von Heizkesseln und Klimaanlage in Gebäuden und einer Überprüfung der gesamten Heizungsanlage, wenn deren Kessel älter als 15 Jahre sind“ (EU-Richtlinie 2002/91/EG, 2002).

Über die tatsächlichen Mindestanforderungen, wie höchst zulässige U-Werte und maximaler Heizwärmebedarf sagt die Richtlinie nichts aus, sondern schreibt vor, dass diese von den Mitgliedstaaten selbst festgelegt werden müssen.

Bezüglich der Energieausweise schreibt die Richtlinie vor, dass bei jedem Bau, jedem Verkauf und bei jeder Vermietung eines Gebäudes dem Eigentümer bzw. dem potentiellen Käufer oder Mieter ein Energieausweis vorgelegt werden muss, der nicht älter als 10 Jahre ist. Jedem Energieausweis sind außerdem Empfehlungen zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz beizufügen. Ein Energieausweis enthält nicht nur Angaben über die Heizenergie sondern über den gesamten Energieverbrauch, der im Laufe des Jahres bei Nutzung des Gebäudes anfällt. Mit eingerechnet werden daher unter anderem die benötigte Energie für Beleuchtung, technische Geräte, Wirkungsgrad der Heizung und Kühlenergie, sodass sich eine Schätzung der Gesamtenergiekosten leicht erstellen lässt. Vor allem die Kühlenergie stieg in den letzten Jahren auf Grund der weit verbreiteten Glasarchitektur (verglaste Bürokomplexe und Hochhäuser ohne außen liegender Verschattung, Glashallen und -atrien,...) stark an. Diese brachte zwar repräsentative Gebäude hervor, die Bauphysik – im Besonderen der sommerliche Wärmeschutz – wurde jedoch in vielen Fällen vernachlässigt. Nicht selten verbrauchen diese Gebäude mehr Energie zur Kühlung als im Winter zur Heizung.

Die in der EPBD erwähnte Inspektion von Heizkesseln betrifft nur jene, welche nicht mit erneuerbaren Brennstoffen befeuert werden. Bei der Inspektion von Klimaanlage sind jene ausgenommen, deren Nennleistung kleiner als 12 kW ist.

Weiters ist im Artikel 10 der EPBD festgeschrieben, dass die Erstellung der Energieausweise und die Durchführung der Inspektionen nur von unabhängigen qualifizierten und/oder zugelassenen Fachleuten durchgeführt werden darf.

Die Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht hätte – wie oben erwähnt – mit 4. Jänner 2006 erfolgen müssen. In jenen Ländern, in denen nicht ausreichend Fachpersonal zur Verfügung steht, kann diese Frist um längstens drei Jahre verschoben werden. Ob die tatsächliche Umsetzung in allen Mitgliedsländern bis Jänner 2009 erfolgt, bleibt abzuwarten.

## 2 ANFORDERUNGEN AN WÄNDE

Die Aufgabe jeder Wand ist es, gemeinsam mit Decke und Fußboden Räume zu bilden und diese vor unerwünschten Einflüssen der Umwelt zu schützen (bauphysikalische Anforderung). Weiters kann eine Wand tragende und/oder aussteifende Funktionen übernehmen. Grundsätzlich unterscheidet man nach der Lage der Wände zwischen Innen- und Außenwänden, und nach der statischen Funktion zwischen tragenden und nichttragenden Wänden. In der vorliegenden Arbeit werden vor allem tragende Außenwände beleuchtet. Die Ausnahme bildet lediglich der Skelettbau, wo selbsttragende aber nicht tragende Wandelemente verwendet werden.

Die bauphysikalischen Anforderungen an die wandbildenden Materialien sind oft sehr unterschiedlich bzw. auch gegenläufig. So erfordern z.B. ein guter Schallschutz und eine gute Wärmespeicherung eine hohe Masse, welche in der Regel eine hohe Wärmeleitfähigkeit mit sich bringt. Für den Wärmeschutz werden jedoch Materialien mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit benötigt. Aus diesem Grund besteht ein moderner Wandaufbau fast immer aus mehreren Schichten, wobei jede Schicht eine oder mehrere Funktionen übernimmt.

### 2.1 Bauphysikalische Anforderungen

#### 2.1.1 Wärmeschutz

Obwohl der Baustoff Holz verglichen mit den massiven Baustoffen Beton und Ziegel eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit besitzt, benötigt eine Wand eines Niedrigenergiehauses (in der Regel) eine zusätzliche Dämmschicht. Diese Dämmschicht kann außen, in der Mitte der Konstruktion, innen oder an mehreren der genannten Stellen liegen. Die Vorteile der außenliegenden Wärmedämmung überwiegen bei ständig bewohnten Gebäuden im Gegensatz zur Innendämmung, da einerseits die Konstruktion nicht so hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist und andererseits das ganze Gebäude lückenlos mit Wärmedämmung eingepackt werden kann. Die Anfälligkeit von Wärmebrücken ist somit geringer. Außerdem kann – falls es sich um Wände mit hoher speicherwirksamer Masse handelt – diese auch als solche genutzt werden. Dieser Vorteil ist jedoch bei

Leichtbaukonstruktionen (Ständerbau, Rahmenbau, Tafelbau) im Vergleich zu Massivbauten eher unbedeutend, da die speicherwirksame Masse der Wandaufbauten relativ gering ist. Massive Zwischenwände und massive Decken können zwar eine zusätzliche speicherfähige Masse darstellen, doch die selbe Wirkung wie bei einer Außenwand mit genügend speicherwirksamer Masse zu erreichen, ist nach [Thoma, 2003] nicht möglich. Ein Problem bei Häusern mit wenig speicherwirksamer Masse stellt auch die sommerliche Überwärmung dar.

### 2.1.2 Feuchtigkeitsschutz

Die Wandfeuchte, die in weiterer Folge Schäden hervorruft, kann einerseits von außen (Niederschlag, Erdfeuchte, ...) oder innen (hohe Luftfeuchte der Räume), andererseits von der Wand selbst (Eigenfeuchtigkeit des Baustoffes, Feuchte durch Schadensfälle, ...) herrühren. Entscheidend ist nicht, dass keine Feuchtigkeit in der Wand kumuliert, sondern, dass das Austrocknungsvermögen größer als die Feuchtigkeitsbelastung ist und es somit zu keiner längerfristigen Feuchtigkeitsanreicherung kommen kann [Pech et al., 2005]. Dies lässt sich am wirksamsten mit einer Hinterlüftung der Wärmedämmung und/oder einer Dampfsperre an der Innenseite erreichen. Generell ist auf einen Wandaufbau zu achten, in dem die Dampfdurchlässigkeit von innen nach außen zunimmt. Die andere Möglichkeit, die ohne Dampfbremse auskommt, ist, den gesamten Wandaufbau diffusionsoffen zu gestalten, aber genauso mit dem Augenmerk darauf, dass die Dampfdurchlässigkeit von innen nach außen zunimmt. Dadurch kann zwar Wasserdampf bzw. Kondenswasser in die Konstruktion und die Wärmedämmung eindringen, doch es muss durch den Wandaufbau gewährleistet bleiben, dass die Feuchtigkeit nach außen hin wieder austrocknen kann.

Ein Haus der Programmlinie „Haus der Zukunft“ in massiver Holzbauweise besitzt eine komplett dampfdiffusionsdichte und nicht hinterlüftete Fassade, da vertikale Solarkollektoren die Außenhülle bilden. Dieser Aufbau entspricht somit nicht den oben genannten Kriterien, funktioniert aber in bauphysikalischer Hinsicht trotzdem. Wie Messungen bestätigten, trocknet die Feuchtigkeit des Wandaufbaus nach innen hin aus. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass eine Austrocknung nach innen immer gewährleistet werden kann und ausreichend ist, sondern, dass spezielle Wandaufbauten, die scheinbar im Widerspruch zur allgemein gültigen Theorie stehen, zwar möglich sind, jedoch einer genauen Überlegung und Berechnung bedürfen [BMVIT, 2007].

### 2.1.3 Schallschutz

Der Luftschallschutz stellt bei Holz- und Leichtbauten meist die größte Herausforderung dar, da dieser bei einschaligen Bauweisen primär von der Masse abhängig ist. Eine Möglichkeit einen guten Luftschallschutz auch ohne entsprechende Flächenmasse zu erreichen ist, der Wand eine biegeeweiche Vorsatzschale, die mit dieser durch Dämpfungselemente verbunden ist, vorzusetzen. Ein solcher mehrschaliger Aufbau kommt auch dem Körperschallschutz zu gute. Laut Pech sind folgende Punkte in Bezug auf den Schallschutz von mehrschaligen Wandaufbauten besonders zu beachten:

- „Die Schalldämmung eines zweischaligen Bauteiles steigt mit wachsendem Schalenabstand und verminderter Steifigkeit der Zwischenschichten.
- Zur Verminderung einer Resonanzwirkung sind ungleiche Schalenstärken anzustreben“ [Pech et al., 2005].

Oft hört sich die Theorie jedoch wesentlich einfacher an, als die praktische Ausführung einer biegeweichen Vorsatzschale in Wirklichkeit ist, denn schon geringe „Fehler“, d.h. andere Verbindungen der Vorsatzschale zur Wand als über die Dämpfungselemente, können den Schallschutz entscheidend beeinträchtigen. Eine weitere Möglichkeit ein Holzhaus mit gutem Schallschutz zu bauen, ist die Verwendung von sehr massiven Holzelementen (Stärke ab etwa 20 cm) oder massiven Holztafeln mit Holzwollemehrschichtplatten als Putzträger.

Nicht transparente Teile der Außenwände von Wohnungen und Aufenthaltsräumen müssen laut Wiener Bauordnung ein bewertetes Schalldämmmaß  $R_w$  von mindestens 47 dB aufweisen. Bei Klein- und Reihenhäuser genügt ein bewertetes Schalldämmmaß  $R_w$  von 43 dB [Moritz, 2007]. In den anderen Bundesländern ist für den Schallschutz die ÖNORM B 8115-2 gültig, die ein bewertetes Mindestschalldämmmaß zwischen 33 und 52 dB – abhängig vom maßgeblichen Außenlärmpegel  $L_{a,eq}$  – vorschreibt.

Die OIB-Richtlinie 5 „Schallschutz“ enthält keine Grenzwerte für das Schalldämmmaß, sondern verweist in Bezug auf die Anforderungen an den baulichen Schallschutz auf die ÖNORM B 8115-2: „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz“.

#### 2.1.4 Brandschutz

Bis vor wenigen Jahren war es laut Wiener Bauordnung untersagt, mehrgeschoßige Wohnbauten in Holzbauweise zu errichten. Seit Dezember 2001 ist jedoch eine Novelle der Wiener Bauordnung in Kraft, die besagt, dass Außenwände von Gebäuden mit nicht mehr als drei Hauptgeschoßen und einem Dachgeschoß nur mehr hochfeuerhemmend (entspricht einem Brandwiderstand von 60 min), nicht aber feuerbeständig (Brandwiderstand von 90 min) sein müssen.

Die Skepsis gegenüber Holzgebäuden, bedingt durch die Brennbarkeit von Holz, ist zum guten Teil historisch bedingt, existiert jedoch auch heute noch. Die Brandsicherheit eines Baustoffes ist jedoch nicht ausschließlich von seiner Entzündlichkeit abhängig. Die Erfahrung zeigt, „dass sich Holzbauteile im Brandfall in vieler Hinsicht günstiger als andere Baustoffe verhalten“ [Dehne et al., 2006]. Holzbauten können nach oben genannten Autoren sehr wohl das brandschutztechnische Sicherheitsniveau von Massivbauten erreichen, und jenes von Stahlbauten sogar übertreffen, da beim Werkstoff Stahl im Brandfall mit einem plötzlichen Steifigkeitsverlust zu rechnen ist.

Bei Massivholz wird der geforderte Brandschutz in der Regel aufgrund der großen Querschnitte ohne zusätzliche Verkleidung erreicht. Bei Leichtbaukonstruktionen ist eine REI 30 oder REI 60-Zertifizierung nur mit zusätzlichen feuerhemmenden Maßnahmen, wie Beplankung mit Gipskarton- oder Feuerschutzplatten möglich. Kritisch können außerdem

Knoten und Verbindungsmittel im Brandfall werden, da bei diesen der Holzquerschnitt meist geschwächt ist bzw. in vielen Fällen Stahl zur Anwendung kommt, dessen Festigkeit und E-Modul bei hohen Temperaturen (450-650 °C) stark absinkt.

Vielfach wird von Holzbaufachleuten die Meinung vertreten, dass Verordnungen sowie Versicherungen den Holzbau im Bezug auf den Brandschutz benachteiligen. Tests und Zertifikate genauso wie Erfahrungen der Feuerwehr zeigen jedoch, dass Holzbauten in Bezug auf Brandschutz sehr wohl mit nichtbrennbaren Materialien mithalten können [Dehne et al., 2006].

Die Anforderungen bezüglich des Brandschutzes, die zurzeit in den jeweiligen Landesbauordnungen festgeschrieben sind, werden mit der Einführung der OIB-Richtlinie 2 „Brandschutz“ österreichweit vereinheitlicht. Dadurch wird auch die Notwendigkeit, „die neuen europäischen Begriffe und Klassen auch im Bereich des Brandschutzes zu übernehmen“ [OIB, 2007 B], erfüllt. Die Bestimmungen und Anforderungen der Brennbarkeitsklassen (Klasse A bis F) sind in der ÖNORM EN 13501-1: „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten“ geregelt, jene zu den Feuerwiderstandsklassen im der ÖNORM EN 13501-2: „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen“.

Bei den Feuerwiderstandsklassen wird unterschieden, welche Eigenschaft der Wand im Brandfall nach einer bestimmten Zeitspanne erfüllt bleibt. Die Buchstaben vor der Zeitangabe stehen für die jeweilige Verhaltenseigenschaft und sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Die Tragfähigkeit ist gemäß ÖNORM EN 13501-2 gewährleistet, wenn unter festgelegten mechanischen Einwirkungen während eines Brandes die Standsicherheit gegeben ist. Unter Raumabschluss wird verstanden, dass der Durchtritt von Flammen und heißen Gasen unterbunden ist. Die geforderte „Wärmedämmung ist die Fähigkeit eines Bauteils, [...] die Übertragung von Feuer als Ergebnis einer signifikanten Übertragung von Wärme zu widerstehen“ [ÖNORM EN 13501-2, 2004]. Bei einer REI 30 klassifizierten Wand (entspricht der früheren Bezeichnung F 30) müssen demnach nach 30 Minuten die Verhaltenseigenschaften Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung gewährleistet sein.

**Tabelle 2–1 Verhaltenseigenschaften von Bauteilen** [ÖNORM EN 13501-2, 2004]

<b>Verhaltenseigenschaft</b>	
R Tragfähigkeit	C Selbstschließende Eigenschaft
E Raumabschluss	S Rauchdichtheit
I Wärmedämmung	M Widerstand gg. mech. Beanspruchung
W Strahlung	G Widerstand gg. Rußbrand
K Brandschutzfunktion	

Die Gebäude werden in der OIB-Richtlinie 2 in Gebäudeklassen (GK 1 – GK 5) eingeteilt, die unterschiedliche Anforderungen an den Brandschutz erfüllen müssen. Die Richtlinie

ermöglicht die vermehrte Verwendung von tragenden Holzkonstruktionen für Gebäude bis zu vier oberirdischen Geschoßen (GK 4), was bisher noch nicht in ganz Österreich erlaubt war. Oberirdische, tragende Bauteile von Gebäuden der GK 1 bis 4 müssen nur mehr einen Brandwiderstand von 30 bzw. 60 Minuten erfüllen. Das Dachgeschoß wird einem Obergeschoß gleichgestellt, d.h. „vier oberirdische Geschoße“ entspricht der in der Wiener Bauordnung üblichen Bezeichnung von „drei Hauptgeschoßen plus Dachgeschoß“.

Die allgemeinen Bauteilanforderungen sowie die Einteilung der Gebäudeklassen ist dem Anhang zu entnehmen.

Die Einstufung der Baumaterialien zur jeweiligen Brennbarkeitsklasse A1 bis F erfolgt gemäß ÖNORM EN 13501-1: 2007-05-01 nach Prüfungen, die neben der Entflammbarkeit auch die Wärmefreisetzung, die seitliche Flammenausbreitung und den Brennwert berücksichtigen. Eine zusätzliche Unterteilung der Hauptklassen erfolgt nach der Rauchentwicklung und dem brennenden Abtropfen oder Abfallen.

## 2.2 Statische Anforderungen

Wände müssen sowohl Kräfte, deren Wirkungslinien in der Wandebene liegen (Scheibentragwirkung) als auch solche, deren Wirkungslinie normal zur Wand sind (Plattentragwirkung) aufnehmen und weiterleiten können. Erstere stammen von den Vertikalkräften aus Eigengewicht und Nutzlasten sowie von den Horizontalkräften, die vom Wind und Erdbebenkräften in Wandlängsrichtung herrühren.

Durch Windbelastung normal zur Wand wird diese auch als Platte beansprucht. Die Plattentragwirkung ist jedoch nach [Pech et al., 2005] „nicht immer in vollem Umfang gesichert, sollte aber zumindest konstruktiv berücksichtigt werden“. Bei Holzleichtbauten wird die Plattentragwirkung durch Beplankung oder Diagonalschalung erreicht. Weitere Einwirkungen auf eine Wand sind Biegemomente zufolge Lastexzentrizitäten und eingeprägte Momente aus der Wirkung eingespannter Decken.

Gemäß der OIB-Richtlinie 1 „Mechanische Festigkeit und Standsicherheit“ müssen bei der „Planung von Tragwerken [...] ständige, veränderliche, seismische und außergewöhnliche Einwirkungen“ berücksichtigt werden [OIB-Richtlinie1, 2007].

Oben genannte OIB-Richtlinie weist weiters darauf hin, dass Tragwerke eine ausreichende Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen müssen. Dies gilt als erfüllt, „wenn die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden“ und die Tragwerke „den Anforderungen gemäß ONORM EN 1990 genügen“ [OIB-Richtlinie1, 2007].

### 3 VOR- UND NACHTEILE DES BAUENS MIT HOLZ

Der Baustoff Holz hatte in den letzten Jahrzehnten mit vielen, zum Teil unbegründeten, Vorurteilen zu kämpfen. Er brenne, werde mit der Zeit morsch, sei hellhörig und überhaupt ein „Arme-Leute-Baustoff“. Erst in jüngerer Vergangenheit besannen sich viele Bauherren wieder auf die positiven Eigenschaften des Holzes und verhalfen diesem Baustoff zu steigender Nachfrage. Auch die im Kapitel 2.1.4 erwähnte Änderung der Wiener Bauordnung trug dazu bei, dass Neubauten in Holz wieder zunehmen.

#### 3.1 Tragfähigkeit

Dass Holz mit den modernen Baustoffen wie Stahl und Stahlbeton in Sachen Tragfähigkeit durchaus mithalten kann, steht außer Zweifel. Laut Walter „trägt Holz bezogen auf das Gewicht 14 mal soviel wie Stahl“ [Walter et al., 2000]. Vergleicht man die Zugfestigkeit von Brettschichtholz mittlerer Güte parallel zur Faser mit der Zugfestigkeit von Stahl S 235, so ergeben sich ähnliche Werte (wiederum bezogen auf die Masse der Baustoffe). In Bezug auf Beton, dessen mittlere Zugfestigkeit je nach Güte zwischen 1,6 N/mm<sup>2</sup> (C12/15) und 5,2 N/mm<sup>2</sup> (C100/115) liegt, kann Holz weitaus mehr Zug aufnehmen. Je nach Güte liegt die zulässige Zugfestigkeit parallel zur Faser zwischen 7 und 13 N/mm<sup>2</sup>.

Betrachtet man die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser, so ist diese etwa in der Größenordnung von magerem Beton (C12/15). Bezieht man den Wert aber wiederum auf die Masse der Baustoffe, so kann Holz sogar mit hochfestem Beton (etwa C60/75) mithalten. Holz kann demnach sowohl als Biegeträger, Druck- und Zugstab eingesetzt werden. Die geringe Masse kommt u.a. auch den Gründungen zu Gute, die beim Baustoff Holz in der Regel wesentlich kleiner ausfallen können.

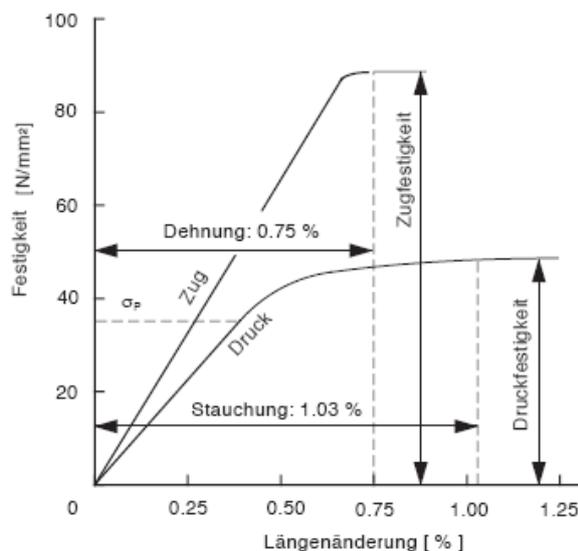


Abb. 3-1 Spannung-Dehnungslinien von Holz parallel zur Faser [Steiger, 1995]

Ein weiterer Vorteil von Holz ist, dass es sich im Druckbereich duktil verhält. Das Versagen im Druckbereich passiert nicht wie etwa bei Beton unerwartet, sondern dem Bruch gehen große Verformungen vorher. Die Duktilität ist u.a. bei Erdbeben und anderen Ausnahmefällen von Vorteil. Im Zugbereich ist wie auf Abbildung 3-1 zu erkennen, keine Duktilität vorhanden. Die Zugfestigkeit ist bei Holz größer als seine Druckfestigkeit. Der Grund dafür liegt in der röhrenartigen Struktur des Holzes, welche bei Druck aufgrund des Knickens versagt.

Die Festigkeit sowie die Spannungs-Dehnungslinie von Holz hängen von der

Holzfeuchte ab. Die Druckfestigkeit beträgt ab der Fasersättigung (ca. 30% Holzfeuchte) nur mehr etwa 40% des ursprünglichen Wertes. Auch im Zugbereich weist feuchtes Holz eine geringere Festigkeit, jedoch eine wesentlich höhere Verformbarkeit als trockenes Holz auf.

### 3.2 Langlebigkeit

Beim Baustoff Holz handelt es sich um einen der ältesten Baustoffe überhaupt. Das älteste noch erhaltene Holzbauwerk befindet sich in Deutschland und ist mehr als 2000 Jahre älter als die ägyptischen Pyramiden. Es handelt sich dabei um einen Brunnenschacht der Jungsteinzeit, der vor etwa 7300 Jahren aus Eichenbohlen in Blockbauweise errichtet wurde. Von dem ursprünglich zwölf Meter tiefen und drei Mal drei Meter großen Schacht wurden etwa acht Meter freigelegt. Der Brunnenkasten befindet sich auch nach dieser langen Zeit in einem guten Zustand [Walter et al., 2000].

Aber auch Hochbauten aus Holz aus vergangenen Jahrhunderten zeugen von der Langlebigkeit dieses Baustoffes: etwa ein Blockhaus, das um 1250 entstanden ist und jetzt im Freilichtmuseum in Oslo zu betrachten ist oder die norwegischen Stabkirchen aus dem 12. und 13. Jahrhundert [Walter et al., 2000].

In Bezug auf die Langlebigkeit ist neben dem geeigneten Aufbau des Holzbauwerkes auch der Zeitpunkt der Schlägerung sowie die sachgemäße Trocknung und Verarbeitung des Holzes von Bedeutung.

### 3.3 Ökologie des Holzes

Schlagworte wie „Umweltverträglichkeit“, „Nachhaltigkeit“ und „Ressourcenschonung“ sind seit den letzten Jahrzehnten häufig verwendete Begriffe in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Doch welche Bedeutung und Auswirkungen hat dies auf das Bauwesen?

Nach [Merl, 2006] werden pro Einwohner jährlich etwa 10 Tonnen an Baumaterialien bewegt und ca. 60% des Abfallaufkommens stammt aus dem Bauwesen. Angaben der Stadt Wien bestätigen, dass im Jahre 2001 knapp 2,3 Millionen Tonnen Baumaterialien eingebaut wurden. Andererseits kamen im selben Jahr etwa 0,5 Millionen Tonnen Abbruchmaterial und zusätzlich etwa 1,4 Millionen Tonnen an Bodenaushub von Bautätigkeiten in die Abfallwirtschaft [Merl, 2006]. Letztere Mengenangaben beziehen sich nur auf den Hochbau, nicht jedoch auf Erd- und Tunnelbau. Im Zuge des Bauens – von Rohstoffgewinnung bis Abbruch des Bauwerks – werden des Weiteren beträchtliche Mengen an Energie benötigt. Nachwachsende sowie die in Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung ressourcenschonende Baustoffe, können daher einen sehr wesentlichen Beitrag zu einem umweltverträglicheren und nachhaltigem Bauen beitragen. Der Baustoff Holz spielt dabei auf Grund seiner Beschaffenheit und Verfügbarkeit eine wesentliche Rolle.

Holz weist auch im Zusammenhang mit der in letzter Zeit viel diskutierten CO<sub>2</sub>-Problematik einige Vorteile auf. Holz entsteht ganz „von selbst“, beim Wachsen der Bäume wird die

Umwelt in keiner Weise belastet. Im Gegenteil: beim Wachstum eines Baumes wird im Zuge der Photosynthese und mit Hilfe der Sonnenenergie der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  entzogen, welches das Holz während seiner gesamten Lebensdauer in seiner Struktur gespeichert hält. Erst bei der Verbrennung von Holz wird wieder  $\text{CO}_2$  freigesetzt, jedoch nur soviel, wie es im Laufe seines Lebens als Baum aufgenommen hat. Mit der durch die Verbrennung gewonnenen Energie wird der Bedarf an fossilen Energieträgern, welche prozessbedingt hohe  $\text{CO}_2$ -Emissionen verursachen, reduziert. Das „Global Warming Potential“ (siehe 4.2.1) von reinen Holzbaustoffen liegt – mit sehr wenigen Ausnahmen – immer im negativen Bereich.

Erst in der Weiterverarbeitung und beim Transport von Holz wird Primärenergie benötigt. Mit dem Einsatz von erneuerbarer Energie etwa bei der Holz Trocknung und kurzen Transportwegen kann dieser Anteil jedoch relativ gering gehalten werden. Luftgetrocknetes Schnittholz hat einen nicht erneuerbaren Primärenergieanteil von etwa 0,7 MJ/kg, technisch getrocknetes Schnittholz – je nachdem welcher Energieträger bei der Trocknung zum Einsatz kommt – bis zu 3 MJ/kg. Bei verleimtem Brettschichtholz steigt dieser Wert um mehr als das Doppelte an (7-8 MJ/kg), da sowohl die Herstellung des Leims als auch das Verkleben der Holzschichten relativ energieintensiv ist [IBO, 2006]. Verdübeltes Brettschichtholz schneidet hier wesentlich besser ab. Laut Prüfungen des Österreichischen Instituts für Baubiologie und -ökologie IBO [IBO, 2003] benötigt verdübeltes Brettsperrholz der Firma Thoma nur etwa 2,3 MJ/kg nicht erneuerbare Primärenergie (ökologische Kennzahlen siehe auch Tab. 4-2).

Stahl benötigt je nach Legierung 30-100 MJ/kg, Stahlbeton in etwa 1,2 MJ/kg [IBO, 2006]. Letzterer Wert erscheint im Vergleich zu Brettschichtholz relativ gering, bezogen auf die Massen, die für eine Wand benötigt werden, schneidet Holz jedoch in jedem Fall besser ab. Die Angaben zum Energieverbrauch beziehen sich lediglich auf die Herstellung, nicht aber auf die Entsorgung.

Ein weiterer wichtiger Maßstab für Umweltschutz und Ressourcenschonung ist die „Graue Energie“ eines Baustoffes. Damit wird die Energiemenge bezeichnet, „die für Herstellung, Transport und Lagerung inklusive aller Vorprodukte sowie die Entsorgung eines Produktes benötigt wird“ [Wikipedia, 2007]. Laut Becker ist die graue Energie eines Bauwerkes mittlerweile wichtiger als der Heizwärmebedarf, da sie etwa zwei- bis dreimal so hoch ist. Ein Massivhaus in Beton oder Ziegel benötigt etwa ein Fünftel mehr an grauer Energie als ein vergleichbares Bauwerk in Holzbauweise [Becker, 2007].

Holz ist ein Baustoff, dessen  $\text{CO}_2$ -Bilanz ausgeglichen ist; das heißt, je mehr Holz in unseren Bauwerken integriert wird, desto mehr  $\text{CO}_2$  liegt in gebundener Form vor und desto weniger Baumaterialien, die in Produktion und Entsorgung hohe Umweltbelastung hervorrufen, werden benötigt.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Nebenprodukte, die bei der Erzeugung von Bauholz anfallen, wertvolle Energieträger sind und einen wichtigen, regional verfügbaren und erneuerbaren Energieträger darstellen. Dasselbe gilt für Holzbaustoffe, die am Ende ihres Lebenszyklus angelangt sind: sie können entweder als Energieträger dienen, kompostiert oder wiederverwertet werden (z.B. ist Abbruchholz aufgrund seiner gleichmäßigen Farbe und seiner Maßhaltigkeit ein wertvoller Rohstoff für Möbel und Holzfußböden). Voraussetzung ist

allerdings, dass das Holz nicht mit Materialien behandelt wurde, deren Umweltverträglichkeit als problematisch eingestuft werden muss (u.a. verschiedene Anstriche und Imprägnierungen). Damit das ökologische Potential des Holzes nicht geschmälert wird, sollte bei der Entwicklung und beim Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen darauf geachtet werden, dass beim Einsatz von Additiven oder der Vermischung von Holz mit anderen Stoffen, „das zukünftige Nutzungspotential nicht vermindert wird und keine Stoffe in Bauteile Eingang finden, welche im eingebauten Zustand ein Gefahrenpotential bergen oder in der Entsorgung Probleme bereiten“ [Merl, 2006].

### 3.4 Weitere Vorteile des Holzes

In Österreich und auch den meisten anderen Ländern Mitteleuropas ist der Rohstoff Holz in großem Ausmaß verfügbar. In Österreich und Deutschland werden nur etwa 70% des jährlichen Holzzuwachses auch genutzt, die Waldflächen nehmen daher stetig zu. In Österreich geschieht dies um etwa drei Millionen Kubikmeter jährlich [Schickhofer, 2002]. Durch das regionale Holzaufkommen können auch die Transportwege und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt relativ gering gehalten werden.

Regionen mit großem Waldbestand zählen nicht selten zu den wirtschaftlich benachteiligten Gebieten. Durch die dezentrale Holzverarbeitung bis hin zur Holzverwertung profitieren die Bewohner der Region nicht nur durch den Wirtschaftsstandort, sondern es kann „nebenbei“ mit den anfallenden Abfallprodukten saubere Energie erzeugt werden, was einen Schritt zur wirtschaftlichen Unabhängigkeit bedeutet.

Holz eignet sich weiters gut für die Vorfertigung in einer Werkstatt, was eine schnelle Bauzeit auf der Baustelle mit sich bringt. Außerdem lässt sich Holz gut und mit relativ einfachen Geräten und Maschinen bearbeiten. Dadurch wird auch für die Bearbeitung weniger Energie benötigt. Auch bezogen auf die Installationen bietet Holz Vorteile: Bei Herstellung von Tafелеlementen können schon werkseitig die Aussparungen für die Leitungsführung berücksichtigt werden. Bei nachträglichem Einbau reduziert sich der Arbeitsaufwand laut einem Hersteller von Massivholzwänden gegenüber Ziegelbauten um 30 - 50% [Thoma, 2007].

Darüber hinaus besitzt Holz gute Wärmedämmeigenschaften, fühlt sich warm an und reguliert die Luftfeuchtigkeit in Räumen. Das bedeutet, dass sich bei hoher Luftfeuchtigkeit in den Räumen der Feuchtegehalt des Holzes erhöht. Diese wird dann, wenn die Luft trocken ist, wieder abgeben. Ein Einfamilienhaus mit hohem Holzgehalt kann bis zu 1000 Liter Wasser in der Zellstruktur des Holzes speichern und wieder abgeben [Stommel, 2007]. Die bauphysikalischen Eigenschaften werden in den kommenden Kapiteln noch näher beschrieben.

Holz besitzt neben der hohen Resistenz gegenüber chemischen Substanzen auch eine antibakterielle Wirkung. Keime und Bakterien benötigen für ihr Wachstum unter anderen einen bestimmten Feuchtegehalt. Auf Grund der hygroskopischen Wirkung von Holz, wird Feuchte jedoch rasch vom Holz aufgenommen und ins Holzinere weitergeleitet, sodass

Keime und Bakterien an der Außenfläche ein zu trockenes Klima vorfinden, um sich vermehren zu können. Die poröse Oberfläche des Holzes begünstigt die Wasseraufnahme zusätzlich. Dieses Phänomen wurde durch Versuche u.a. an der Technischen Universität Braunschweig und einer US-amerikanischen Studie bestätigt [Stingl et. al, 2006].

### 3.5 Nachteilige Eigenschaften des Holzes

Holz ist ein anisotroper Baustoff, das bedeutet, seine Belastbarkeit ändert sich je nach Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung. Auch das Schwinden und Quellen ist abhängig von der Faserrichtung. Das Schwindmaß ist z.B. bei Fichte folgendermaßen charakterisiert: tangential : radial : Längsrichtung = 24 : 12 : 1.

Holz, das im Hochbau zum Einsatz kommt, muss vor ständiger Feuchtigkeitsbelastung geschützt werden. Dies geschieht am besten konstruktiv, etwa mit großen Dachüberständen. Außerdem ist bei Holz auch Schädlings- und Pilzbefall ein Thema. Diese Problematik ist aber relativ gering, da holzerstörende Insekten – wie zum Beispiel Nagekäfer oder der Hausbock – eine gewisse Holzfeuchte benötigen, um sich fortpflanzen und somit überleben können. Die Holzfeuchte, die sich in geheizten Räumen einstellt, reicht dafür nicht aus. Daher sind Schutzmaßnahmen gegen Insektenbefall nur in Ausnahmefällen (z.B. nicht einsehbare Hölzer, die einer gewissen Feuchtigkeit ausgesetzt sind) sinnvoll.

Auch Pilze benötigen ein feuchtwarmes Klima für ihr Entstehen und Überleben. Verbautes Holz stellt sich bei normalem Innenraumklima (20°C, 50% relative Luftfeuchte) auf eine Gleichgewichtsfeuchte von etwa 9-12% ein. Ein Entstehen von Oberflächen verfärbenden Pilzen, was zwar ein ästhetisches, jedoch kein statisches Problem darstellt, ist erst ab einer länger anhaltenden Holzfeuchte (länger als eine Saison) von über 20% möglich [Haustein, 2006; Kolb, 1988], ein Wachstum von Holz zerstörenden Pilzen erst, wenn sich freies Wasser in den Zellhohlräumen befindet (ab etwa 25-30% Holzfeuchte). Daher sind nur stark Wetter beanspruchte Außenbauteile, wie etwa nicht überdeckte Brücken oder Holzteile an Fassaden ohne Dachüberstand gefährdet und benötigen einen Schutz in Form von Druckimprägnierung oder Anstrichen. Am bewährtesten ist aber immer noch der konstruktive Holzschutz, der ein längerfristiges Durchfeuchten der Holzteile verhindert.

Die Oberfläche von unbehandeltem Holz verändert sich im Laufe der Zeit auf Grund von Witterung und Sonneneinstrahlung. Bewittertes Lärchenholz bekommt nach einigen Jahren ein graues Erscheinungsbild. Dies kann ebenfalls von einigen Bauherren als Nachteil empfunden werden.

## 4 BETRACHTUNG DER DÄMMSTOFFE

### 4.1 Bauphysikalische Vorteile von nachwachsenden Rohstoffen

Derzeit sind die am häufigsten eingesetzten Dämmstoffe Polystyrol und Mineralfasern (Steinwolle und Glaswolle), da diese einerseits leicht zu verarbeiten sind und andererseits –

auch aufgrund der hohen Nachfrage – relativ günstig sind. Weiters stehen hinter den Produzenten und Vertreibern von diesen konventionellen Dämmstoffen große Firmen, denen die Möglichkeit von breitenwirksamer Werbung für ihre Produkte gegeben ist. Nachwachsende Rohstoffe (u.a. Schilf, Stroh, Flachs, Hanf, Holzfaserdämmstoffe, Schafwolle), die in der Regel einen sehr geringen Energieverbrauch bei ihrer Erzeugung verzeichnen, entstehen oftmals in kleineren Betrieben, und werden nicht im großen Stil beworben. Trotzdem steigt die Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen stetig, nicht nur aufgrund der besseren Ökobilanzen, sondern auch aufgrund deren bauphysikalischer Eigenschaften. Dies wird wiederum eine Preissenkung mit sich ziehen, wodurch die Attraktivität dieser Dämmstoffe weiter steigt.

Die wichtigsten bauphysikalischen sowie ökologischen Kennzahlen sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

#### 4.1.1 Brandschutz

Bezüglich des Brandschutzes können nachwachsende Dämmstoffe sehr gute Werte erzielen, obwohl das Ausgangsmaterial in der Regel einem B2-Material (normal entflammbarer Baustoff) entspricht. Doch vergleichende Untersuchungen zeigen, „dass die Brandklasse des Dämmstoffes auf das Feuerwiderstandsverhalten des Bauteils nahezu keinen Einfluss hat“ [Meemken, 2006]. So ist es auch nicht selten, dass Konstruktionen aus B2-Dämmstoffen im Brandversuch dem Feuer länger Widerstand leisten als Konstruktionen aus A1-Dämmstoffen (nichtbrennbare Baustoffe ohne Anteil von brennbaren Baustoffen).

#### 4.1.2 Hygroskopizität

Dämmstoffe aus Naturfasern zählen zu den sorptionsfähigen Materialien. Sie können in einem viel größeren Ausmaß als Mineralfaserdämmstoffe und Schaumdämmstoffe Wasser aufnehmen (z.B. Zellulose: Aufnahmevermögen bis 17%, Mineralfaser bis 2%) und zeitversetzt wieder abgeben. Dieses Feuchte-Puffervermögen erhöht die bauphysikalische Robustheit gegen unplanmäßig auftretende Feuchtigkeit einer Konstruktion wesentlich.

Schädigungen einer (Holz-)Konstruktion werden häufig durch in der Konstruktion auftretendes Kondensat verursacht, das sich an dampfdichteren Schichten sammelt, abrinnt und u.a. Fäulnis und Schimmelbefall als Folgen haben kann. Wird jedoch das kondensierte Wasser vom Dämmstoff aufgenommen, hat zwar dieser temporär einen etwas größeren Wärmedurchlass doch die Konstruktion nimmt keinen Schaden – vorausgesetzt, das Verdunstungsvermögen übersteigt das Ausmaß der Feuchteanreicherung um ein Vielfaches.

Diese Eigenschaft kann aber gleichzeitig ein Nachteil sein. Eine undichte Stelle z.B. im Dach wird bei Verwendung eines nicht sorptionsfähigen Dämmstoffs wesentlich schneller erkannt, da die eindringende Feuchtigkeit ins Innere des Hauses gelangt und dadurch i.d.R. nicht unbemerkt bleibt. Ein Dämmstoff mit hygroskopischen Eigenschaften saugt sich zuerst an, bevor er die Feuchtigkeit an die umliegenden Bauteile abgibt.

### 4.1.3 Sommerlicher Wärmeschutz

Besonders im Sommer ist neben der Dämmwirkung auch die Speicherfähigkeit eines Baustoffes wesentlich, um ein angenehmes Raumklima zu erzielen. Zwei wesentliche Parameter des sommerlichen Wärmeschutzes sind die Amplitudendämpfung [dimensionslos] und die Phasenverschiebung [h]. Erstere ist der Quotient aus Außentemperatur- und Innentemperaturamplitude und gibt an, um welchen Wert der Bauteil die Schwankung der Außentemperatur dämpft. Die Phasenverschiebung ist die Zeitspanne zwischen maximaler Außentemperatur und maximaler Innentemperatur und sollte idealerweise zwischen 10 und 12 Stunden liegen, sodass die maximale Raumtemperatur erst erreicht wird, wenn es draußen wieder kühler ist und die Innentemperatur durch Lüften gesenkt werden kann.

Um der sommerlichen Überwärmung entgegenzuwirken, werden Baustoffe benötigt, die die scheinbar konträren Eigenschaften einer geringen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , einer möglichst hohen Rohdichte  $\rho$  und einer hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität  $c$  besitzen. Diese Materialeigenschaft wird durch die Temperaturleitzahl  $a$  [ $\text{m}^2/\text{h}$ ] ausgedrückt, welche möglichst gering sein sollte.

$$\text{Temperaturleitzahl } a \text{ [m}^2/\text{h}] = \frac{\text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda \text{ [W/mK]}}{\text{Wärmespeicherkapazität } c \text{ [Wh/kgK]} \times \text{Rohdichte } \rho \text{ [kg/m}^3\text{]}} \quad (2)$$

Nachwachsende Rohstoffe erfüllen diese Anforderung, wie in Tabelle 4-1 ersichtlich ist, i.d.R. besser als Mineralwolle und Schaumdämmstoffe.

**Tabelle 4–1 Temperaturleitzahl verschiedener Dämmstoffe**

Baustoff	Temperaturleitzahl $a$ [ $\text{cm}^2/\text{h}$ ]
Holz / Holzfaserdämmplatten	ca. 4-5
Zellulose	ca. 13
Kork	2-3
Schafwolle	10-40 (stark abhängig von Rohdichte)
Stroh	7-10
Flachs, Hanf	25-30
Schaumdämmstoffe	ca. 50-60
Steinwolle, Glaswolle	ca. 30-50 (stark abhängig von Rohdichte)

## 4.2 Ökoindex 3 der thermischen Gebäudehülle

Die Hauptaufgabe von Dämmstoffen in Gebäuden ist die Reduzierung des Wärmeverlustes, was eine Verringerung des Heizwärmebedarfes mit sich bringt. Dadurch kann einerseits die Dimensionierung des Wärmeerzeugers geringer ausfallen, der Einsatz von Niedertemperatursystemen wird ermöglicht. Andererseits ist durch die wärmere Oberflächentemperatur der Außenwände eine Absenkung der Raumtemperatur ohne Einbußen bei der Behaglichkeit möglich. So gesehen können Dämmstoffe prinzipiell als umweltentlastend angesehen werden, da durch ihren Einsatz Heizenergie eingespart wird.

Da der Großteil der Heizenergie aus fossilen Energieträgern, deren Gewinnung und Verbrennung CO<sub>2</sub> ausstößt, besteht, bewirken Dämmstoffe in weiterer Folge eine CO<sub>2</sub>-Reduktion. Eine Dämmung kann weiters den Schallschutzes verbessern (stark abhängig vom verwendeten Material), die Gefahr der sommerlichen Überwärmung vermindern und bauphysikalische Schäden durch Oberflächenkondensat oder Frost vermeiden [Mötzl, 2000].

Um jedoch einen Dämmstoff als ökologisch bewerten zu können, muss neben den positiven Auswirkungen des eingebauten Dämmstoffes auch die Umweltbelastung, die durch den Dämmstoff entsteht, in Betracht gezogen werden. Dazu zählen der Ressourcenverbrauch und die Schadstoffemissionen, die während der Herstellung, dem Transport, dem Einbau, der Nutzung, dem Rückbau und der Entsorgung des betrachteten Dämmstoffes entstehen.

Der Ökoindex 3, kurz ÖI3, ist eines unter zahlreichen anderen Bewertungskriterien, das über die ökologischen Eigenschaften von Baustoffen Auskunft gibt. Es stellt eine Kennzahl für die bauökologischen Eigenschaften eines Gebäudes dar, sagt aber nichts über die Erneuerbarkeit oder Nachhaltigkeit von Rohstoffen aus. Es besteht aus drei Indikatoren: dem nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt (PEI<sub>ne</sub>), dem Treibhauspotential (Global Warming Potential GWP) und dem Versäuerungspotential (Acid Potential). Das Treibhauspotential wird in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben, d.h. jedes Treibhausgas wird je nach seinem Treibhauspotential in Verhältnis zu Kohlendioxid, das dem Wert 1 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent, entspricht, angegeben. Ebenso geschieht dies mit dem Versäuerungspotential, dessen Leitsubstanz Schwefeldioxid ist. Diese Kriterien vernachlässigen andere Umweltkriterien wie z.B. den Transportweg von Materialien oder die Gesundheitsgefährdung, die über die Lebensdauer des Baustoffes entstehen kann. Ein Bewertungssystem, das alle ökologischen, gesundheitsgefährdeten und ressourcenrelevanten Daten beinhaltet, ist kaum zu realisieren, wenn es oft, d.h. bei jedem Neubau und jeder Sanierung, und ohne allzu großem Aufwand durchgeführt werden soll und obendrein eindeutig miteinander vergleichbare Ergebnisse liefern soll.

Der Ökoindex 3 ist in Österreich von Bedeutung, da er Bestandteil einiger Wohnbauförderungen (Salzburg, Vorarlberg, Niederösterreich, Steiermark und Kärnten) sowie Gebäudebeurteilungen (IBO-Ökopass, Klima:aktiv-Haus) ist.

In Tabelle 4-2 sind Indikatoren des Ökoindex 3 sowie die wichtigsten bauphysikalischen Größen einiger Dämm- und Holzbaustoffe zusammengefasst.

Die Daten des Ökoindex 3 der Tabelle 4-2 stammen von unterschiedlichen Quellen [u.a. IBO, 2006, Öbox, 2006, Mötzl, 2000, Enz et al., 2006, Nierobis, 2003] und sind daher nur als Richtwerte anzusehen. Vor allem bei dem Energieverbrauch von Hanf- und Flachsdämmstoffen differieren die Werte der durchaus renommierten Quellen um das bis zu Zehnfache. Angaben von „sehr geringer Primärenergieverbrauch“ bis zu Werten, die ähnlich hoch sind wie jene der Mineralwolle, sind in der Literatur zu finden. Drei Flachs- und Hanfdämmstoffhersteller aus Österreich und Deutschland (Waldviertler Flachhaus GmbH, Flachhaus GmbH und Hock GmbH & Co. KG) bestätigten, dass die veröffentlichten Werte, nicht mehr dem aktuellen Stand entsprechen. Die Rechnungen über den Energieverbrauch beruhen teilweise auf Schätzungen. Außerdem gestaltet sich der Produktionsprozess heute

effizienter. Eine neue Energiebilanzrechnung des Fraunhofer-Instituts über die ökologischen Kennwerte von Hanfdämmplatten ist zurzeit in Arbeit. Die vorläufigen von der Prüfanstalt noch nicht bestätigten Ergebnisse belaufen sich auf 5-8 MJ/kg nicht erneuerbarem Primärenergieeinsatz bei Hanfdämmplatten. Der Wert liegt bei Flachdämmplatten etwas höher. Der Großteil der Energie wird dabei für das Trocknen der Platten verwendet, da das Brandschutzmittel Borsalz und die Kartoffelstärke, die als Stabilisator dient, in flüssiger Form in den Dämmstoff eingebracht wird.

**Tabelle 4-2 Ökologische und bauphysikalische Eigenschaften von Dämmstoffen und Holzbaustoffen**

BAUSTOFF	PEI ne	GWP100	AP	Dichte $\rho$	$\mu$	$\lambda$	spez. Wärmekapazität
	[MJ/kg]	[kg CO <sub>2</sub> eq/kg]	[kg SO <sub>2</sub> eq/kg]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[W/mK]	[J/kgK]
Mineralwolle	22-40	1,6-2	0,0110	14-90	1-1,5	0,035	800-1300
EPS	107-130	119,00	4,0100	17-25	40-70	0,035	1100-1400
XPS	107-150	3,73	0,0252	38	150	0,04	1450
PUR	102	13,70	0,0668	40	60	0,03	1260
Flachs	7-20	0,07	0,0076	25-30	1	0,04	1600
Hanf	5-10	0,07	0,0116	35	1-2	0,04	1600
Zellulose	4	0,23	0,0026	35-80	1-2,5	0,04	1800-2200
Zellulosefaserplatten	15	1,61	0,0123	50	1	0,04	1800
Holzfaserdämmplatte	17-25	-0,97	0,0068	140-160	5	0,04-0,05	2100
Holzwoleleichtbau- platte magnesitgeb.	5,69	-0,24	0,0021	400	5	0,1	1800
Sägemehl, Sägespäne	0,5-4	-1,04	0,0013	90-140	2-5	0,04-0,05	2000-2100
Schafwolle	2-8	-0,244	0,0034	16-50	1-5	0,04	960-1700
Strohballen/Schilfplatte	1,2-4	-1,45	0,0013	90-190	1-2	0,04-0,05	1500-2000
Schnittholz, lufttrocken	0,7	-1,8	0,0003	450-600	20-50	0,12-0,15	2340
Holz, techn. getrocknet	1-4	-1,69	0,0008	450-600	20-50	0,12-0,15	2340
Brettsperrholz, verleimt	7-9	-1,34	0,0030	450-650	30-60	0,11-0,14	2340
Brettsperrholz, verdübelt	2,3	-1,3	0,0009	500	20-50	0,12	2340
Spanplatte zementgebunden	3-5	0,08	0,0016	600	70	0,2	2340
OSB-Platte	8	-1,21	0,0042	610-660	120-400	0,13	2340
MDF-Platte	14	2,18	0,0200	600	20	0,1	2340

Strohballen in gängigen Formaten weisen einen noch geringeren Primärenergiegehalt auf als Stroh- und Schilfplatten, die eigens als Dämmstoffe hergestellt werden. Wenn die Annahme getroffen wird, dass Strohballen ein Abfallprodukt der Landwirtschaft sind, ihre Entstehung also unabhängig davon ist, ob sie weiter als Dämmstoff verwendet oder nur entsorgt (verbrannt, kompostiert) werden, so ist der einzige Primärenergieeinsatz der des Transportes vom Feld zur Baustelle.

Die negativen Werte beim Treibhauspotential ergeben sich dadurch, dass die Dämmstoffe während ihres Entstehens (Wachsens) mehr CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entziehen als während der Dämmstoffherstellung freigesetzt wird.

### 4.3 Ökologische und bauphysikalische Betrachtung einiger Dämmstoffe

In der Folge werden die Eigenschaften gängiger und innovativer Dämmstoffe, die sich grundsätzlich als Dämmung einer Außenwand eignen, näher vorgestellt. Die Dämmstoffe Stroh sowie Vakuumisulationspaneele werden in den Kapiteln 8 und 9 näher betrachtet.

#### 4.3.1 Steinwolle / Glaswolle

Steinwolle und Glaswolle gehören zu der Gruppe der Mineralwolle-Dämmstoffe. Ihre bauphysikalischen Eigenschaften sind praktisch ident, sie unterscheiden sich lediglich in der Zusammensetzung ihrer Ausgangsprodukte. Glaswolle wird aus denselben Grundstoffen, die auch zur Glaserzeugung benötigt werden, hergestellt (u.a. Quarzsand, Feldspat, Soda, Boraxpentahydrat). Auch ein Anteil an Altglas (laut Herstellerangaben bis 60%) können bei der Glaswolleerzeugung zugesetzt werden. Steinwolle wird aus Gesteinsschmelzen, hauptsächlich aus Dolomit, Diabas und Bauxit, gewonnen und kann ebenfalls einen Anteil an Altglas enthalten.

Mineralwolle ist dampfdiffusionsoffen, besitzt eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit (0,035-0,04 W/mK) und auf Grund ihrer Elastizität gute luftschalldämmende Eigenschaften. Sie ist weiters nicht brennbar und hält auch sehr hohen Temperaturen stand. Mineralwolle erhitzt sich im Brandfall relativ stark, wodurch eine Brandübertragung an anliegende Bauteile nicht auszuschließen ist. Ein bauphysikalischer Nachteil der Mineralwolle ist ihre Feuchtigkeitsempfindlichkeit. Mineralfaserdämmstoffe besitzen kein kapillares Saugvermögen. Ihre Wärmeleitfähigkeit nimmt bei Feuchtigkeit stark zu, bei 30% Wassergehalt ist diese etwa doppelt so hoch wie bei trockener Mineralwolle. Daher ist dieser Dämmstoff vor jeglicher Feuchtigkeit zu schützen.

Mineralwolle gehört zu den nichterneuerbaren Dämmstoffen. Die Rohstoffe sind jedoch mit Ausnahme von Mangandioxid, dessen Vorkommen bei gleich bleibenden Abbau in etwa 100 Jahren erschöpft sein wird [Mötzl, 2000], ausreichend vorhanden und werden bergmännisch ohne besonderen Umweltbeeinträchtigungen abgebaut. Nachteilig bei der Erzeugung ist der hohe Energieverbrauch, wobei Steinwolle etwas weniger Energie benötigt als Glaswolle. Mineralwolle kann, wenn ihr Reinheitsgrad sehr hoch ist, sie weder mit anderen Stoffen wie Zement, Mörtel, Bitumen oder Metallen verunreinigt noch durchfeuchtet ist, recycelt werden, sofern sie das RAL-Gütezeichen (siehe unten) trägt. Da Mineralwolle nicht verrottbar und auch nicht thermisch verwertbar ist, muss sie, wenn ein Recycling nicht möglich ist, deponiert werden, was sehr platzintensiv ist.

Das größte Problem der Mineralwolle sind ihre Faserstäube. Das gesundheitsschädigende Potential von künstlichen, glasigen Fasern (dazu zählt auch Asbest) hängt von der Fasergeometrie und deren Abbaubarkeit, der Biobeständigkeit, ab. Mineralwolle, die vor 1996 erzeugt wurde, wird aufgrund von wissenschaftlichen Erkenntnissen als krebserregend eingestuft und gilt als Gefahrstoff [Kluger, 2005]. Da ein Recycling nicht zulässig ist, muss diese Mineralwolle in staubdicht abgeschlossener Verpackung deponiert werden. Bei

Hantierung mit „alter“ Mineralwolle sind besondere Arbeitsschutzmaßnahmen zu beachten. Die Dämmstoffhersteller reagierten auf diese Erkenntnisse und entwickelten Mineralwolle, deren Faserstäube schneller im Organismus abgebaut werden. Der Grenzwert von Glaswolle liegt bei 10 Tagen, jener der Steinwolle bei 40 Tagen, jeweils bei einer Fasergröße



**Abb. 4-1 RAL-Gütezeichen**  
[[www.mineralwolle.de](http://www.mineralwolle.de)]

von 20 µm. Mit einer Änderung der Fasergröße könnte man die Lungengängigkeit der Faserstäube verhindern, die gute Dämmeigenschaft ginge damit jedoch ebenfalls verloren [Kluger, 2005]. Die Produkte, die in Österreich und Deutschland zugelassen sind, müssen den genannten Kriterien entsprechen und sind mit dem „RAL-Gütezeichen für Erzeugnisse aus Mineralwolle“ (Abb. 4-1) versehen. Eine Studie im Auftrag des IBO bestätigte, dass „keine Aussage bezüglich der Kanzerogenität“ [Mötzl, 2000] der

heute am Markt befindlichen Mineralfasern gemacht werden kann. Da eine gewisse gesundheitsgefährdende Wirkung bei Hautkontakt (z.B. Jucken, Ausschlag) nicht zur

Gänze ausgeschlossen werden kann, muss Mineralwolle luftdicht eingebaut werden. Bei Arbeiten mit Mineralwolle werden Schutzmaßnahmen, wie etwa Mundschutz und entsprechende Arbeitskleidung empfohlen.

Nach [Clark, 2000] besteht ein potentiell Gesundheitsrisiko, wenn Mineralwolle in der Wandkonstruktion nicht völlig abgedichtet eingebaut wird, da kleine Faserteilchen eingeatmet werden, welche sich „durch Lungen und andere Organe schneiden und sich im ganzen Körper ausbreiten“. Weiters schreibt Clark, dass „die meisten festen, bösartigen Tumore Glasfasern oder Asbest [...] enthalten“, welche oftmals auf eine undichte Stelle in der Glasfaserdämmung zurückzuführen sind [Clark, 2000]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Aussagen auf „alte“ Mineralwolle bezogen sind.

Ein zusätzlicher Kritikpunkt sind die als Bindemittel eingesetzten Kunstharze, die in Mineralwolleprodukten einen Anteil von bis zu 20% haben können und in fast allen Fällen Formaldehyd enthalten.

#### 4.3.2 Polystyrol (EPS, XPS)

Ausgangsprodukt des Dämmstoffs Polystyrol ist das aus Erdöl, seltener auch aus Erdgas, hergestellte Styrol. Dabei handelt es sich um einen komplexen, mehrstufigen Prozess, „der mit einer Reihe von gesundheitsgefährdenden Zwischen- und Nebenprodukten (z.B. Benzol) verbunden ist“ [Mötzl, 2000]. Außerdem ist die Gewinnung und Förderung von Erdöl umwelttechnisch sehr problematisch, da sie vor allem in ökologisch hochsensiblen Regionen stattfinden und schon bei normalem Betrieb diese Regionen stark belasten. Etwa 0,1% der jährlichen Rohölförderung werden für die Herstellung von Polystyrol-Dämmstoffen eingesetzt [Mötzl, 2000].

Polystyrol ist grundsätzlich recycelbar, doch nur wenn es nicht oder nur minimal mit Klebern, Putzen oder anderen Materialien verunreinigt ist. Da Polystyrol jedoch

hauptsächlich verklebt und verputzt wird, ist ein verunreinigter Abbau selten. Sortenreines, nicht verunreinigtes Polystyrol kann wieder der Dämmstoffproduktion zugeführt werden. Aus leicht verschmutztem Polystyrol können nur minderwertigere Produkte, u.a. Schüttungen, Zuschlagstoffe für Leichtbeton und Leichtputz oder zum Auflockern von Böden, hergestellt werden. Der Energiebedarf beim Recycling ist – wie auch bei der Herstellung selbst – sehr hoch. Polystyrol kann in modernen Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet werden ohne dass dabei die Grenzwerte der toxischen Stoffe überschritten werden. Der Dämmstoff ist nicht biologisch abbaubar und resistent gegen Ungeziefer.

Die Wärmeleitfähigkeit von Polystyrol ist sehr gering (0,035-0,04 W/mK). Aufgrund der Zugabe von Brandschutzmitteln wird dieser Dämmstoff der Klasse B1 zugeordnet. Nachteilig ist jedoch die mitunter massive Rauchentwicklung im Brandfall. Polystyrol besitzt eine äußerst geringe Sorptionsfähigkeit und in den gängigen Ausführungen einen sehr hohen Dampfdiffusionswiderstand. In den letzten Jahren kamen jedoch auch Polystyrol-Dämmstoffe mit einem geringeren Dampfdiffusionswiderstand auf den Markt. Ein Nachteil ist, dass Polystyrol eine Abnahme des Schalldämmmaßes zur Folge haben kann. Ungünstige Ausführungen, d.h. Polystyrol mit einem sehr hohen E-Modul in Verbindung mit einer sehr dünnen Putzschicht, können eine Verringerung des Schalldämmmaßes im Bereich um die Resonanzfrequenz um einige Dezibel verursachen.

Problematisch ist außerdem, dass aus eingebauten Polystyrol-Dämmstoffen in den ersten Jahren nach Herstellung Styrol entweichen und in die Raumluft gelangen kann. Dies ist – wie im Falle eines Passivhauses in Deutschland gemessen wurde – auch nicht auszuschließen, wenn der Dämmstoff an der Außenseite der Konstruktion angebracht ist [Feist, 1997]. Die Zeitschrift Öko-Test untersuchte marktübliche Polystyrol-Dämmplatten und kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass „alle Polystyrolplatten im Test das krebserregende Nervengift Styrol ausgasen“ und ebenso alle getesteten Platten „gesundheitlich problematische halogenorganische Verbindungen (AOX) als Flammschutzmittel“ [Schmitz-Günther, 2000] enthalten. Daher erhielten alle Dämmsysteme mit Polystyrol das Testurteil „nicht empfehlenswert“. In der Regel sinkt die Styrolkonzentration der Innenräume erst innerhalb der ersten Jahre unter die Nachweisgrenze.

Trotz dieser negativen Eigenschaften lag der Marktanteil des Polystyrols im Jahr 2000 bei Außendämmungen bei etwa 90% [Schmitz-Günther, 2000]. Es ist anzunehmen, dass der Anteil auch heute nur unwesentlich geringer ist.

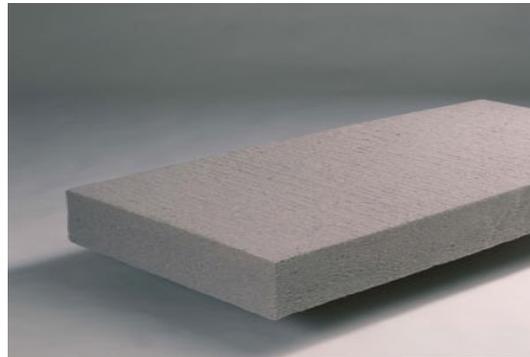
#### 4.3.3 Zellulose

Zellulosefaserflocken werden aus Altpapier und der Zugabe eines Brandschutzmittels (7-20%) hergestellt. Dazu wird hauptsächlich Borsalz verwendet, das aus Boraten, welche überwiegend aus Amerika oder der Türkei importiert werden, hergestellt. Zellulosefasern werden durch mechanische Zerkleinerung des Altpapiers hergestellt. Sie können trocken durch Einblasen in Hohlräume oder als Schüttungen eingesetzt oder nass mit Beigabe von Klebern aufgesprüht werden. Beide Verfahren erfordern den Einsatz von Fachkräften, da bei der Verarbeitung eine hohe Staubentwicklung auftreten kann. Jedoch belegen Prüfzeugnisse der Österreichischen Staubbekämpfungsstelle ÖSBS, dass die Feinstaubentwicklung weit

unter dem gesetzlichen Grenzwert liegt. Weiters sind auch keine Berufskrankheiten in der zelluloseverarbeitenden Industrie sowie Gesundheitsschädigungen durch eingebaute Zellosedämmstoffe bekannt [Mötzl, 2000].



**Abb. 4-2 Zelluloseflocken** [www.isofloc.de]



**Abb. 4-3 Zellulosefaserplatten** [www.homatherm.com]

Zellulose kann auch durch Jutefasern verstärkt und mit der Zugabe von Ligninsulfonat, Aluminiumsulfat und Tallöl zu Zellulosefaserplatten weiterverarbeitet werden. Auch dieses Dämmmaterial besteht zum größten Teil aus Recyclingmaterialien und hat den Vorteil, dass die Staubbelastung beim Einbau wesentlich geringer ist als bei Zelluloseflocken.

Sowohl Zellulosefaserflocken als auch -platten können mit vergleichsweise geringem Aufwand abgesaugt bzw. demontiert werden und an einer anderen Stelle wieder eingebaut werden. Außerdem kann dieser Dämmstoff auch in einer Müllverbrennungsanlage thermisch verwertet werden. Eine Kompostierung ist wegen des Borsalzgehaltes nicht möglich. Die Entsorgung von Borsalzen ist nicht ganz unproblematisch, da Borsalze – zwar in der niedrigsten Gefährdungsklasse aber dennoch – grundwasserschädlich sind. Mit Borsalzen versetzte Dämmstoffe gelten zwar nicht als Sondermüll [Öko-Test, 1996] und können grundsätzlich in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet werden. Neue Entwicklungen gehen jedoch dahin, Borsalze und Dämmstoff nach Abbau wieder zu trennen, um beide Stoffe erneut einsetzen zu können.

Aufgrund der industriellen Herstellung und des Vertriebs durch große Firmen, ist dieser Dämmstoff in der Anschaffung relativ günstig und ist zurzeit unter den nachwachsenden Dämmstoffen der am häufigsten Verwendete. Die Wärmeleitfähigkeit von Zellulose ist sehr gering (0,035-0,045 W/mK), ebenso der Dampfdiffusionswiderstand ( $\mu=1-2$ ). Die luftschalldämmenden Eigenschaften sind aufgrund der Elastizität sehr gut. Zellosedämmstoffe sind der Klasse B2 (normal entflammbar), einige Produkte auch der Klasse B1 (schwer entflammbar), zugeordnet.

#### 4.3.4 Flachs

Flachs gehört zu den ältesten und sehr robusten Kulturpflanzen der Menschheit, wurde schon in der Steinzeit vom Menschen genutzt und gedeiht auch in unseren Breiten sehr gut. Flachsfasern werden mit Kartoffelstärke (ca. 10%) und einem Brandschutzmittel (ca. 10%,



**Abb. 4-4 Flachsdämmplatten**  
[www.bautipps.de]

meist Borsalze) zu Dämmmatten oder Filz verarbeitet. Einige Hersteller verwenden zusätzlich zur Stabilisierung synthetische Stützfasern, was aus ökologischer Sicht wenig empfehlenswert ist. Flachs ist widerstandsfähig gegen Fäulnis und Schädlingsbefall, da die Pflanze kein Eiweiß enthält. Weiters sind Flachsmatten leicht zu verarbeiten, jucken nicht bei Hautkontakt und die Staubentwicklung ist gering und aus heutiger Sicht gesundheitlich unbedenklich. Flachs kann wieder verwendet werden, ist grundsätzlich auch kompostierbar, was jedoch problematisch bis unmöglich wird, je höher der Anteil an Borsalzen ist.

Flachs kann als Dämmstoff für Leichtbauten, für Installationsebenen, als Zwischensparrendämmung sowie als Fassadendämmung einer hinterlüfteten Fassade eingesetzt werden. Flachsfilze eignen sich als Trittschalldämmung (z.B. unter einem schwimmenden Estrich), lose Flachsflocken (auch Flachsschäben genannt) können als Schüttdämmstoff oder zur Hohlraumdämmung eingesetzt werden.

Die Wärmeleitfähigkeit des Flaches ist nur minimal höher als bei herkömmlichen Dämmstoffen (0,04-0,05 W/mK), die schalldämmenden Eigenschaften sind jedoch i.d.R. aufgrund der elastischen Flachsfasern etwas besser. Flachsdämmplatten sind nicht druckfest. Flachsfilze eignen sich hingegen als Trittschalldämmung.

#### 4.3.5 Hanf

Hanfdämmstoffe werden ganz ähnlich wie Flachsdämmstoffe produziert und verwendet. Als einziger Zusatz benötigt Hanf ein Brandschutzmittel (meist Borsalze). Einige Hersteller bieten auch Dämmmatten aus einer Kombination aus Hanf und Flachs an. Bei Hanf handelt es sich um eine sehr widerstandsfähige Kulturpflanze, die auch ohne Einsatz von Pestiziden gut gedeiht, sehr schnell wachsend ist (bis zu 4 Metern in nur wenigen Monaten) und zusätzlich als Bodenverbesserer gilt. Weitere positive Eigenschaften des Hanfes sind auf Grund des Kieselsäuregehaltes seine Resistenz gegen Feuchtigkeit und Fäulnis sowie auf Grund der Eiweißfreiheit und Bitterkeit seine Resistenz gegen Motten und anderen Schädlingen. Leider wurde der Anbau von Hanf unter dem Deckmantel der Drogenbekämpfung lange Zeit verboten, wodurch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und die positiven Eigenschaften des Hanfes in Vergessenheit gerieten bzw. die Pflanze durch die Möglichkeit der Verwendung als Droge in ein schlechtes Licht geriet. Erst in den 1990er Jahren wurde mit der Züchtung von Hanfsorten, die einen sehr geringen Tetrahydrocannabinol (THC)-Anteil aufweisen, das Anbauverbot in vielen Ländern gelockert und wird heute in Österreich und Deutschland sogar gefördert.

Die bauphysikalischen Eigenschaften sowie Eigenschaften bezüglich der Anwendung, Verarbeitbarkeit und Wiederverwertung sind denen des Flaches sehr ähnlich.

#### 4.3.6 Holzfaserdämmstoffe

Der Rohstoff für Holzfaserdämmstoffe sind Resthölzer und Abfallprodukte von Sägewerken oder Durchforstungsarbeiten, die für die Verarbeitung von klassischen Holzprodukten keine Bedeutung mehr haben. Die Resthölzer werden zerkleinert, durch ein thermomechanisches Verfahren in die einzelnen Fasern zerlegt und schließlich in Form gepresst. Als Bindemittel dient das holzeigene Lignin. Die einzelnen, etwa 3 cm starken Schichten werden mit Leim zu



**Abb. 4-5 Holzfaserplatte**  
[www.umweltschutz-bw.de]

stärkeren Platten verklebt. Je nach Eigenschaften und Hersteller des Dämmstoffes können die Holzfaserdämmplatten verschiedene Zusätze haben. So wird beispielsweise Aluminiumsulfat eingesetzt, um die Aktivierung der holzeigenen Lignine zu steigern, Parafin, um hydrophobierte Holzfaserdämmplatten zu erhalten oder Bitumen, um die Dämmplatten feuchteunempfindlicher zu machen. Letztere sollten nicht in Innenräumen eingesetzt werden, da durch das verwendete Bitumen Schadstoffe ausgasen können.

Der Nachteil dieser Dämmstoffe besteht im hohen Energieverbrauch bei der Herstellung und anschließenden Trocknung der Platten. Dieser kann jedoch zumindest zum Teil durch erneuerbare Energie gedeckt werden. Ökologisch positiv zu bewerten ist, dass der Ausgangsstoff (Resthölzer) ein Abfallprodukt darstellt und Holzfaserdämmstoffe einiger Hersteller ganz ohne Zusatzstoffe auskommen. Bei Plattenstärken von 3 cm und mehr wird jedoch immer Leim verwendet. Weiters können zusatzstofffreie Holzfaserdämmplatten auch nach Jahrzehnten wieder recycelt (neuerliche Herstellung von Faser- oder Spanplatten) oder kompostiert werden. Der geringe Anteil an Leim bleibt als Fremdstoffanteil im Kompost. Bei Verbrennung verhalten sich die Platten wie unbehandeltes Holz [Mötz, 2000].

Bauphysikalisch von Vorteil sind die für einen Dämmstoff sehr hohe speicherfähige Masse, die guten luftschall- und wärmedämmenden Eigenschaften sowie das Brandverhalten. Obwohl es sich um einen brennbaren Baustoff handelt, bestätigt die Eidgenössische Materialprüfanstalt die bessere Brandbeständigkeit von Holzfaserdämmplatten gegenüber Mineralwolle [Pavatex, 2007]. Wie bei Vollholz entsteht im Brandfall auch bei Holzfaserdämmstoffen an der Oberfläche eine Ascheschicht, die die Sauerstoffzufuhr unterbindet und damit die Brandausbreitung zu anderen Bauteilschichten bis zu einem gewissen Ausmaß verhindert.

#### 4.3.7 Holzspäne, lose

Sägemehl und Sägespäne schneiden beim Ökoindex 3 sowie auch bei den bauphysikalischen Kenngrößen besonders gut ab. Da dieser Dämmstoff jedoch erst seit kurzem am Markt ist, sind die Informationen und die Anzahl der anbietenden Firmen noch sehr spärlich.

Die Ausgangsbasis für diesen Dämmstoff sind die in großer Menge und regional verfügbaren Abfallspäne aus holzverarbeitenden Betrieben (meist Fichten- oder Kieferholz). Die Späne werden entweder mit Sodalaug und Molke gegen Pilzbefall und zur Verbesserung des Brandschutzes imprägniert und lose eingebaut [Nierobis, 2003] oder zusammen mit Magnesit eingebracht. Die Holzspan-Magnesit-Mischung bindet rasch ab und härtet später aus [Mötzl, 2000].

Auch die spezifischen Eigenschaften bezüglich der Wärmedämmfähigkeit, des Wärmespeichervermögens und des Schallschutzes sind ähnlich gut oder besser als bei anderen nachwachsenden Dämmstoffen. Weiters sind Holzspäne gesundheitlich völlig unbedenklich und beeinflussen durch ihre feuchteregulierende Eigenschaft das Raumklima positiv.

Problematisch ist hingegen der Einbau in die Hohlräume der Wandaufbauten, da dieser mit Spezialgeräten erfolgen und die Späne anschließend verdichtet werden müssen. Daher wird dieser Dämmstoff bisher nur selten alleine verkauft und auf der Baustelle eingebaut, sondern vorwiegend in Tafel-elementen schon werkseitig eingebaut und auf die Baustelle transportiert.

#### 4.3.8 Schafwolle

In Österreich und den meisten anderen mitteleuropäischen Ländern wird zurzeit nur etwa ein Drittel der anfallenden Schafwolle für die Weiterverarbeitung zu Teppichen, Stoffen oder Kleidung verwendet [LanaTherm, 2006]. Der restliche Teil wird vernichtet bzw. stünde als Rohstoff für Dämmmaterialien zur Verfügung. Von seinen bauphysikalischen Eigenschaften eignet sich Schafwolle sehr gut als Wärme-, Luft- und Trittschalldämmung. Auch seine hygroskopischen Eigenschaften wirken sich positiv aus: Schafwolle kann bis zu 40% seines Eigengewichtes an Feuchtigkeit aufnehmen, ohne dass sich die Wärmedämmvermögen wesentlich ändert. Weiters kann Schafwolle Schadstoffe wie z.B. Formaldehyd aus der Raumluft binden und teilweise sogar abbauen [Enz et al., 2006]. Schafwolle ist schwer entflammbar (erst bei Temperaturen über 560°C) und wird entweder unter der Klassifizierung „B1 schwer entflammbar“ oder „B2 normal entflammbar“ angeboten. Trotzdem wird Schafwoll-dämmstoffen meist ein Brandschutzmittel (Borsalz) beige-setzt.



Einziger Nachteil ist, dass sich Motten gern in Schafwolle aufhalten und sie daher entweder konstruktiv oder mit Zusatzstoffen vor Motten geschützt werden muss. Am Markt erhältliche Schafwoll-dämmstoffe sind zumeist mit einem Mottenschutz-imprägnierung ausgestattet (entweder Mitin FF und/oder Borax). Laut der deutschen Gefahrenstoffverordnung wird Mitin FF bei oraler und inhalativer Aufnahme als mindergiftig eingestuft, negative Wirkungen auf Menschen sind jedoch nicht bekannt, obwohl Mitin seit über 50 Jahren im Textilsektor eingesetzt wird [Mötzl, 2000].

**Abb. 4-6 Dämmplatte aus Schafwolle**  
[www.architektur.tu-darmstadt.de]

Mit Borsalz behandelte Wolle kann nicht kompostiert werden. Sie kann jedoch wieder recycelt werden oder, sollte dies nicht mehr möglich sein, in modernen Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet werden. Der Primärenergieeinsatz bei der Erzeugung ist sehr gering, vorausgesetzt die Schafwolle stammt aus lokalen Regionen (den größten Schafwollüberschuss gibt es nämlich in Australien und Neuseeland).

#### 4.3.9 Kartonwabendämmung

Die Kartonwabendämmung stellt ein relativ neues Dämmsystem dar, das ähnlich wie eine transparente Wärmedämmung die Sonnenstrahlung zur Erwärmung des Gebäudes nutzt. Dadurch wird innerhalb der Fassadenebene eine warme Temperaturzone aufgebaut. Das Kernelement dieses Systems, welches von der österreichischen Firma gab-solar GmbH entwickelt wurde, bildet eine Kartonwabe mit horizontalen Luftschichten, die in einer Glasfassade integriert ist. Die Abbildung 4-7 zeigt den Horizontalschnitt eines 13,1 cm dicken Fassadenpaneels, Variante I. Eine Weiterentwicklung der Firma ist die Variante II des Fassadenpaneels, welches eine dünnere Wabe und als aussteifende und dämmende Rückwand eine 3,5 cm dicke Holzweichfaserplatte verwendet. Die technischen Eigenschaften sind laut Firmenangabe dieselben. Die Vorteile sind optischer Natur, da die schlankere Rahmenkonstruktion im eingebauten Zustand vollständig unter den Anpressprofilen verschwindet und nur die Solarwabe sichtbar bleibt [gab-solar, 2005].

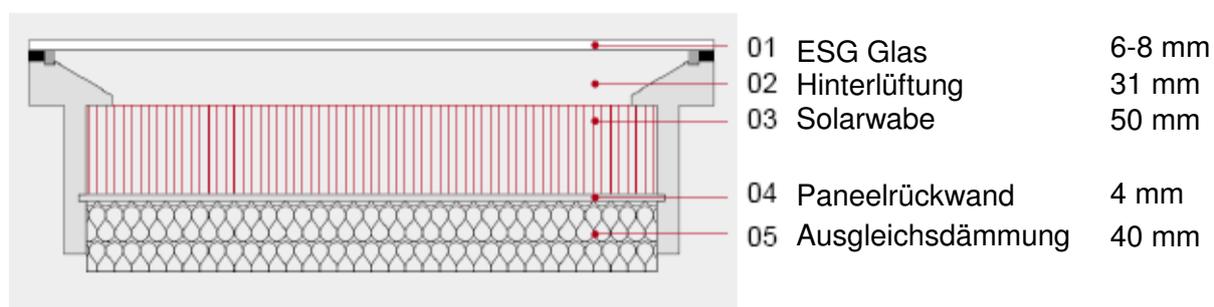
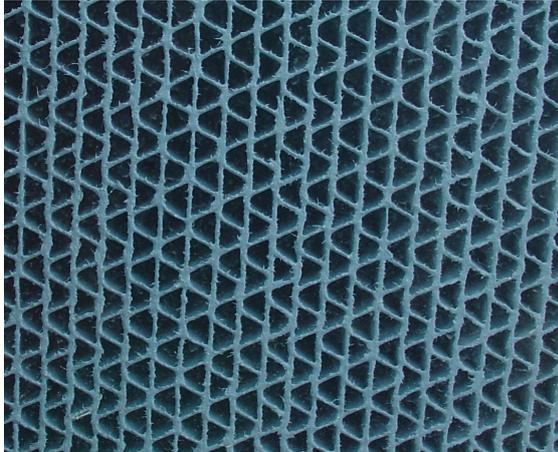


Abb. 4-7 Fassadenpaneel von gab-solar, Variante I [www.gab-solat.at]

Dieses Dämmsystem hat einen – je nach Ausrichtung und Sonnenstand – variablen U-Wert. Im Winter, wenn der Einfallswinkel der Sonne flach ist, dringt die warme Strahlung weiter in die Wabe ein. Im Sommer steht die Sonne wesentlich höher, sodass ein Großteil der Wärme durch die Verglasung abgestrahlt wird, ein weiterer Teil entweicht durch die Hinterlüftung. Der sommerliche Wärmeeintrag bewegt sich zwischen 3 und 10 W/m<sup>2</sup> und führt laut Herstellerangaben nicht zu sommerlicher Überwärmung [gab-solar, 2005]. Die Hinterlüftung des Einscheibensicherheitsglases dient der Abführung des Wasserdampfes und Vermeidung von Kondensation an der Scheibe.

Die Wabe besteht aus Zellulose (Abb. 4-8) und ist mit einer Brandschutzbeschichtung behandelt, die im Brandfall aufschäumt. Das Fassadenpaneel entspricht der Brandschutzklasse B1. Die Waben können in jeder RAL-Farbe geliefert werden. Die Farben haben laut Hersteller relativ wenig Einfluss auf die Wirkung des Dämmsystems, da die Absorption der Solarstrahlung im Winter vor allem im Wabenkörper und nicht an der

Oberfläche stattfindet. Die Abbildung 4-9 zeigt ein Wohnhaus mit grauer und gelb eingefärbter Kartonwabendämmung.



**Abb. 4-8 Kartonwabendämmung** [Markus Winkler]



**Abb. 4-9 Passivhaus, SolarCity Linz** [www.gap-solar.at]

Die Kartonwabendämmung kann sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen eingesetzt werden. Im Unterschied zur transparenten Wärmedämmung ist eine Wand mit hoher Speichermasse nicht erforderlich, da die Wirkung vor allem im Erwärmen der Außenseite der Tragschale liegt. Daher ist die Anwendung sowohl im Massiv- als auch im Leichtbau möglich.

Der Nachteil ist, dass dieses System das erste Mal im Jahre 1994 eingesetzt wurde und daher die Lebensdauer der Kartonwaben nicht aus der praktischen Erfahrung bekannt ist. Bei der Untersuchung einer sechs Jahre alten Wabe konnten jedoch keine negativen Alterserscheinungen festgestellt werden [gab-solar, 2005]. Weiterer Nachteil ist der relativ hohe Preis, der je nach Ausführung und Gebäudegröße inklusive Montage zwischen 380 und 580 €/m<sup>2</sup> liegt.

#### 4.3.10 Kalziumsilikatplatte



**Abb. 4-10 Kalzium-Silikatplatten**  
[www.kapella.de]

Neben dem Einsatz in der Sanierung von kondensatbelasteten Mauern kann die Kalziumsilikatplatte auch als Innendämmung und/oder Feuerschutzplatte eingesetzt werden. Die Rohstoffe für Kalziumsilikat sind Quarzsand und Kalk, die mit Wasser vermischt in einem Autoklaven dampfgehärtet werden. Die nötige Festigkeit wird durch eine Armierung aus Zellstoff erreicht. Dadurch entsteht eine sehr leichte Platte (Rohdichte etwa 330 kg/m<sup>2</sup>) mit sehr positiven bauphysikalischen Eigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,065 W/mK, was einen

gleichzeitigen Einsatz als Brandschutz und Dämmstoff möglich macht. Daher ist ihr Einsatz vor allem bei Leichtbauten, dessen Brandschutz nur durch Beplankung gewährleistet werden kann, von Interesse.

Kalziumsilikatplatten sind diffusionsoffen und besitzen eine hohe Porosität (ca. 80 Vol.-%), Kapillarität und Hygroskopizität. Dadurch können sie Feuchtigkeit, das z.B. aus Kondensat an der Wandkonstruktion stammt, aufnehmen und an die Raumluft abgeben. Das Raumluftklima wird dadurch positiv beeinflusst. Die Oberflächen der Kalziumsilikatplatten bleiben jedoch trocken.

Weiterer Vorteil ist, dass die Platten stark alkalisch sind und daher Schimmelbildung nicht möglich ist. Auch die Verarbeitbarkeit und Montage der Platten ist relativ einfach. Sie werden mittels eines zementhaltigen Mörtels an die Wand geklebt. Nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden kann die Oberfläche mit diffusionsoffenen Anstrichen oder Tapeten gestaltet werden.

Vom bauökologischen Standpunkt her ist Kalziumsilikat unbedenklich. Die Ausgangsstoffe sind ausreichend vorhanden, deren Abbau und Verarbeitung bergen keine bedeutenden Umweltrisiken. Im Jahr 1995 wurden Kalziumsilikatplatten vom Institut für Baubiologie in Rosenheim (IBR) hinsichtlich Gesundheit und Umweltbelastung getestet und mit dem Gütesiegel „Wohnbiologisch empfohlen“ ausgestattet. Seither werden die Kalziumsilikatplatten alle zwei Jahre diesen Tests unterzogen. Genaue Informationen über den Primärenergiebedarf sowie das Global Warming Potential sind jedoch nicht bekannt. Doch laut Angaben einer Herstellerfirma von Kalziumsilikatplatten ist der Energieverbrauch „aus ökologischer Sicht viel zu hoch, denn bei der Verpressung im Autoklaven und der nachfolgenden Trockenstraße wird sehr viel Wärme, sprich Energie, verbraucht“ [Längle, 2007].

#### 4.4 Latenter Wärmespeicher - PCM

Bei latenten Wärmespeichern handelt es sich um Materialien, die Wärme speichern, indem sie ihren Aggregatzustand ändern (engl. „Phase Change Materials“, kurz PCM). In einem bestimmten Temperaturbereich können latente Wärmespeicher somit Wärmeenergie der Umgebung aufnehmen, ohne dass sie sich selbst erwärmen. Erst nach Abschluss des Phasenübergangs erhöht sich die Temperatur der latenten Wärmespeicher. Dadurch entsteht eine relativ große Phasenverschiebung, sodass die PCM die gespeicherte Wärme in der Nacht wieder abgeben können. Zu dem Zeitpunkt ist die Außentemperatur schon wieder abgekühlt und die freigesetzte Wärme der PCM kann durch Nachtlüftung abgegeben werden. Somit können Temperaturspitzen abgemindert werden und der thermische Komfort vor allem in Leichtbauhäusern, die naturgemäß über wenig speicherfähige Masse verfügen, wird erhöht.

Die gesamte Energie, die zur Änderung des Aggregatzustandes benötigt wird, kann somit latent gespeichert werden. Eine nur wenige Zentimeter dicke Schicht eines latenten Wärmespeichers hat dabei dieselbe Wärmespeicherfähigkeit wie etwa eine 36 cm dicke Ziegelmauer [Hausladen et al, 2005]. Die dabei entwickelten Materialien haben je nach Klimaanforderung einen Schmelzpunkt, der zwischen 24 und 26°C liegt. Am häufigsten kommen dabei Parafine zum Einsatz aber auch Wasser mit Zusätzen oder Salzhydrate erfüllen diese Anforderungen. Da latente Wärmespeicher bei höheren Temperaturen flüssig

sind, können sie keine konstruktiven Aufgaben übernehmen. Sie werden in kleine Kunststoffkapseln (2-20  $\mu\text{m}$ ) gefüllt, die konventionellen Baumaterialien (Platten, Putze, Anstriche, Mörtel) beigefügt werden.

Die Vorteile eines latenten Wärmespeichers sind, dass auf sehr geringem Raum große Wärmemengen gespeichert werden können [Hausladen et al., 2005] und dass die Kapseln aufgrund der geringen Größe leicht verarbeitbar und praktisch unzerstörbar sind [Variotec, 2006]. Neben dem Einsatz an der Innenseite einer Wand können latente Wärmespeicher auch in Fußböden oder im Deckenbereich integriert werden. Ein Nachteil stellt jedoch die Brennbarkeit von Parafinen dar.

## II. Wandaufbauten

Bei Wandaufbauten in Holzbauweise unterscheidet man grundsätzlich Holzleichtbauweise und Holzmassivbauweise. Bei der Leichtbauweise sind die Tragkonstruktion und in der Regel auch die Beplankungen aus Holz bzw. Holzwerkstoffen. Die Dämmebene kann grundsätzlich auch aus Holzwerkstoffen (z.B. Holzwoleleichtbauplatten) bestehen. Dies ist aber in der Praxis meist nicht der Fall. Der Holzanteil eines Leichtbaus liegt oft bei nur 10-30% [Thoma, 2003] bezogen auf die gesamte Baumasse. Beim Holzmassivbau liegt der Anteil an Massivholz viel höher und kann auch bei Niedrigenergiehäusern bis zu 100% erreichen. Eine massive Holzwand kann demnach bei speziellen Systemen auch ohne zusätzlichen Dämmstoff und ohne Dampfbremse alle Anforderungen, die an einen modernen Wandaufbau gestellt werden, erfüllen. In fast allen Fällen besitzt jedoch ein Massivholzbau eine Dämmstoffebene.

In dieser Arbeit wird weiters auf das noch relativ junge Holzmodulstecksystem und auf Wandaufbauten mit Dämmstoffen, die sich wesentlich von herkömmlichen Dämmstoffen unterscheiden (Strohdämmung, Vakuumdämmung), eingegangen.

## 5 WANDAUFBAUTEN IN LEICHTBAUWEISE

Die Wandaufbauten in Leichtbauweise können als Skelett-, Rahmen- oder Tafelbau verwirklicht werden. Die Unterschiede werden nun folgend erläutert.

### 5.1 Bauweisen des Holzleichtbaus

#### 5.1.1 Skelettbauweise

Die moderne Skelettbauweise hat sich aus dem historischen Fachwerksbau entwickelt und besitzt wie diese eine Trennung zwischen lastabtragenden und wandbildenden Elementen. Die räumliche Tragstruktur besteht aus senkrechten Stützen und waagrechten Trägern, die entweder aus Vollholz oder aus höher belastbaren Holzwerkstoffen (Brettschichtholz, Konstruktionsvollholz) gefertigt werden. Die Stützen, auch Ständer genannt, bilden ein Raster mit gleichen Abständen und reichen meist über mehrere Stockwerke. Die raumbildenden Bauteile mit integrierter Dämmschicht, Beplankung, Wind- und Dampfbremse werden getrennt von der Tragstruktur meist außen am Holzskelett montiert und bilden eine geschlossene Fassade ohne Durchdringungen. Diese Wandelemente können vorgefertigt und in großen Tafeln auf die Baustelle transportiert werden, was eine schnelle Montagezeit mit sich bringt; sie wirken jedoch – und das unterscheidet den Skelettbau vom Holzrahmenbau und vom Holztafelbau – nicht aussteifend. Da die Wände nicht Teil der Tragstruktur sind, d.h. weder Lasten aufnehmen noch aussteifend wirken, können die Innenwände beliebig versetzt oder auch ganz weggelassen werden. Diese Flexibilität hat im Wohnbau große Vorteile.

Die Aussteifung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, entweder über diagonale Holzstreben, wie dies im Fachwerksbau üblich ist, über Stahlverspannungen oder über schubsteif ausgeführte Decken, Dächer oder Treppenhäuser.

### 5.1.2 Rahmenbauweise

Das Grundelement dieser Bauweise ist ein Rahmen aus massivem Konstruktionsholz oder, um Wärmebrücken zu minimieren, aus Stegträgern. Dieser Rahmen wird zwecks Aussteifung mit Platten aus Holzwerkstoffen oder Gipswerkstoffen beplankt. Daraus entsteht ein schlankes und relativ leichtes, aber durchaus leistungsfähiges Tragsystem, das „sämtliche senkrechten Gebäude- und Verkehrslasten und auch die waagrechten Lasten aus Windschub effizient aufnimmt“ [Löfflad, 2005]. Zusätzliche Dämmebenen zur Verringerung des U-Wertes und zur Vermeidung von Wärmebrücken können entweder außerhalb oder innerhalb der Rahmenkonstruktion – zweitere dient zusätzlich als Installationsebene – angebracht werden.

Die gängigsten Breiten eines Rahmens sind die Maße 62,5 cm und 81,5 cm. In der Regel werden die Rahmen in den Werkstätten geschoßhoch gefertigt. Seltener werden haushohe Elemente eingesetzt, bei denen die Decken nachträglich eingehängt werden. Letztere Variante bietet den Vorteil, dass die äußere Hülle des Hauses eine höhere Luftdichtigkeit erlangt [Löfflad, 2005].

### 5.1.3 Tafelbauweise

Der Tafelbau ist mit dem Rahmenbau verwandt, jedoch gibt es beim Tafelbau ein wesentlich höheres Maß an Vorfertigung. Bei den meisten Fertigteilhäusern handelt es sich um diese Bauweise. Die Wand- und Deckenelemente werden schon im Werk komplett vorgefertigt, inklusive Dämmung, Beplankung, welche der Aussteifung und dem Brandschutz dient, Dampf- und Windbremse und Fassade, und auf der Baustelle bei kurzer Montagezeit aufgestellt. Auch die Fenster und die Leitungsführungen für die auf der Baustelle eingebaute Haustechnik sind schon im Wandelement integriert.

Die Vorteile dieser industriellen Vorfertigung sind unter anderem die Bauzeit von nur wenigen Tagen und die Qualitätskontrollen der Aufbauten, die schon im Werk stattfinden können.

Die drei oben genannten Holzbauweisen, zusammengefasst werden sie auch unter dem Begriff „Ständerbau“, haben gemeinsam, dass es sich um eine Leichtbauweise handelt, bei der der Holzanteil der Wandkonstruktionen relativ gering ist. Dadurch ist auch der positive Einfluss des Holzes auf das Raumklima eher unbedeutend. Auch die speicherfähige Masse ist gering. Vorteile sind jedoch, dass relativ dünne Wände U-Werte erreichen können, die sich für ein Niedrigenergiehaus eignen und dass durch den effizienten Materialverbrauch und die industrielle oder werkstattmäßige Vorfertigung die Häuser i.d.R. günstiger angeboten werden können als Massivbauten aus Ziegel oder Holz.

## 5.2 Bauphysikalische Eigenschaften des Holzleichtbaus

### 5.2.1 Thermische Eigenschaften

Da die Tragkonstruktionen bei einem Holzleichtbau nur aus einem relativ schlanken Traggerüst und nicht aus vollflächigen Wandbildnern bestehen, bleibt bei einem Aufbau einer Außenwand viel Platz für Wärmedämmung, sodass schlanke Wandaufbauten für Niedrigenergiehäuser realisiert werden können. Da der Dämmstoff zumindest volumenmäßig den größten Anteil der Wand ausmacht, sind die bauphysikalischen Eigenschaften der Leichtbauwand natürlich sehr stark von den Eigenschaften des jeweiligen Dämmstoffes abhängig. Der zurzeit am häufigsten eingesetzte Dämmstoff ist Mineralwolle, vor allem weil er relativ günstig und gut verarbeitbar ist, d.h. sich gut in die Zwischenräume der Holzständerkonstruktion einbringen lässt. Vom ökologischen, aber auch vom bauphysikalischen Standpunkt gesehen, eignen sich jedoch nachwachsende Dämmstoffe wie Zellulose, Stroh, Holzfaserdämmstoffe oder Flachs besser als Mineralwolle, vor allem, da nachwachsende Rohstoffe einen besseren Schutz gegen sommerliche Überwärmung bieten (siehe Kapitel 4.2.3). Da eine Leichtbaukonstruktion über sehr wenig speicherfähige Masse verfügt, kann die sommerliche Überwärmung genauso wie das schnelle Auskühlen des Hauses im Winter zum Problem werden. Massive Innenwände und massive Decken können diese Nachteile zwar ein wenig abfedern, doch das Problem der geringen Masse der Außenwand nicht zur Gänze wettmachen. Entscheidender ist es, einen Dämmstoff zu wählen, der eine größere Masse und eine geringere Temperaturleitzahl als die gängig verwendete Mineralwolle hat.

Ein Versuch im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr und Technologie bestätigte, dass der Energieverbrauch eines Hauses nicht nur vom U-Wert der Außenhülle, sondern auch von der speicherfähigen Masse abhängt [Thoma, 2003]. Der Vergleich zwischen einem Passivhaus in Massivbauweise und einem Passivhaus in Skelettbauweise ergab, dass trotz desselben U-Wertes der Außenbauteile bei zweitem der jährliche Heizwärmebedarf um bis zu 56% höher ist.

Wichtig bei der Auswahl des Dämmstoffes ist weiters, dass dieser die Zwischenräume der Holzständer vollständig und lückenlos ausfüllt. Da die Wärmedämmschicht beim Leichtbau von der Tragkonstruktion unterbrochen ist, ist es vor allem bei einem Niedrigenergiehaus sinnvoll, eine zusätzliche Außendämmung anzubringen um Wärmebrücken zu vermeiden (siehe Kapitel 10.1).

### 5.2.2 Feuchteempfindlichkeit

Bei Häusern in Leichtbauweise muss besonders auf die sorgfältige Ausführung des Feuchteschutzes der Konstruktion geachtet werden. Diese Konstruktionen kommen nicht ohne außenseitiger Windsperre und innenseitiger Dampfbremse, die die in der Konstruktion liegende Dämmung vor Feuchtigkeit schützt, aus. Für diese Schichten wird vermehrt Platten (z.B. OSB-Platte als Dampfbremse, Holzweichfaserplatte als Windsperre) gegenüber Folien

und anderen sehr dünnen Werkstoffen der Vorzug gegeben, da diese widerstandsfähiger sind und nicht schon mit der Spitze eines Nagels durchbohrt werden können. Wie hoch die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (sd-Wert) der Dampfbremse sein muss, errechnet sich aus dem Dampfdruckgefälle des Wandaufbaues (z.B. mit Hilfe des Glaser-Diagrammes) und hängt stark vom Dampfdiffusionswiderstand der äußeren Bauteile der Wand ab. Schon sehr kleine Löcher in Dampfbremsen können weitreichende Folgen mit sich bringen.

### 5.2.3 Brandverhalten

Für Häuser, die in Leichtbauweise errichtet werden, kann der Brandschutz ein Problem darstellen, da die Holzquerschnitte relativ gering sind und genügend Sauerstoff für den möglichen Brand in der Konstruktion vorhanden ist. Der geforderte Brandschutz wird durch eine Beplankung aus unbrennbaren Materialien erreicht. Mit einer 1,5 cm starken Gipskartonplatte an der Wandinnenseite wird ein Brandverhalten von REI 30 erreicht. Bei stärkeren Gipskarton- oder Feuerschutzplatten kann auch ein Brandschutz von REI 60 erreicht werden. Höhere Werte als REI 60 sind technisch möglich, werden jedoch selten angewendet. Eine mehrlagige Anbringung von Feuerschutzplatten wäre hierbei notwendig.

### 5.2.4 Schallschutz

Auch der Schallschutz hängt stark vom gewählten Wandaufbau, insbesondere vom gewählten Dammstoff, ab. Da die Wände eine relativ geringe Masse haben, kann bei Leichtbauten auch der Luftschallschutz ein Problem darstellen. Dieses lässt sich mit einem mehrschaligen Wandaufbau, wobei die einzelnen Schichten des Aufbaus möglichst elastisch miteinander verbunden sein sollten, wesentlich verbessern. Bei sorgfältig ausgeführten mehrschichtigen Wandaufbauten kann ein bewertetes Schalldämmmaß von etwa 50 dB erreicht werden.

## 5.3 Weitere Vorteile und Nachteile des Holzleichtbaus

### 5.3.1 Vorfertigung

Bei den meisten im Holzleichtbau gebauten Häusern handelt es sich um Fertigteilhäuser, welche standardisiert im Werk vorgefertigt werden. Dies bringt mitunter einen Preisvorteil gegenüber einem individuell geplanten Haus mit sich, gleichzeitig wird jedoch die Individualität des Hauses eingeschränkt. Änderungen der Standardpläne sind heutzutage zwar bei den meisten Fertigteilhausfirmen möglich, doch geht hiermit der Preisvorteil schnell verloren. Weiters können sich nachträgliche Umbauten (Anbau, Dachbodenausbau, Einbau von Sanitärräumen, Sanierungen) bei Fertigteilhäusern komplizierter gestalten als bei einem konventionell errichteten Gebäude, wenn spätere Änderungen nicht schon zur Zeit der Planung mitberücksichtigt wurden.

### 5.3.2 Wertverlust

Obwohl noch keine Studien bekannt sind, die bestätigen, dass in Leichtbauweise errichtete Häuser eine kürzere Lebensdauer als ein massive Häuser (Massivholz, Ziegel oder Beton) haben, kann dennoch von einer geringeren Wertbeständigkeit eines derartigen Fertigteilhauses ausgegangen werden. Dies ist auch dadurch bedingt, dass ein Fertigteilhaus in den meisten Köpfen der Bevölkerung noch als „minderwertig“ angesehen wird. Ein gebrauchtes Massivhaus wird aus diesem Grund und auch, weil es sich bei Umbau und Sanierung flexibler darstellt, i.d.R. einen höheren Preis erzielen als ein Fertigteilhaus.

### 5.3.3 Ressourcenschonung

Ein Haus in Leichtbauweise kann, wenn die entsprechenden ökologischen Dämmstoffe gewählt werden, als ressourcenschonend bezeichnet werden. Der Holzanteil ist wesentlich geringer als bei allen anderen Wandaufbauten in Holzbauweise. Letzteres ist jedoch für das sehr holzreiche Mitteleuropa nicht so wesentlich, kann aber für holzarme Gegenden entscheidend sein.

## 5.4 Mögliche Aufbauten von Wänden im Leichtbau

Bei den folgenden Wandaufbauten wurde immer derselbe Dämmstoff (Zellulose) in der gleichen Stärke verwendet, um sie miteinander vergleichbar zu machen. Wird eine andere Dämmstoffstärke gewählt, so kann man als Richtwert annehmen, dass sich der U-Wert je Zentimeter Dämmstoff um etwa 0,01 W/m<sup>2</sup>K verringert. Es werden hier nur Wandaufbauten angeführt, die neben der bauphysikalischen Tauglichkeit für ein Niedrigenergiehaus auch aus ökologischer Sicht als empfehlenswert einzustufen sind.

### 5.4.1 Schlanker Wandaufbau

Hierbei handelt es sich um einen relativ einfachen Wandaufbau, der mit einer Stärke von 26,2 cm zu den schlanksten seiner Art für ein Niedrigenergiehaus zählt. Der Wandaufbau besteht fast zur Gänze aus nachwachsenden Rohstoffen.

Als Putz kann hier jeder beliebige Putz verwendet werden, dessen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zwischen 10 und 35 liegt. Dies trifft auf fast alle gängigen Putzsysteme mit Ausnahme von Kunstharzputzen zu. Statt der Holzfaserdämmplatte kann auch wie im Wandaufbau 5.4.2 eine Holzwolleleichtbauplatte eingesetzt werden, wobei die Dampfbremse darauf abgestimmt werden muss.

Grundsätzlich könnte auch Polystyrol als Außendämmung eingesetzt werden. Dies ist jedoch bei ökologischer Betrachtung bedenklich (siehe Kapitel 4.3.2). Zusätzlich kann Polystyrol nicht direkt am Konstruktionsholz befestigt werden, was einen zusätzlichen Plattenwerkstoff (Spanplatte, Gipsfaserplatte) erforderlich macht. Um durch die verringerte

Wasserdampfdiffusionsdurchlässigkeit des Polystyrols die Konstruktion nicht durch Kondenswasser zu gefährden, müsste die Dampfbremse an der Innenseite einen wesentlich höheren  $s_d$ -Wert aufweisen (etwa 13-20 m). Eine Fehlstelle der Dampfbremse wirkt sich in diesem Fall wesentlich gravierender aus.

**Tabelle 5–1 Schlanker Wandaufbau in Leichtbauweise**

<b>Wand mit Zellulosedämmung</b>					
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	Anteil	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Putz	1,00	1800	1		0,01
Holzfaserdämmplatte	6,00	200	0,055		1,09
Holzsteher 6x16 dazw.	16,00	600	0,15	0,1	3,71
Zellulosefaser		55	0,04	0,9	
Spanplatte	2,00	700	0,13		0,15
Dampfbremse $s_d \geq 2m$					
Gipskartonfeuerschutzplatte (GFK)	1,25	900	0,21		0,06
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>26 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,19 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>73 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b> [Dataholz, 2007]	<b>49 dB</b>				

Der Nachteil dieses Wandaufbaus ist, dass die Dampfbremse nur durch eine 12 mm dicke Gipskartonplatte geschützt ist und somit stark gefährdet ist, durch Anbohren oder Anschlag eines Nagels beschädigt zu werden. Eine Leitungsführung in diesem Wandaufbau ist ebenfalls erschwert bis wenig empfehlenswert, da jede Durchdringung der Dampfbremse eine sorgfältige Abdichtung erfordern würde.

Der Wandaufbau entspricht dem Brandschutz REI 30. Verwendet man jedoch eine 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte oder zwei 10 mm starke Gipsfaserplatten, so erreicht der Wandaufbau die Brandschutzklasse REI 60.

#### 5.4.2 Wandaufbau mit Vollholzschalungen

Der Wandaufbau ist sehr ähnlich dem ersten, hat jedoch an der Außenseite statt der Holzfaserdämmplatte eine Holzwoleleichtbauplatte, dessen  $\lambda$ -Wert verglichen mit anderen Dämmstoffen etwas größer ist. Dadurch ergibt sich ein dickerer Wandaufbau um denselben U-Wert zu erlangen.

Der Vorteil der Holzschalung ist, dass hier kein Werkstoff mit Bindemitteln, welche vor allem in der Zeit nach dem Einbau giftige Dämpfe verbreiten können, verwendet wird. Außerdem wird durch die insgesamt 5 cm Holzschalung und die Holzwoleleichtbauplatte die Masse der Wand und der Schallschutz etwas erhöht. Ansonsten gelten bei diesem Wandaufbau dieselben Anmerkungen wie beim oben genannten.

Tabelle 5–2 Wandaufbau in Leichtbauweise mit Holz-Vollschalung

<b>Wand mit Holzvollschalung</b>					
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	Anteil	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]		[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Putz	1,00	1800	1		0,01
Holzwoleleichtbauplatte	8,00	370	0,09		0,89
Holz-Vollschalung (diagonal)	2,50	460	0,13		0,19
Holzsteher 6x16 dazw.	16,00	600	0,15	0,1	3,71
Zellulosefaser		55	0,04	0,9	
Holz-Vollschalung (diagonal)	2,50	460	0,13		0,19
Dampfbremse $s_d \geq 7m$					
Gipskartonfeuerschutzplatte (GFK)	1,25	900	0,21		0,06
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>31 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,19 W/m<sup>2</sup>*K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>99 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß [Dataholz, 2007]</b>	<b>51 dB</b>				

5.4.3 Wandaufbau mit Installationsebene

Tabelle 5–3 Wandaufbau in Leichtbauweise mit Installationsebene

<b>Wand mit Installationsebene</b>					
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	Anteil	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]		[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Putz	1,00	1800	1		0,01
Holzfaserdämmplatte	6,00	370	0,055		1,09
Holzsteher 6x16 dazw.	16,00	600	0,15	0,1	3,71
Zellulosefaser		55	0,04	0,9	
OSB-Platte (luftdicht verklebt)	2,00	680	0,13		0,15
Holz-Lattung dazw.	4,00	460	0,15	0,1	0,93
Dammstoff		55	0,04	0,9	
Gipsfaserplatte	1,25	1150	0,36		0,03
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>30 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,16 W/m<sup>2</sup>*K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>104 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß [Pavatex, 2007]</b>	<b>54 dB</b>				

Dieser Wandaufbau verwendet als Dampfbremse eine OSB-Platte, die wesentlich strapazierfähiger als eine Folie ist. Sie wird zusätzlich durch eine Installationsebene geschützt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Dampfbremse auch nach Jahrzehnten noch intakt ist – vorausgesetzt die einzelnen Platten werden mit den geeigneten Klebebändern miteinander verbunden. Die Installationsebene hat außerdem den Vorteil, dass einige Zentimeter an zusätzlichem Dämmstoff vorhanden sind und sich neben dem U-

Wert auch das Schalldämmmaß verbessert. Der angegebene Wert von 54 dB wird bei einer Konstruktion mit Federschiene zwischen Gipskartonplatte und Lattung sowie zusätzlichen Akustikplatten (z.B. poröse Weichfaserplatten) in der Installationsebene erreicht. Wird die Gipsfaserplatte direkt auf die Lattung angeschlagen, so verringert sich das Schalldämmmaß auf etwa 49 dB [Pavatex, 2007]

#### 5.4.4 Hinterlüfteter Wandaufbau

Tabelle 5–4 Wandaufbau in Leichtbauweise mit hinterlüfteter Fassade und Installationsebene

<b>Wand mit Installationsebene, hinterlüftet</b>					
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	Anteil	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]		[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Horizontal-/ Stülpchalung (Lärche)	2,00	590	0,15		0,13
Hinterlüftung / Konterlattung	4,00				
MDF (Mitteldichte Faserplatten)	1,20	600	0,12		0,10
Holzsteher 6x16 dazw.	16,00	600	0,12	0,1	3,73
Zellulosefaser		55	0,04	0,9	
OSB-Platte (luftdicht verklebt)	2,00	680	0,13		0,15
Holz-Lattung (a=40 cm) dazw.	4,00	460	0,15	0,1	0,93
Zellulosefaser		55	0,04	0,9	
Gipsfaserplatte	1,25	1150	0,36		0,03
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>30 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,19 W/m<sup>2</sup>*K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>68 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b> [Dataholz, 2007]	<b>49 dB</b>				

Ein Wandaufbau in Leichtbauweise kann auch mit einer hinterlüfteten Fassade ausgeführt werden. Der Wandaufbau wird unempfindlicher gegen Kondensat, da die Konstruktion aufgrund der Hinterlüftung besser austrocknen kann. Da jedoch die zusätzliche Außendämmung entfällt, hat dieser Wandaufbau Wärmebrücken (vgl. Kapitel 10.1), wodurch sich auch der U-Wert des Aufbaus vergrößert.

Das angegebene Schalldämmmaß von 49 dB bezieht sich wie beim Wandaufbau 5.4.3. auf eine elastische Ausführung, etwa mit Schwingbügel, Federschiene oder Dämmfilz, der Vorsatzschale. Bei fixer Verschraubung der Gipsfaserplatte mit der Lattung verringert sich die Schalldämmung um etwa 6 dB.

## 6 WANDAUFBAUTEN AUS MASSIVHOLZ

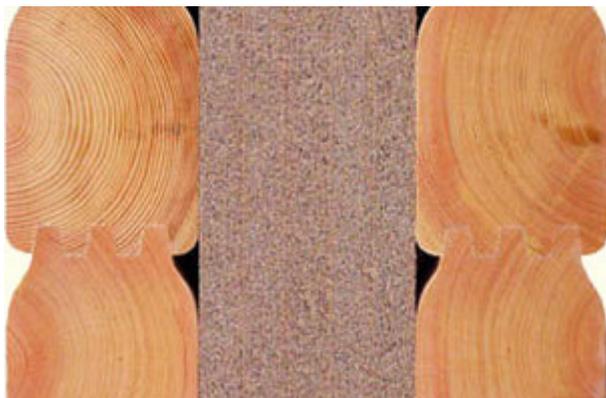
Der Massivholzbau kennt zwei unterschiedlichen Bauarten, die Blockbauweise und die Tafelbauweise. Einer der Unterschiede liegt dabei im Vorfertigungsgrad: Bei der traditionellen Blockbauweise werden die einzelnen Bohlen zur Baustelle geliefert, bei der Tafelbauweise i.d.R. die geschoßhohen Wände. Der Blockbau kommt vor allem beim privaten Hausbau zur Anwendung, der Tafelbau auch bei Geschoßwohnbauten.

### 6.1 Blockbauweise

Der älteste Vertreter der Massivholzbauweise ist das Blockhaus, dessen Wände aus grob bearbeiteten Rund- oder Kanthölzern bestehen. Diese Bauweise entstand schon vor Jahrtausenden in verschiedenen Regionen der Erde, welche einerseits über große Waldgebiete verfügten und andererseits auch mit kalten Jahreszeiten zu kämpfen hatten. Es ist anzunehmen, dass sich der Blockhausbau zeitgleich in unterschiedlichen Gebieten entwickelt hat. Schon den alten Römern war dieser Baustil geläufig. Über die Langlebigkeit dieser Konstruktionsweise zeugen u.a. über 600 Jahre alte Blockhäuser in Finnland und Norwegen.

#### 6.1.1 Horizontale Bohlen

Anfangs wurden die geraden Stämme nur wenig bearbeitet und aufeinander gelegt. Im Laufe der Jahrhunderte verbesserte sich mit der Entwicklung von neuen Werkzeugen und dem erworbenen Know-How auch die Qualität der Blockhäuser. Die Verformungen des Holzes und somit die Entstehung von undichten Stellen konnten zwar minimiert werden, doch auch bei Verwendung von getrocknetem Holz und genauer Verarbeitung wird dieser Aufbau niemals winddicht werden, da sich das Holz – wenn auch nur in geringem Ausmaß –



**Abb. 6-1 Doppelschalige Blockbohlenwand**  
[Fa. Stommel]

verformt und Setzungen der Wände nicht ganz vermieden werden können. Diese einschalige Konstruktion ohne Dämmebene ist heute auf Grund der höheren Wärmeschutz- und Luftdichtigkeitsanforderungen nicht mehr zeitgemäß. Eine Weiterentwicklung im Blockhausbau stellt die doppelschalige Blockbohlenwand (Abb. 6-1) dar. Diese, versehen mit einer Wärmedämmung im Hohlraum der massiven Holzwände, Luftdichtigkeitsschichten und ausgereiften Eck- sowie Nut- und Federverbindungen, erfüllt auch die

Anforderungen für Niedrigenergie- und Passivhäuser. Der Nachteil ist jedoch der hohe Materialverbrauch von ausgewählten, kerngetrennten Bohlen und die relativ komplizierten Eckverbindungen. Heute sind auch Blockbohlen am Markt, die aus mehreren verleimten Kanthölzern bestehen, um Verdrehungen und Rissbildungen zu minimieren. Weiters werden

auch Wandaufbauten mit nur einer Blockbohlenwand, aber zusätzlicher innen- oder außenliegender Dämmebene angeboten.

Eine Luftdichtigkeitsschicht ist bei einem Blockhaus von hoher Wichtigkeit, da eine gewisse Verformung der Bohlen nicht ausgeschlossen werden kann (Verdrillung bzw. Setzung). Auch nur minimale Luftschlitze bewirken in der Konstruktion eine enorme Verminderung des U-Wertes.

### 6.1.2 Senkrechte Bohlen



Eine Wandkonstruktion, bei der die Bohlen senkrecht angeordnet werden, wurde von einem Blockhaushersteller entwickelt und patentiert. Die Wände bestehen aus doppelten Blockbohlen mit innenliegender Holzweichfaserdämmung. Die Vorteile der vertikalen Anordnung der Blockbohlen sind die höhere Tragfähigkeit – Holz ist in Faserrichtung wesentlich höher belastbar als normal zur Faser – und die dadurch bedingte geringere Setzung. Laut Firmenangaben ist ein weiterer Vorteil, dass diese Wände im Werk vorgefertigt werden. Grundsätzlich wäre aber auch eine Vorfertigung bei horizontalen Bohlen denkbar. Das traditionelle Erscheinungsbild eines Blockhauses geht mit dieser Bauweise jedoch verloren.

**Abb. 6–2 Senkrechte Blockbohlenwand**  
[Fa.Stommel]

## 6.2 Massive Tafelbauweise

In den vergangenen Jahrzehnten entstanden neue Systeme für Massivholzhäuser, die nicht die Bohle, sondern das Brett als kleinstes Element verwenden. Bei der Blocktafelbauweise, die in den 1980er Jahren von Nordamerika ausgehend auch in Europa bekannt wurde, bestehen die meist geschoßhohen Wände aus miteinander verbundenen Nadelholzbrettern. Bei den ersten in dieser Bauweise entstandenen Wänden handelte es sich um Brettstapelelemente, die aus miteinander vernagelten oder verdübelten Brettern mit selber Ausrichtung hergestellt wurden. Durch die vorhandenen Fugen wiesen diese Elemente einige Nachteile, wie etwa mangelnde Steifigkeit und geringen Brandschutz, auf.

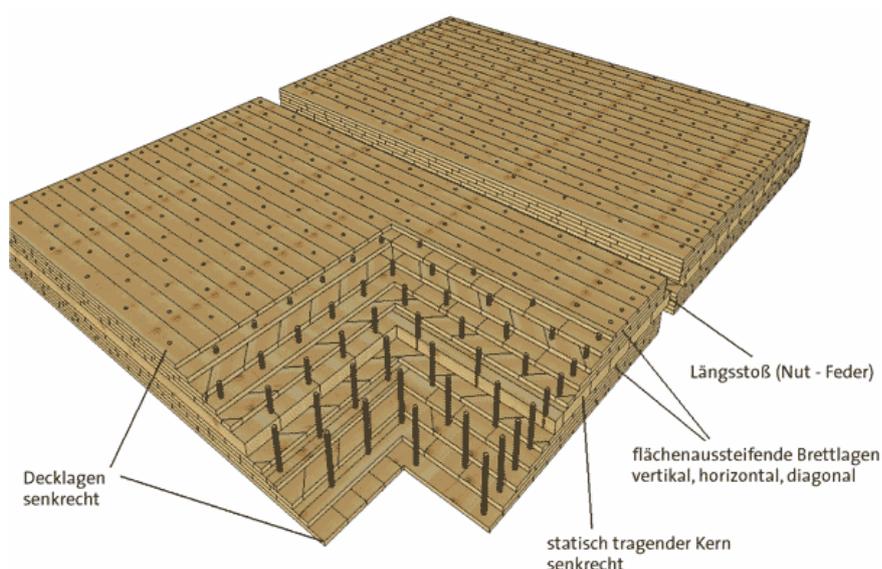
### 6.2.1 Verleimtes Brettsperrholz

Um diese oben genannten Schwächen in den Griff zu bekommen, wurde das Brettsperrholzelement (auch bekannt unter der firmeneigenen Bezeichnung KLH,

Kreuzlagenholz) entwickelt. Dabei werden sägerauhe Bretter kreuzweise und teilweise auch diagonal miteinander verleimt, sodass ein „massives, flächenhaftes und lastabtragendes Platten- und Scheibenelement“ [Winter, 2002] entsteht. Auch die Brandsicherheit wurde damit erhöht, da keine Fugen mehr vorhanden sind, die ein Durchbrennen erlauben. Verwendet werden vorwiegend Bretter aus den Stammrandzonen, die allgemein als minderwertigeres Schnittholz gelten, aber höhere mechanische Kenngrößen (Zugfestigkeit, E-Modul) aufweisen. Brettsperrholzelemente sind bis zu einer Stärke von etwa 40 cm erhältlich und können mit einer zusätzlichen Wärmedämmung die Wand eines Niedrigenergiehauses bilden.

Die Firma Lignotrend erzeugt Massivholzplatten und -wandelemente, die ebenfalls kreuzweise verleimt sind, aber zusätzlich auch Lufträume zwischen den einzelnen Holzschichten aufweisen. Dies ist einerseits vorteilhaft für die Wärmedämmeigenschaften, andererseits können diese Zwischenräume für Installationen genutzt werden. Auf den Brandwiderstand wirken sich die Hohlräume jedoch nachteilig aus, da dadurch ein Feuer mehr Sauerstoff bekommt und die einzelnen Holzquerschnitte kleiner sind.

### 6.2.2 Verdübeltes Brettsperrholz



**Abb. 6-3 Verdübeltes Brettsperrholz Firma Thoma** [Fa. Thoma]

vergrößert sich, wodurch die Festigkeit der Verbindung laut [Petraschka, 2003] erhöht wird.

Die Wandelemente der Firma Thoma, die unter dem Namen Holz100 vertrieben werden, bestehen aus nebeneinander stehenden Kanthölzern mit einer Stärke von 60-80 mm, der so genannten Kernlage. Die Randlagen befinden sich rechts und links der Kernlage und bestehen aus dünneren Brettern, die diagonal und vertikal orientiert sind. Die Kernlagen sind dabei die lastabtragenden Schichten. Mit Hilfe der Dübel wird die Kraft von den Randlagen in die Kernlage übertragen. Außerdem wirken sie beim Lastfall Biegung als Schubverband.

Eine andere Verbindungstechnik ist das Verdübeln der einzelnen Lagen mit Buchenholzdübeln. Die Dübel mit einem Außendurchmesser von 22 mm und etwa 1 mm tiefen Rillen werden mit einer geringeren Restfeuchte (6-8%) als das Konstruktionsholz in die unterschiedlich orientierten Holzlagen eingepresst. Durch die Restfeuchte des Holzes quellen die Dübel etwas auf, ihr Volumen

Statisch gesehen weisen die verdübelten Wandtafeln gegenüber den verleimten Elementen demnach keinen Nachteil auf.

Die Vorteile der Verdübelung gegenüber der Verleimung sind die etwas besseren Dämmeigenschaften (Verleimung vergrößert den  $\lambda$ -Wert des Holzes) und die höhere Dampfdiffusionsoffenheit, da Verleimung dampfdiffusionsbremsend wirkt. Außerdem ist die Ökobilanz eines reinen Holzelements besser als desselben Holzelements, das synthetischen Leim enthält. Eine gesundheitsschädigende Wirkung von den vorwiegend formaldehyd- und lösungsmittelfreien Leimen ist nicht wissenschaftlich bestätigt, von einer gewissen Ausdampfung des Leimes nach Herstellung ist jedoch auszugehen.

Beim Schallschutz wirkt sich die Verdübelung nachteilig aus. Die durchgehenden Dübel leiten den Schall weiter und stellen somit die Schwachstellen des Schallschutzes dar.

Eine Sonderform des innovativen Holzbaues stellt das relativ neue Holzmodul-Stecksystem dar, das im Kapitel 7 näher betrachtet wird.

## 6.3 Bauphysikalische Eigenschaften massiver Holzwände

### 6.3.1 Thermische Eigenschaften

Holz besitzt im Gegensatz zu anderen massiven Baustoffen (Ziegel, Beton) eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit; der  $\lambda$ -Wert von Weichhölzern liegt etwa bei 0,11-0,15 W/mK (im Vergleich dazu Hochlochziegel:  $\lambda = 0,36-0,6$  W/mK, Beton:  $\lambda = 1,2-2,2$  W/mK). Spezielle Hochloch-Dämmziegel (z.B. Protherm der Fa. Wienerberger) erreichen ähnlich gute Werte von  $\lambda = 0,13-0,15$  W/mK. Der Vorteil von Holzwänden liegt darin, dass sich die Oberfläche der Wand wärmer anfühlt als eine Ziegelwand mit gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten. Dadurch kann die Temperatur der Raumluft um 1 bis 2 Grad geringer sein, ohne dass die Bewohner eine Abnahme der Behaglichkeit spüren. Ziegel verfügt zwar über mehr speicherfähige Masse, doch Holz gibt die gespeicherte Wärme viel langsamer wieder ab. Eine Holzwand bleibt daher bei kalten Außentemperaturen an der Innenseite nach Abschalten der Heizung viel länger warm. Gemäß in [Thoma, 2003] beschriebene Versuche dauern es bei massiven Holzwänden und zusätzlicher Wärmedämmung bis zu dreimal länger bis der Gefrierpunkt der Innenwandoberfläche erreicht als bei einer Ziegelmauer mit Wärmedämmung und ähnlichem U-Wert. Verglichen mit einer Holzleichtbaukonstruktion mit ähnlichem U-Wert geschieht dies sogar etwa 18-mal langsamer. Der Versuch wurde mit Holz100-Wänden durchgeführt, ist aber durchaus – zumindest was die Tendenz der Ergebnisse betrifft – auch auf andere Massivholzwände übertragbar.

Auch bezüglich der sommerlichen Überwärmung verhält sich eine massive Holzwand auf Grund der höheren speicherwirksamen Masse günstiger als eine Leichtbauwand. Ebenso wie Holz nur langsam auskühlt, erwärmt es sich im Sommer auch nur langsam. Dies kann aber für den sommerlichen Wärmeschutz auch zum Nachteil werden, da die Holzwände durch die Nachtlüftung nicht so schnell abkühlen wie etwa Beton. Obwohl Holz wesentlich

weniger Masse als Beton oder Ziegel besitzt, wird das Wohnklima von Bewohnern massiver Holzhäuser und von Holzbauexperten [u.a. Natterer, 2006] auch im Sommer als angenehm angegeben.

Bedeutend für die thermische Behaglichkeit ist auch die Luftdichtigkeit einer Konstruktion. Verleimtes Brettsperrholz gilt – je nach Ausführung und Anbieter – ab drei bzw. fünf Schichten als winddicht. Ebenso wird verdübeltem Brettsperrholz laut Prüfungen an der Technischen Universität Graz Winddichtigkeit zugesprochen.

Um die Wärmeleitfähigkeit einer Massivholztafel zu verringern, wurde ein verdübeltes Brettsperrholz mit stehenden Luftschichten, das den Namen Holz100-thermo trägt, entwickelt. Dabei werden dem Kantholz der Mittellage sowie allen Brettern der Randlage – dies können bis zu fünf Schichten je Seite sein – ca. 3x20 mm große Rillen an der Oberfläche eingefräst bevor diese zusammengedübelt werden. Dadurch entsteht ein Wandelement, das einen  $\lambda$ -Wert von 0,078 W/mK aufweist. Dieser Wert wurde an der Technischen Universität Graz geprüft und bestätigt [Thoma, 2006]. Mit dieser Entwicklung ist es möglich, einschalige Wandaufbauten, die nur aus Holz bestehen, für Niedrigenergiehäuser einzusetzen. Auch diese Wandtafeln entsprechen ab einer Stärke von 17 cm laut Prüfungen an der Technischen Universität Graz der Luftdichtigkeitsklasse 4 [Thoma, 2006].

### 6.3.2 Feuchteempfindlichkeit

Holz ist als natürlicher Baustoff feuchteempfindlich. Daher ist eine Holzwand so zu planen, dass keine Schädigung und Beeinträchtigung durch Feuchte entstehen kann. Wie in Kapitel 3.5 erläutert wird, ist die Problematik von Pilzen und Schädlingen erst ab einer Holzfeuchte von etwa 20% gegeben, welche jedoch in mängelfrei ausgeführten Wandaufbauten nicht längerfristig vorkommt. Es sollte darauf geachtet werden, dass das Dampfdiffusionswiderstandsgefälle von innen nach außen gegeben ist bzw., dass die Dampfbremse – falls diese bei der gewählten Konstruktion nötig ist – mängelfrei angebracht und zusätzlich der Wetterschutz der Fassade gegeben ist. Geringes, kurzzeitig auftretendes Kondensat in einer Massivholzwand wird noch nicht zum Problem, solange die mögliche Verdunstung um ein Vielfaches größer als die Kondensatmenge ist.

Der Diffusionswiderstand von Vollholz hängt stark von der Holzfeuchte ab, je größer die Holzfeuchte, desto kleiner der Diffusionswiderstand. Dies bedeutet, dass der Wasserdampf schneller nach außen transportiert werden kann, solange das Holz feucht ist. Die Dampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  von Holz mit 16% Feuchte beträgt etwa 20, bei 6% Feuchte jedoch schon 160.

Eine Leimschicht erhöht den Diffusionswiderstand leicht. Das hat einerseits den Nachteil, dass Kondenswasser aus der Konstruktion langsamer nach außen geleitet werden kann, aber auch den Vorteil, dass die Eindringgeschwindigkeit von z.B. Kapillarwasser geringer ist als bei Vollholz.

### 6.3.3 Brandverhalten

Holz ist zwar ein brennbarer Baustoff, doch sein Abbrandverhalten ist bekannt und mit 0,8 mm pro Minute klar definiert [ÖNORM B 1995-1-2]. Bei KLH-Massivholzplatten ist laut Herstellerangaben mit der Abbrandgeschwindigkeit von 0,76 mm/min zu rechnen. Bei starken Vollholzquerschnitten ist die Resttragfähigkeit im Brandfall in der Regel kein Problem, da das Holz außen zwar verkohlt, diese verkohlte Schicht aber eine Art „Dämmung“ für den inneren Teil des Querschnittes darstellt, sodass dieser nicht weiter verbrennt. Da zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit des Holzes schlecht ist und kein Sauerstoff im Inneren der Massivholzwände vorhanden ist, brennt die Wand nicht oder erst nach Stunden völlig durch.

Ein fünfschichtiges 12 cm starkes Brettsperrholz (verleimt) erreicht die Brandwiderstandsklasse REI 60, dreischichtige Massivholzplatten halten immerhin 30 Minuten dem Feuer Widerstand [KLH, 2006].

Eine 17 cm dicke verdübelte Brettsperrholzwand (Holz100) wurde nach Prüfungen als „hochbrandhemmend“ (REI 60) eingestuft, ein 36,4 cm dickes Element erreicht REI 120 [Thoma, 2006].

Massivholzelemente mit Lufträumen zwischen den einzelnen Schichten schneiden etwas schlechter ab. Die im Kapitel 6.3.1. beschriebene Holz100-thermo-Wand erreicht mit der Stärke von 36,4 cm nur mehr die Klassifizierung REI 60. Die Wandelemente der Firma Lignotrend, die ja über wesentlich größere Luftzwischenräume verfügen, müssen je nach Ausführung auf einer oder auf beiden Seiten mit Feuerschutzplatten (Gipskarton-, Gipsfaserplatten) verkleidet werden, um die Klassifizierung „brandhemmend“ (REI 30) zu erlangen [Lignotrend, 2007].

### 6.3.4 Schallschutz

Verglichen mit Holzleichtbau-Konstruktionen ist der geforderte Schallschutz bei Holzmassivbaukonstruktionen wesentlich leichter zu erreichen. Das oben erwähnte verdübelte Brettsperrholz der Firma Thoma wurde im Jahr 2004 von der Technischen Universität Graz in verschiedenen Stärken und in unterschiedlichen Wandkonstruktionen geprüft. Bei einer Stärke von 14 cm erreicht es ohne weitere Aufbauten ein bewertetes Schalldämmmaß von 39 dB, bei 20 cm 41 dB und bei 36,8 cm etwa 50 dB. Weitaus höhere Schalldämmwerte erreichen zweischalige Aufbauten bzw. Wände mit einseitigen, entkoppelten Vorsatzschalen. Ein Wandaufbau bestehend aus 12 cm Brettsperrholz, 6 cm Holzweichfaserplatte und 14 cm Brettsperrholz kommt auf ein bewertetes Schalldämmmaß von 54 dB bei nicht-verschraubter Ausführung und auf 51 dB bei verschraubter Ausführung. Setzt man der nicht-verschraubten Ausführung noch eine entkoppelte Vorsatzschale bestehend aus 5 cm Steinwolle und einer 15 mm Gipskartonplatte vor, so wurde ein bewertetes Schalldämmmaß von 63 dB bestätigt [Thoma, 2006].

Auch Wandelemente der Firma Lignotrend erreichen in Tests gute Schalldämmwerte. Ein etwa 10 cm starkes mit Gipskartonplatten beplanktes Lignotrend-Massivholzelement mit 16 cm Dämmstoff (Holzweichfaserplatte, Zellulosedämmung) erreicht je nach Fassadenausführung Schalldämmmaße zwischen 46 und 52 dB [Lignotrend, 2007].

## 6.4 Weitere Vorteile und Nachteile massiver Holzwände

### 6.4.1 Holzverbrauch, Transport

Der Holzverbrauch bei massiven Holzbauweisen ist zwar wesentlich höher als beim Leichtbau, doch hat dies den Vorteil, dass mehr speicherfähige Masse vorhanden ist. Dies bringt ein langsames Auskühlen im Winter und einen besseren Schutz gegen sommerliche Überwärmung mit sich. Solange der Transportweg gering gehalten werden kann, ist der höhere Holzverbrauch ökologisch und ökonomisch nicht bedenklich, da in Österreich das Holzaufkommen sehr hoch ist (siehe Kapitel 3.4).

Ein Nachteil ist jedoch, dass spezielle Holzwandaufbauten nur von einer einzigen oder zumindest wenigen Firmen hergestellt werden, was den Transportweg mitunter sehr verlängert. Durch die Monopolstellung einiger Firmen und die Patentierung gewisser Wandaufbauten liegt auch der Preis in der Regel höher als bei Fertigteilhäusern oder Holzhäusern einer lokal ansässigen Zimmerei.

### 6.4.2 Blockhäuser aus dem Norden

Die Hölzer der in Mitteleuropa angebotenen Blockhäuser stammen fast ausschließlich aus Nordeuropa oder Kanada, da sich – laut Herstellerangaben – die Zellstruktur von Bäumen, die in kalten Regionen wachsen, besser für den Einsatz als Blockbohle eignet als mitteleuropäische Fichten und Kiefern [u.a. Stommel, 2007]. Die an sich sehr gute Ökobilanz des Holzes wird hiermit durch den vom langen Transport entstehende CO<sub>2</sub>-Ausstoß wesentlich verschlechtert. Ein weiterer Nachteil ist, dass für Blockhäuser nur ausgewählte Querschnitte aus dem Stamminneren verwendet werden können, wodurch große Restholzmengen anfallen.

### 6.4.3 Wohnklima

Die Bewohner von Massivholzhäusern profitieren – sofern die Innenwände nicht dampfdiffusionsdicht verkleidet oder verputzt sind – vom guten Raumklima, das dadurch zustande kommt, dass Holz Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnimmt und zeitverzögert wieder abgibt. Weiters kommt ein Massivholzbau in der Regel ohne innenliegende Dampfbremse aus [Winter, 2002]. Eine Schicht weniger bedeutet einen weniger anfälligen Wandaufbau und i. d. R. eine längere Lebensdauer.

## 6.5 Mögliche Wandaufbauten in Blockbauweise

### 6.5.1 Blockbohlenwand mit Zwischendämmung

Tabelle 6–1 Doppelte Blockbohlenwand mit Zwischendämmung

<b>Blockbohlenwand mit Zwischendämmung (System Stommel)</b>				
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Holzbohlen	9,20	600	0,15	0,61
Gipsfaserplatte	1,25	1100	0,3	0,04
Holzfaserdämmplatte	14,00	300	0,055	2,55
Gipsfaserplatte	1,25	1100	0,3	0,04
Luftraum als Installationsebene	3,00	0	0,026	1,15
Holzbohlen	9,20	600	0,15	0,61
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>38 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,19 W/m<sup>2</sup>K</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>180 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß</b>	<b>k.A.</b>			

Diese Ausführung wird sowohl mit vertikalen als auch mit horizontalen Bohlen angeboten.

Für das Raumklima ist dieser Aufbau vorteilhaft, da die Oberfläche der Wandinnenseite aus relativ starken Holzbohlen besteht, die die Eigenschaft haben, überflüssige Feuchtigkeit der Raumluft aufzunehmen und zeitversetzt wieder abzugeben. Außerdem verfügt dieser Aufbau – im Vergleich zum Leichtbau – über wesentlich mehr speicherfähige Masse. Diese Konstruktion besteht aus natürlichen, diffusionsoffenen Baustoffen, eine Dampfbremse ist nicht notwendig.

Der Nachteil ist der lange Transportweg, den das Holz hinter sich hat. Die Bohlen stammen i.d.R. aus Regionen nördlich des Polarkreises und werden in Mitteleuropa verarbeitet.

Über das Schalldämmmaß dieses Wandaufbaus gibt es laut Herstellerangaben keine Prüfungen. Es ist jedoch anzunehmen, dass der Schallschutz auf Grund des zweischaligen Aufbaus relativ gut ist.

### 6.5.2 Blockbohlenwand mit Innendämmung

Dieser Wandaufbau erfüllt die Anforderungen an ein Niedrigenergiehaus bezüglich des U-Wertes, doch der Nachteil ist hier – wie bei jedem Wandaufbau mit Innendämmung – dass die tragende Konstruktion sehr großen Temperaturspannen ausgesetzt ist. Die Blockbohlen der Südwände trocknen wesentlich schneller aus als die der Nordwände, was eine ungleichmäßige Setzung mit sich bringt. Dadurch kommt es im Holz zu Spannungen und

Bewegungen, die kleine Risse und Verwindungen mit sich bringen können. Die Holzbohlen alleine können daher nicht mehr die Funktion der Winddichtigkeit übernehmen, wodurch eine zusätzliche diffusionsoffene Windsperre notwendig wird.

**Tabelle 6–2 Blockbohlenwand mit Innendämmung**

<b>Blockbohlenwand mit Innendämmung (System Finnland-Blockhaus)</b>					
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	Anteil	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Blockbohlen kerngetrennt	12,00	600	0,15		0,80
Windsperre diffusionsoffen					
Abstandshölzer dazw.	14,00	600	0,15	0,2	2,99
Wärmedämmung Zelluloseplatten		55	0,04	0,8	
Dampfbremse					
Abstandshölzer dazw.	4,00	600	0,15	0,2	0,85
Installationsebene Flachsdämmstoff		55	0,04	0,8	
Rieselschutzpapier					
Holzverkleidung	2,00	600	0,15		0,13
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>32 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,20 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>114 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b>	<b>k.A.</b>				

Der Wandaufbau mit natürlichen Bau- und Dämmstoffen bringt auch hier ein gutes Raumklima mit sich. Diese Konstruktion kommt nicht ohne Dampfsperre aus, da die innenliegenden Schichten (dünne Holzverkleidung, Flachs, Zellulose) diffusionsoffener als die außenliegende Blockbohle sind.

Auch für diesen Wandaufbau ist kein Schalldämmmaß bekannt. Es ist aber davon auszugehen, dass der Schallschutz schlechter ist als bei Aufbau 6.5.1, da hier nur eine einfache Blockbohlenwand zum Einsatz kommt, jedoch geringfügig besser als das Schalldämmmaß des Wandaufbaus 6.5.3.

### 6.5.3 Blockbohlenwand mit Außendämmung

Der unten angeführte Wandaufbau umfasst die Vorteile einer Außendämmung (Tragkonstruktion ist keinen starken Temperaturschwankungen ausgesetzt, Nutzung der innenliegenden speicherwirksamen Masse) und hat auch auf Grund der Fassade aus dünnen Fichtenbohlen das Erscheinungsbild eines Blockhauses. Er besteht ebenso aus ökologisch empfehlenswerten Materialien wie die oben genannten Aufbauten, jedoch ist der U-Wert etwas zu hoch für ein Niedrigenergiehaus. Dies könnte entweder mit einer stärkeren Dämmschicht zwischen den Bohlen und der Außenschalung oder mit einer mit Dämmstoff

ausgefüllten Installationsebene kompensiert werden. Das Schalldämmmaß ist sehr niedrig und erreicht nicht den für Wien für Klein- und Reihenhäuser geforderten Wert von 43 dB.

Tabelle 6–3 Blockbohlenwand mit Außendämmung

<b>Blockbohlenwand mit Außendämmung (System Nordic-Blockhaus)</b>					
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	Anteil	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]		[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Fassade aus Fichtenbohlen	2,80	600	0,15		0,19
Abstandshölzer dazw.	14,00	600	0,15	0,2	2,99
Zellulosefaser		55	0,04	0,8	
Blockbohle	9,20	600	0,15		0,61
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>26 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,25 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>95 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b> [Herstellerangabe]	<b>41 dB</b>				

## 6.6 Mögliche Wandaufbauten in massiver Tafelbauweise

### 6.6.1 Einschalige Massivholzwand

Tabelle 6–4 Massive Vollholzwand ohne zusätzlicher Wärmedämmung

<b>Holz-100thermo Wandelement (Fa. Thoma)</b>					
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	Anteil	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]		[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Außenschalung	3,20	600	0,15		0,21
Holz-100thermo Wandelement	36,40	550	0,078		4,67
Innenschalung	1,80	600	0,15		0,12
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>41 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,19 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>230 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b>	<b>50 dB</b>				

Der Wandaufbau bestehend aus den im Kapitel 6.3.1 beschriebenen Holz-100thermo-Wandelementen ist ein einschaliger Wandaufbau in Holzbauweise, der auch ohne zusätzlicher Wärmedämmung den nötigen U-Wert für ein Niedrigenergiehaus erreicht. Er verbindet somit die Vorteile der relativ hohen Masse (Wärmespeicherung, guter Schallschutz) mit denen des niedrigen U-Wertes. Temperaturschwankungen im Wohnbereich werden dadurch wesentlich geringer, was sich neben der Behaglichkeit auch vorteilhaft auf den jährlichen Heizwärmebedarf auswirkt.

Trotz der Lufteinschlüsse in der Wand erreicht dieser Wandaufbau den Brandwiderstand von 60 Minuten. Das angegebene Schalldämmmaß bezieht sich auf eine 36,8 cm dicke Holz100-Wand. Die Lufteinschlüsse der Holz100-thermo Wand haben laut Herstellerfirma jedoch keinen Einfluss auf die Schalldämmung.

### 6.6.2 Verdübeltes Brettsperrholz mit Zwischen- und Außendämmung

Tabelle 6–4 Massive Vollholzwand ohne zusätzlicher Wärmedämmung

<b>Verdübeltes Brettsperrholz mit Zwischen- und Außendämmung</b>				
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/(mK)]	[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Putz	1,00	1800	1	0,01
Holzweichfaserplatte	4,00	170	0,05	0,80
Brettsperrholz verdübelt	14,00	600	0,102	1,37
Holzweichfaserplatte	6,00	170	0,05	1,20
Brettsperrholz verdübelt	12,00	600	0,102	1,18
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>37 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,21 W/mK</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>191 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß</b> [Thoma, 2006]	<b>≈54 dB</b>			

Aufgrund der zweischaligen Ausführung dieses Wandaufbaus werden sehr gute Schalldämmmaße erzielt. Das angegebene Schalldämmmaß von 54 dB entspricht dem Wandaufbau ohne Außendämmung und Putz. Der Putz sollte diffusionsoffen sein ( $\mu < 30$ ), um eine Feuchteanreicherung in der Holzweichfaserplatte zu vermeiden.

Vom bauökologischen Standpunkt gesehen ist auch dieser Wandaufbau empfehlenswert, da er – abgesehen vom Putz und die möglichen Zusätze der Holzweichfaserplatten – nur aus Holz besteht.

### 6.6.3 Verleimtes Brettsperrholz mit Außendämmung

Dieser Wandaufbau ist der gängigste unter den Massivholzbauten und kann mehrfach variiert werden. Die Innendämmung besteht in den meisten Fällen aus Mineralwolle. Diese hat den Nachteil, dass sie aufgrund der Staubeentwicklung immer nur dicht abgeschlossen eingebaut werden darf, d.h. auch die Durchdringungen zur Installationsebene müssen sorgfältig und luftdicht ausgeführt werden. Andere – nachwachsende – Dämmstoffe, die sich für die Installationsebene eignen, wären unter anderem Flachs, Hanf oder Zellulose. Bei stärkerer Außendämmung kann grundsätzlich die Installationsebene auch weggelassen werden, wenn eine Holzoberfläche der Innenwände gewünscht wird.

Tabelle 6–6 Massive Holzwand aus verleimten Brettsperrholz mit Außendämmung

Verleimtes Brettsperrholz mit Außendämmung					
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	Anteil	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Putz	1,00	1800	1		0,01
Holzfaserdämmplatte (Putzträger)	14,00	370	0,055		2,55
Brettsperrholz verleimt	12,50	600	0,15		0,83
Lattung (50/40) auf Schwingbügel	7,00	600	0,15	0,2	1,49
Dämmung		55	0,04	0,8	
Gipsfaserplatte	1,00	1150	0,36		0,03
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>36 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,20 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>167 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b> [Pavatex, 2007]	<b>&gt;47 dB</b>				

Eine Holzwollemehrschichtplatte als Putzträger würde das Schalldämmmaß erhöhen, die Ökobilanz jedoch verschlechtern, da die mittlere Schicht dieser Platten aus nichterneuerbaren Rohstoffen (Mineralwolle) besteht.

Der Wandaufbau entspricht der Brandschutzklasse REI 60, mit zwei Gipsfaserplatten mit je 1 cm käme er auf REI 90.

## 7 HOLZMODUL-STECKSYSTEM

### 7.1 Geschichte und Beschreibung des Holzmodul-Stecksystems



**Abb. 7-1 Steko-Grundmodul**  
[Fa. Steko]

Das im Folgenden beschriebene System wurde von „Wissenschaftlern aus Lehre und Forschung sowie erfahrenen Baufachleuchten entwickelt“ [Enz et al., 2006] und kam erstmals 1996 – von der Schweizer Firma Steko Holz-Bausysteme AG produziert – zur Anwendung. In den darauf folgenden 10 Jahren entstanden hauptsächlich in der Schweiz, aber auch in anderen europäischen Ländern, mehr als 600 Gebäude [Enz et al., 2006] mit diesem System.

Das „Steko“-System besteht aus Grundelementen mit der Breite von 16 cm, vier möglichen Längen (16 cm, 32 cm, 48 cm und 64 cm) und zwei verschiedenen Höhen (24 cm, 32 cm).

Zusätzlich gibt es Sonderelemente für den unteren und oberen Abschluss einer Wand und für den Leibungsabschluss bei Tür- und Fensteröffnungen. Die Elemente sind aus fünflagigem, kreuzweise verleimtem Nadelholz, Schwellen auch aus

Hartholz, aufgebaut. Dadurch entstehen – laut Hersteller – maßstabile Elemente mit Hohlräumen, die nachträglich für den Wärme- und Schallschutz mit Dämmstoffen oder anderen Baustoffen gefüllt werden. Dazu eignen sich Zelluloseflocken und andere schüttfähige Materialien. Der Hohlraum kann außerdem für die Leitungsführung verwendet werden. Je nach Wunsch der Bauherren können die Holzelemente innen sichtbar gelassen werden oder wie herkömmliche Wandaufbauten mit handelsüblichen Gips- oder Holzwerkstoffplatten verkleidet werden. Auch die Außengestaltung der Wand ist variabel. Bei Niedrigenergie- oder Passivhäusern muss eine zusätzliche Außendämmung angebracht werden. Die Fassade kann wahlweise als hinterlüftete Konstruktion oder als verputzte Fassade ausgeführt werden. Die Oberfläche der Elemente ist je nach Erfordernis in Sichtqualität oder für verkleidete Wände mit rauerer Oberfläche erhältlich.

## 7.2 Bauphysikalische Eigenschaften des Holzmodul-Stecksystems

### 7.2.1 Materialkennwerte des Grundelementes

Die folgenden Materialkennwerte beziehen sich auf ein Grundmodul von 16 cm Breite ausgefüllt mit Zellulosedämmung.

**Tabelle 7–1 Kennwerte eines „Steko“-Elements mit Zellulose [Enz et al., 2006]**

Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0,073 W/mK
Wärmekapazität	c	2200 J/kgK
Dichte	$\rho$	281 kg/m <sup>3</sup>
Wärmedurchgangskoeffizient	U	0,42 W/m <sup>2</sup> K
Temperaturkennzahl	a	4,3 cm <sup>2</sup> /h
Schalldämmmaß	R <sub>w</sub>	33 dB

### 7.2.2 Thermische Eigenschaften

Auch mit relativ schlanken Wandaufbauten können mit diesem System Niedrigenergiehäuser verwirklicht werden, da das gedämmte Grundelement bei einer Stärke von 16 cm schon einen U-Wert von 0,42 W/m<sup>2</sup>K erreicht [Enz et al., 2006]. Mit zusätzlichen 10 cm Außendämmung erzielt man je nach Dämmmaterial U-Werte um 0,2 W/m<sup>2</sup>K, mit 16-18 cm Außendämmung wird der U-Wert von 0,15 W/m<sup>2</sup>K [Steko, 2007], der für ein Passivhaus notwendig ist, erreicht. Diese Wärmedurchgangskoeffizienten wurden von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA in Dübendorf, Schweiz, ermittelt.

Auch bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes schneidet dieses System – wie auch herkömmliche massive Holzwände – relativ gut ab. Die Temperaturkennzahl eines Grundmoduls mit Zellulosedämmung liegt bei etwa 4,3 cm<sup>2</sup>/h.

Da dieser Wandaufbau aus kleinflächigen Elementen ohne Fügemitel besteht, kann keine Luftdichtigkeit wie bei massiven Brettschichtholz erreicht werden. Daher muss an der Außenseite der „Steko“-Elemente eine diffusionsoffene Luftdichtigkeitsschicht angebracht werden.

### 7.2.3 Feuchteempfindlichkeit

Die Wandelemente verlassen mit einer Feuchtigkeit von 8-12% das Werk und haben somit schon die Ausgleichsfeuchte, die sich bei Holz in geheizten und bewohnten Räumen einstellt. Auch Schwankungen der Feuchtigkeit des Innen- und Außenklimas, beeinflussen laut Hersteller die Qualität der Wandaufbauten nicht. Während der Lage und der Montage sind die Elemente vor Feuchtigkeit zu schützen.

Die Holzelemente sind diffusionsoffen. Daher ist eine Dampfbremse an der Wandinnenseite grundsätzlich nicht notwendig, sofern die außenliegenden Bauteile im Bezug auf die Dampfdurchlässigkeit darauf abgestimmt sind. Das Gefälle des Dampfdiffusionswiderstandes von außen nach innen muss eingehalten werden, ebenso muss der Nachweis, dass kein Kondensat in der Wand auftritt (Glaserdiagramm), erfüllt sein.

### 7.2.4 Brandverhalten

Das in den Kapiteln 2.1.4. und 6.3.3 erläuterte Brandverhalten von Holz gilt ebenso für den Wandaufbau mit „Steko“-Elementen. Nachteil gegenüber den massiven Tafel- und Blockbauten ist, dass die Seitenwände der „Steko“-Elemente einen geringeren Querschnitt haben und somit zugänglicher für Feuer sind. Zusätzlich hängt der Brandschutz auch von der Füllung der Elemente an. Füllt man die „Steko“-Elemente beispielsweise mit bewehrtem Beton, so eignet sich der Wandaufbau auch für eine feuerbeständige Wand (REI 90). Ob man dann jedoch noch von einem Holzmassivbau sprechen kann, ist natürlich eine andere Frage. Die positiven Eigenschaften eines Holzbaus wie Diffusionsoffenheit, geringe Wärmeleitfähigkeit oder geringer Primärenergieverbrauch gehen jedenfalls dadurch verloren. Der Vorteil besteht jedoch darin, dass mit diesem System in einem Bauwerk einerseits Massivholzwände andererseits auch Brandabschnittswände hergestellt werden können.

Auch ohne Betonfüllung können die Brandschutzanforderungen erreicht werden. Eine feuerseitig mit einer 10 mm Gipsfaserplatte beplankte „Steko-Wand“ ohne Hohlraumfüllung kommt auf einen Brandwiderstand von REI 30. Mit Zelluloseflocken als Hohlraumfüllung wird der Brandschutz etwas gesteigert, da Zelluloseflocken aus Brandschutzgründen mit Borsalzen behandelt werden. Die erwähnten Prüfergebnisse stammen von Versuchen, die im September 2001 an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt an mit 30 kN/m belasteten Steko-Wänden durchgeführt wurden [Steko, 2007].

Im Vergleich zu Massivholzbauten mit starken Holzquerschnitten von 10 und mehr Zentimetern schneidet das „Steko“-System, vor allem ohne Verkleidung, relativ schlecht ab.

### 7.2.5 Schallschutz

Das Schalldämmmaß hängt stark von der Füllung der Holzelemente ab. Ein ungedämmtes Element erzielt ein bewertetes Schalldämmmaß  $R_w$  von 31 dB, ein mit Zellulosefasern gedämmtes kommt auf einen Wert von 33 dB und mit Sand gefüllt auf 48 dB. Wird die Innenseite der Wand mit einer 12,5 mm starken Gipskartonplatte verkleidet, erhöht sich das Schalldämmmaß auf 38 dB. Wird die Gipskartonplatte als Vorsatzschale konzipiert, wobei der entstehende Abstand mit Dämmmaterial ausgefüllt wird, können Schalldämmwerte um 55 dB erreicht werden. Wie die Theorie aber auch Messungen an fertigen Bauwerken zeigt, können mit diesem System die gängigen Anforderungen an den Schallschutz erfüllt werden [Schweizer Holzbau, 2006].

## 7.3 Weitere Vorteile und Nachteile der „Steko-Wand“

### 7.3.1 Planung und Aufbau

Da nur wenige Grundelemente angeboten werden, ein Grundraster einzuhalten ist und zusätzlich Anschlussdetails und Systemlösungen vom Hersteller vorgegeben sind, wird sowohl der Planungs- als auch der Ausführungsaufwand erleichtert. Weiters ist auf Grund der handlichen Grundelemente, die bei der maximalen Länge nur 6,5 kg wiegen und ohne Fügemitel aufeinander gesetzt werden, der Rohbau eines Einfamilienhauses in wenigen Tagen auch ohne ausgebildete Fachkräfte zu bewältigen. Der Rohbau kann durchaus von handwerklich begabten Laien übernommen werden. Durch diese Eigenleistungen können wiederum die Kosten gesenkt werden.

### 7.3.2 Maßgenauigkeit und Tragverhalten

Die Elemente werden im Werk produziert, wo Qualitäts- und Maßkontrollen durchgeführt werden. Dadurch können in den Abmessungen exakte und in der Qualität gleich bleibende Elemente erzeugt und ausgeliefert werden. Ob sich jedoch Schwinden und Quellen tatsächlich – wie vom Hersteller angegeben – in keinsten Weise auswirken, ist zu hinterfragen. Der Tragwiderstand einer „Steko-Wand“ beträgt 92 kN/m, bei Verwendung von Buchenschwellen kann der Wert auf 212 kN/m gesteigert werden. Dadurch können Gebäude mit bis zu sechs Stockwerken errichtet werden [Enz et al., 2006]. Diese Höhe wäre jedoch aus Brandschutzgründen in Österreich nicht erlaubt. Ob die nötige Schubsteifigkeit durch das fügemitelfreie Aufeinandersetzen der Elemente in jedem Fall gewährleistet ist, kann nicht bestätigt werden.

### 7.3.3 Gestaltungsfreiheit

Ein Nachteil ist sicherlich, dass auf Grund der verfügbaren Elemente die Gestaltungsfreiheit eingeschränkt ist. Kompakte Baukörper im Form eines Quaders sowie schräge

Wandabschlüsse für Pult- und Satteldächer sind in Schritten von 16 cm (horizontaler Raster) bzw. 8 cm (vertikaler Raster) realisierbar. Auch Fenster können nur in diesem Raster dimensioniert und eingebaut werden. Die möglichen Öffnungen sind jedoch mit den handelsüblichen Fensterformaten kompatibel. Elemente, die Rundungen erlauben, sind hingegen nicht erhältlich.

### 7.3.4 Nachteile eines neuen Bausystems

Da es sich um ein relativ neues System handelt, können zwar Berechnungen über die Langlebigkeit dieses Systems angestellt werden, die langfristigen Erfahrungswerte und -berichte werden jedoch erst in einigen Jahrzehnten verfügbar sein.

Ein weiterer Nachteil ist, dass das „Steko“-System nur von einer, in der Schweiz ansässigen Firma hergestellt wird. Die dadurch entstehenden längeren Anfahrtswege wirken sich nicht nur negativ auf die Kosten aus, sondern beeinträchtigen auch die Ökobilanz dieser Konstruktion. Auch der Energieverbrauch bei der Erzeugung dürfte etwas höher anzusetzen sein als bei Brettschichtholz.

## 7.4 Mögliche Wandaufbauten des Holzmodul-Stecksystems

### 7.4.1 „Steko-Wand“ mit verputzter Fassade

Tabelle 7–3 „Steko-Wand“ mit verputzter Fassade

<b>„Steko-Wand“ mit verputzter Fassade</b>				
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Putz (diffusionsoffen)	1,50	1800	1	0,02
Weichfaserplatte (Putzträger)	16,00	180	0,046	3,48
„Steko“-Element mit Zellulosedämmung	16,00	281	0,073	2,19
Gipsfaserplatte	1,50	1150	0,36	0,04
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>35,00 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,17 W/m<sup>2</sup>K</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>118,01 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß [Steko, 2007]</b>	<b>&gt;40 dB</b>			

Bei der Ausführung der „Steko-Wände“ mit verputzter Fassade ist darauf zu achten, dass ein diffusionsoffener Putz verwendet wird, um Kondensatbildung im Wandinneren zu vermeiden bzw. Austrocknung zu ermöglichen. Der Wandaufbau ist gemessen an dem niedrigen U-Wert relativ schlank, verfügt jedoch über relativ wenig Masse. Diese ist – anders als bei Skelettbauten – gleichmäßiger verteilt, was sich auf das Raumklima positiv auswirkt. Mit einigen Zentimetern mehr Außendämmung bzw. einer zusätzlichen Innendämmung als

Installationsebene können mit diesem Aufbau auch Wandaufbauten für Passivhäuser realisiert werden. Der Brandwiderstand beträgt 30 Minuten.

#### 7.4.2 „Steko-Wand“ mit hinterlüfteter Fassade und Installationsebene

Tabelle 7-2 „Steko-Wand“ mit hinterlüfteter Fassade und Installationsebene

„Steko-Wand mit“ hinterlüfteter Fassade und Installationsebene					
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	Anteil	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Stülpchalung	3,00	600	0,15		0,20
Hinterlüftung	3,00				
Holzsteher dazw.	10,00	600	0,15	0,2	1,91
Holzfaserplatte		250	0,045	0,8	
Windbremse $sd \leq 0,12$ m					
„Steko“-Element mit Zellulosedämmung	16,00	281	0,073		2,19
Installationsebene mit Dämmung	4,00	55	0,04		1,00
Gipsfaserplatte	1,50	1150	0,36		0,04
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>38 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,18 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>114 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß [Steko, 2007]</b>	<b>&gt;56 dB</b>				

Der beschriebene Wandaufbau erzielt durch die Vorsatzschale sehr gute Schalldämmwerte. Diese werden jedoch nur erreicht, wenn die Beplankung nicht starr mit der „Steko-Wand“ verbunden ist (d.h. Ausführung mit Schwingbügel oder anderen elastischen Verbindungen). Der Wandaufbau ist diffusionsoffen und entspricht ebenfalls dem Brandwiderstand von 30 Minuten.

## 8 WANDAUFBAUTEN MIT STROHBALLENDÄMMUNG

### 8.1 Geschichte der Strohballenhäuser

#### 8.1.1 Entstehung der Strohballenhäuser in den USA

Das landwirtschaftliche Nebenprodukt Stroh auch als Baustoff einzusetzen, ist keine neue Erfindung. Diese Bauweise kann schon auf mehr als hundert Jahre Erfahrung zurückschauen. Einhergehend mit der Entwicklung der Strohballenpresse um 1880 entstanden in Nebraska, USA, einem Gebiet mit riesigen Getreidefeldern, die ersten Strohballenhäuser. In den Anfängen wurden die Strohballen wie überdimensionale Ziegel



übereinander gestellt, verputzt und mit einem Dach versehen. Die ersten dieser Häuser entstanden als schnell und billig zu bauende, temporäre Behausungen. Doch bald erkannte man, dass diese Häuser länger halten als einige Jahre und auch das Innenklima der Häuser trotz kalter Winter und heißer Sommer recht angenehm war.

**Abb. 8-1 The Burk House, 1903** [www.strawhomes.com]

Der Baustil, der die Strohballen als lastabtragende Konstruktion verwendet, wird bis heute „Nebraska-Stil“ genannt. Auch die ältesten noch existierenden Strohballenhäuser stehen in



der Nähe von Nebraska und sind zum größten Teil noch heute intakt und in Verwendung. Die Abbildung 8-1 zeigt das älteste noch existierende Strohballenhaus in Alliance, Nebraska. Auch zweigeschoßige Gebäude entstanden schon Anfang des 20. Jahrhundert im Nebraska-Stil, wie etwa die Fawn Lake Ranch in Nebraska (Abb. 8-2).

**Abb. 8-2 Fawn Lake Ranch, Nebraska** [www.strawhomes.com]

Das erste zweigeschoßige Haus, das im Gegensatz zu den Strohhäuser in Nebraska als Holzständerkonstruktion mit Strohdämmung konzipiert wurde, entstand im Jahre 1936 in Alabama und wird heute als Museum genutzt (Abb.8-3). In den darauf folgenden Jahrzehnten (1950er bis 1980er Jahre) ist der Strohballenbau fast ganz in Vergessenheit geraten. Erst als Ende der 70er, Anfang der 80er Jahre neue Artikel und Bücher über Strohhäuser veröffentlicht wurden, entstand langsam ein neuer Strohballenhaus-Boom in den USA. Häuser entstanden sowohl im feuchten Norden als auch im heißen Süden – mit der Erkenntnis, dass das Strohballenhaus für beide klimatischen Bedingungen geeignet ist.



**Abb. 8-3 Holzständerkonstruktion mit Strohdämmung**

[www.thelaststraw.org]

Mit dem Ziel, die neuen Forschungsergebnisse, Studien und Erfahrungen auszutauschen und weiterzugeben fand 1993 die erste große Konferenz zum Thema Strohballenhausbau statt. Studien zum Wärmeschutz, Feuchte und Brandverhalten von Strohballenwänden folgten. 1994

erschien das bis heute als „Bibel des Strohballenhausbaus“ bezeichnete Werk „The Straw Bale House“ von Athena und Bill Steen. Das alles machte zwar das Strohballenhaus noch zu keinem Massenprodukt, doch laut Schätzungen vom Jahr 2000 stehen etwa 14.000 Strohballenhäuser in den USA [Gruber, 2000], Tendenz steigend.

### 8.1.2 Der Strohballenhausbau in Europa



**Abb. 8-4 Strohballenhaus in Breitenfurt, NÖ**

[Herbert Gruber]

In Europa kann der Strohballenhausbau auf keine derart lange Geschichte zurückblicken. Erst als das über lange Zeit übliche Verbrennen des überflüssigen Stroh am Feld aus Umweltschutzgründen nicht mehr gern gesehen war, suchte man nach alternativen Einsatzgebieten für das Nebenprodukt Strohballen. Gruber nennt zwei Hauptgründe, warum sich in Europa lange Zeit niemand mit diesem Baustil beschäftigte: einerseits handelt es sich um eine Low-Tech und Low-Cost-Bauweise, die aus Imagegründen im hoch entwickelten Europa keinen Platz findet, andererseits ist Europa „kein besonders fruchtbarer Boden für Experimentalbauten“ [Gruber, 2000]. In Österreich begann die breite Diskussion über

den Einsatz von Strohballen im Hausbau erst Ende der 1990er Jahre, als das Bundesministerium für Landwirtschaft die Studie „Bauen mit Stroh“ in Auftrag gab. Kurz darauf entwarf die „StrohTec Forschungs-, Entwicklungs- und VertriebsgmbH“ mit Sitz in Eichgraben, Niederösterreich, ein Fertighaus-System in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise mit Strohdämmung, das Niedrigenergiehaus-Standard erreicht. Auch auf Grund der Möglichkeit der Eigenleistungen kann dieser Haustyp preislich mit herkömmlichen Fertigteilhäusern konkurrieren. Er ist jedoch als weitaus ökologischer einzustufen. Die ersten fünf dieser Fertigteilhäuser entstanden im Sommer 1999 in Niederösterreich und der Steiermark. Das Prinzip dieser Häuser besteht darin, dass Strohballen in die vorgefertigten Holzrahmen geschichtet werden, anschließend zwecks Aussteifung diagonal mit Latten

beplankt, eine Windbremse angebracht und mit Ausbauplatten (magnesitgebundene Holzwolleplatten) verschalt werden (siehe Abb. 8-4).



Alternativ können auch geschoßhohe Wandtafeln, die schon im Werk bzw. der Zimmerei mit Strohballen bestückt werden, auf die Baustelle transportiert und aufgestellt werden (Abb. 8-5), was die Bauzeit erheblich verkürzt. Die Wände werden außen mit Kalk oder und innen mit Lehm verputzt.

**Abb. 8-5 Anlieferung der Wandtafeln** [Herbert Gruber]

Durch die Gründung des Österreichischen Strohballennetzwerks ASBN, weiteren Studien (u.a. von Global 2000) und Seminaren (u.a. organisiert von der „Gruppe angepasste Technologie“, kurz GraT, der TU-Wien) wird diese Bauweise weiter bekannt gemacht. Die Zahl der pro Jahr in Österreich gebauten Stroh Häuser lässt sich nur schwer abschätzen, da ein großer Anteil in Eigenregie gebaut und nicht öffentlich dokumentiert wird. Laut Johannes Jaschok, Zimmerermeister und Strohballenlieferant, liegt diese Zahl bei etwa 30 Häusern pro Jahr, Tendenz steigend. Nach [Jaschok, 2007] stehen derzeit um die 200 bis 250 Strohballenhäuser in Österreich.

Seit dem Jahr 2005 sind in Österreich auch „schlanke“ Strohballen mit einer Breite von 24 cm (die Standardbreite von Strohballen beträgt 35 cm) erhältlich, die eine platzsparendere Bauweise ermöglichen und trotzdem den für ein Niedrigenergiehaus nötigen U-Wert erreichen.

### 8.1.3 Tragende versus nicht-tragende Strohballenwände

In Österreich werden (bis auf sehr wenige Ausnahmen) Strohballenhäuser mit Tragkonstruktionen aus Holz gebaut, obwohl rein bautechnisch auch lastabtragende Strohballenwände möglich wären. Doch zum einem ist es weitaus schwieriger für solche im Nebraska-Stil erbauten Häuser eine Baubewilligung zu bekommen, zum anderen ist der extrem sparsame Umgang mit Bauholz in einem Land wie Österreich, wo mehr Holz nachwächst als geerntet wird, nicht notwendig. Weiters ist auch die Ausbildung von Wandöffnungen (Fenster, Türen) bei lastabtragenden Strohballenwänden aufwendiger. Die Nebraska-Bauweise erscheint daher vor allem in Regionen, in denen Holz eine Mangelware ist, sinnvoll, nicht jedoch in Österreich.

## 8.2 Bauphysikalische Eigenschaften der Strohballen

### 8.2.1 Thermische Eigenschaften

Da es sich bei Strohballen um einen inhomogenen Baustoff handelt, variiert die Wärmeleitfähigkeit der Ballen auf Grund von unterschiedlicher Pressung und ungleicher Materialverteilung geringfügig. Grundsätzlich haben Ballen, die stehend eingebaut werden (d.h. die Halme stehen vertikal) einen besseren  $\lambda$ -Wert als liegende Ballen. Laut einer im Jahre 2000 von der MA 39, Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien, durchgeführten Untersuchung liegt die mittlere Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Strohballens bei 0,038 W/mK [Gruber, 2000]. Da hier jedoch vorgetrocknete Ballen getestet wurden, in der Praxis aber Ballen eine gewisse Eigenfeuchte besitzen, wird in der Literatur [u.a. Gruber, 2000] empfohlen, die gemessenen Werte um 20% zu erhöhen. Aber auch mit dem Rechenwert von  $\lambda = 0,045$  W/mK lassen sich mit den 24 cm breiten Ballen mühelos U-Werte unter 0,2 W/m<sup>2</sup>K erreichen, mit den 35 cm breiten Ballen auch Werte unter 0,015 W/m<sup>2</sup>K. Letztere eignet sich auch für eine Wand eines Passivhauses.

Strohballen besitzen verglichen mit herkömmlichen Dämmstoffen eine höhere Dichte, in etwa 100-135 kg/m<sup>3</sup> (zum Vergleich: Mineralwolle: 15-80 kg/m<sup>3</sup>, Polystyrol: 15-40 kg/m<sup>3</sup>). Dadurch ist die speicherfähige Masse wesentlich höher als bei Leichtbauten und die Gefahr der sommerlichen Überwärmung wird eingedämmt.

### 8.2.2 Feuchteempfindlichkeit

Stroh ist ein natürlicher Baustoff, der, wenn er lange Zeit feucht ist und nicht wieder austrocknen kann, zu verrotten beginnt. Dies geschieht auf Grund des hohen Silikatgehaltes des Strohs zwar äußerst langsam, trotzdem ist während der Lagerung und Verarbeitung der Strohballen darauf zu achten, dass diese der Feuchtigkeit nicht über längere Zeit ausgesetzt sind.

Um das Stroh auch während der gesamten Lebensdauer des Hauses keinen langen Feuchtigkeitsperioden auszusetzen, sind zwei verschiedene Ansätze möglich:

Ersterer kommt ohne einer innenliegenden Dampfbremse aus, da die Schichten außerhalb der Strohdämmung (Windbremse, Putzträger und Putz) sehr diffusionsoffen sind. Wasserdampf kann zwar in die Strohdämmung gelangen und kondensiert auch in geringen Mengen, die Konstruktion kann aber ungehindert wieder austrocknen, sodass das Stroh keinen Schaden nimmt. Kalk- und Kalktrassputz mit einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  von etwa 7 eignen sich für diesen Aufbau sehr gut (zum Vergleich: mineralischer Außenputz:  $\mu = 25$ , Kunstharzputz:  $\mu = 1000$ ). Diesen Putzen können auch Siloxane, die hydrophobierend wirken und somit die Wasseraufnahme eines Putzes verringern, beigemischt werden. Dies hat laut einer Studie der Kanadischen Bundesanstalt für Hypotheken und Wohnungswesen CMHC keinen Einfluss auf die Wasserdampfdurchlässigkeit des Putzes [Straube, 2000]. Zementhaltige Putze können eingesetzt werden, wenn

gewährleistet werden kann, dass diese ausreichend dampfdiffusionsoffen sind. Dieser Wandaufbau kann auch als hinterlüftete Holzfassade ausgeführt werden, was den Wandaufbau noch sicherer in Bezug auf Feuchteschäden macht, vorausgesetzt die bei diesem Aufbau unbedingt notwendige Windbremse hat eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von  $\mu = 0$ .

Als Innenputz empfiehlt sich ein Lehmputz, der einen hohen Wasseraufnahmekoeffizienten (ca.  $3 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ) besitzt, d.h. er wirkt als Feuchtespeicher und gibt die Feuchtigkeit zeitverzögert wieder ab. Lehmputz ist zwar ähnlich diffusionsoffen wie Kalkputz, doch da er sehr viel Feuchtigkeit speichern kann, gibt er kaum Feuchtigkeit weiter an die dahinter liegende Strohdämmung, sondern nimmt die Feuchtigkeit auf und gibt sie später an die Raumluft wieder ab.

Laut einer Studie der CMHC pendelt sich der relative Feuchtegehalt einer Strohwand ohne Dampfsperre schon nach wenigen Monaten auf den Wert von etwa 13% ein, auch wenn der Strohballen beim od. kurz nach dem Einbau durch das Anbringen eines feuchten Putzes etwas feuchter war. Dieser Zustand stellt sich auch ein, wenn es sich um einen Innenraum mit erhöhter Feuchtebelastung handelt [Gruber, 2000]. Die Feuchtigkeit ist so gering, dass das Wärmedämmvermögen des Stroh nicht beeinträchtigt wird und auch viel zu gering, um eine Verrottung des Stroh zu ermöglichen. Andere Studien und Autoren empfehlen jedoch bei Wänden, die an Nassräume grenzen, den Wasserdampfdiffusionswiderstand des Putzes zu erhöhen [Minke et al, 2004] bzw. eine Dampfbremse anzubringen.

Der andere mögliche Aufbau sieht eine Dampfbremse an der Innenseite der Wandkonstruktion vor. Dadurch entsteht ein Wandaufbau, der innen wesentlich dampfdiffusionsdichter ist als außen und die Dämmebene somit nicht feuchtegefährdet ist. Da eine Dampfbremse nie eine komplette Dampfsperre sein kann, muss trotzdem darauf geachtet werden, dass die äußeren Schichten die Austrocknung nicht verhindern. Die Dampfbremse wird in der Praxis meist mit OSB-Platten verwirklicht, da diese zugleich eine aussteifende Wirkung übernehmen und weniger schadensanfällig sind als dünne Folien. Auf eine dichte Verklebung der Plattenfugen muss geachtet werden.

Obwohl auch das IBO die Unbedenklichkeit einer Strohwand ohne Dampfbremse bestätigte, wird in Österreich der Großteil der Strohballehäuser mit einer Dampfbremse ausgestattet. Die ausführenden Zimmereien empfehlen in beinahe jedem Fall eine Dampfbremse, laut Herbert Gruber, Gründer des österreichischen Strohballenetzwerkes, vor allem deshalb, um die Haftung im Schadensfall ausschließen zu können [Gruber, 2007].

Um aufsteigende Feuchtigkeit zu verhindern, ist zwischen Fundament und Strohballenwand auf jeden Fall eine Dampfsperre anzubringen. Auch die spritzwassergefährdeten Bereiche müssen so ausgeführt werden, dass das Wasser nicht in die Strohdämmung eindringen kann. Diese Maßnahmen gelten jedoch nicht nur für Strohwände, sondern generell für Holzbauten.

Beachtet man die oben genannten Maßnahmen beim Wandaufbau, kann ein Strohhaus auch sehr gut in Regionen mit feuchtem und rauem Wetter eingesetzt werden. Eignet sich jedoch

an einem gewissen Standort oder an einem gewissen Gebäudeteil Holz nicht als Baustoff, so ist auch Stroh ungeeignet.

### 8.2.3 Brandverhalten

Im Jahre 2000 prüfte die MA 39 die Brennbarkeit von Strohballen und stellte fest, dass sowohl Strohballen mit einer Rohdichte von  $90 \text{ kg/m}^3$  also auch solche mit einer Rohdichte von  $120 \text{ kg/m}^3$  die Kriterien für die Brennbarkeitsklasse B2 (normal entflammbar) gemäß ÖNORM B 3800/1 erfüllen [Baubiologie, 2007]

Eine weitere Prüfung der MA 39 bestätigte die Brandbeständigkeit (REI 90) gemäß ÖNORM B 3800/2 einer 43 cm dicken Strohballenwand, eingebaut in einer Holzständerkonstruktion mit Lehm-Innenputz (2 cm) und Kalk-Außenputz (2 cm) [Baubiologie, 2007]. Brandtests in Kanada, in den USA und Dänemark kamen zu vergleichbaren Ergebnissen [Gruber, 2000] und stellen einer verputzten Strohballenwand somit ein ähnliches Brandverhalten wie Massivholz aus. Ähnlich wie bei Holz entsteht auch bei der Strohballenwand eine Verkohlungsschicht, die den weiteren Verbrennungsvorgang durch Luftabschluss und Wärmedämmung behindert.

### 8.2.4 Schallschutz

Aufgrund der relativ hohen Masse einer Strohballenwand gegenüber einer herkömmlichen Leichtbauwand und der Elastizität der Strohballen bietet dieser Wandaufbau einen guten Luftschallschutz. Im Vergleich mit einschaligen massiven Wänden, schneidet eine Strohballenwand gut ab. Laut Minke ist die Schalldämmwirkung von einer beidseitig verputzten Strohballenwand höher als von gleich schweren einschaligen Bauteilen, „da die Strohballen eine gewisse Federwirkung aufweisen [...] und in den Ballen eine Schallabsorption stattfindet“ [Minke et al., 2004].

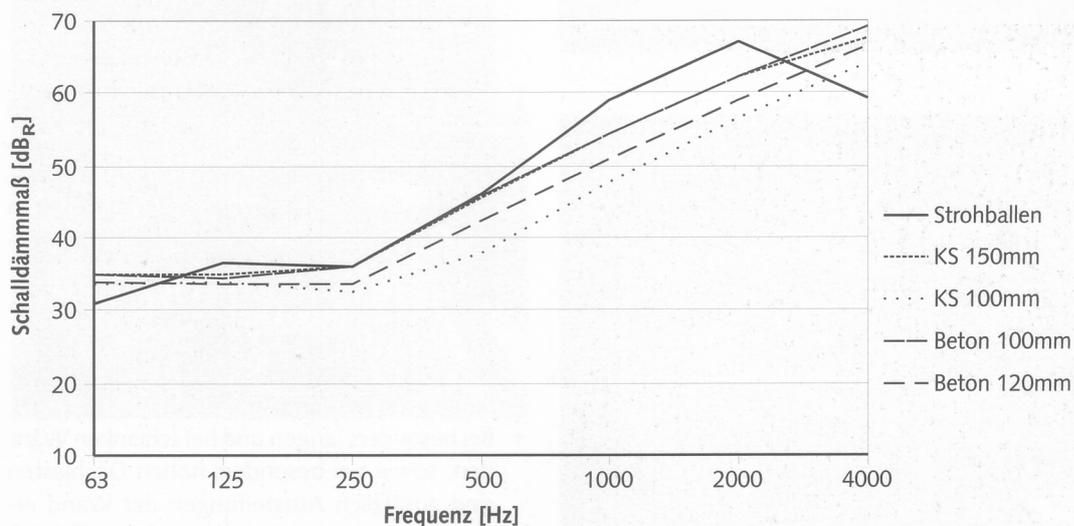


Abb. 8-6 Schalldämmmaß einer Strohwand im Vergleich zu Massivbauten [Minke et al., 2004]

In Australien und an der Technischen Universität Eindhoven, Niederlande, durchgeführte Messungen an 45 cm dicken Strohballenwänden bestätigten die gute Luftschalldämmung. Die angeführte Graphik (Abb. 8-6), ermittelt an der Technischen Universität Eindhoven, vergleicht die Schalldämmmaße einer 45 cm dicken Strohballenwand (Rohdichte 120-130 kg/m<sup>3</sup>), die mit einer 2,5 bzw. 3,5 cm dicken Lehmschicht verputzt ist, mit massiven Beton- und Kalksandsteinwänden. In so gut wie allen Frequenzbereichen bietet die Strohballenwand ein besseres Schalldämmmaß als 12 bzw. 15 cm dicke massive Mauern. Die Masse der Strohballenwand ist wesentlich geringer, der Platzbedarf jedoch bedeutend größer.

### 8.3 Weitere Vorteile und Nachteile der Strohballenwände

#### 8.3.1 Kosten

Vergleicht man den Preis der Strohdämmung im Verhältnis zur Wärmeleitfähigkeit mit herkömmlichen oder anderen ökologischen Dämmstoffen, so ist das Stroh unschlagbar [Enz et al.; Löfflad, 2005]. Auch die noch immer am häufigsten eingesetzten Dämmstoffe wie Mineralwolle und Schaumdämmstoffe kosten etwa doppelt so viel bezogen auf den Wärmedurchlasswiderstand.

In der Regel kostet ein in einem Zimmereibetrieb individuell gefertigtes Strohballenhaus kaum mehr als ein Fertigteilhaus von der Stange. Außerdem lassen sich durch Eigenleistung die Kosten für ein Strohballenhaus zusätzlich senken.

#### 8.3.2 Ökologie

Da Stroh als landwirtschaftliches Nebenprodukt in großen Mengen anfällt, ist der Primärenergieverbrauch dieses Dämmstoffes sehr gering. Auch die Transportwege können im Allgemeinen gering gehalten werden, da Stroh in den meisten Regionen vorhanden ist. Allein mit dem in Österreich anfallenden nicht landwirtschaftlich genutzten Stroh könnte man einige Tausend Strohballenhäuser jährlich bauen.

Weiters können Strohballen nach Abriss eines Hauses wieder verwendet werden, oder – im Gegensatz zu den meisten anderen Baustoffen – kostengünstig kompostiert oder thermisch verwertet werden.

Wände, die den oben beschriebenen Aufbau haben (Kalkputz, Lehmputz, Holz und Stroh) sind frei von Schadstoffen und erzielen aufgrund der Eigenschaften des Lehms und des Strohs, Wasser aufnehmen und wieder abgeben zu können, ein gutes Raumklima.

### 8.3.3 Individualität und Low-Tec

Strohballenwände benötigen für ihre Herstellung keine Spezialmaschinen. Stroh und Lehm lassen sich einfach bearbeiten bzw. modellieren, sodass sich Rundungen, Nischen, strukturierte Oberflächen und ähnliches relativ leicht herstellen lassen. Engagierte „Häuslbauer“ können bei diesen Baustoffen selbst Hand anlegen und ihre eigenen Vorstellungen verwirklichen (Abb.8-5). Werden die strohballengedämmten Wände jedoch mit Platten verkleidet und verputzt, so entstehen genauso ebene Wandoberflächen wie bei konventionellen Häusern (Abb. 8-6).



**Abb. 8-5 Spiralhouse in Irland** [Herbert Gruber]



**Abb. 8-6 Strohballenhaus in Engabrunn**  
[Herbert Gruber]

Ein weiterer Vorteil ist, dass einfache Strohballenhäuser schnell, kostengünstig und ohne große Gerätschaften von der ansässigen Bevölkerung errichtet werden können. Diese Eigenschaft ist für Österreich weniger bedeutend als z.B. für krisengeplagte, von Krieg oder Naturkatastrophen zerstörte Regionen.

### 8.3.4 Erdbebensicherheit

Strohballenwände können auf Grund ihrer Duktilität die Energie des Erdbebens durch Formänderungen abbauen, ohne dass die Konstruktion versagt [Minke et al. 2004]. Diese Eigenschaft ist auch bei starker Windbelastung oder hohen Schneelasten vorteilhaft.

Dieser Vorteil kommt besonders bei lastabtragenden Strohballenhäusern zum Tragen, wobei hier darauf zu achten ist, dass zusätzlich auch elastische bzw. reißfeste Verputze verwendet werden. Bei Wänden, wo der Baustoff Stroh nicht die Last trägt, ist dieser Vorteil zwar auch vorhanden, aber wesentlich geringer, da die tragende Holzkonstruktion nicht so elastisch wie die Strohballen ist.

### 8.3.5 Nachteile der Strohdämmung

Der größte Nachteil einer Strohdämmung ist die relativ große Wandstärke, die zu einem größeren Platzverbrauch (bzw. geringer Wohnfläche) führt. Dieser Nachteil lässt sich zwar mit den schlankeren Ballen etwas reduzieren, doch in Regionen, wo die Grundstückspreise sehr hoch sind – wie etwa im städtischen Raum – und bis aufs letzte ausgenutzt werden, wird sich diese Bauweise kaum durchsetzen. Im ländlichen Raum hingegen, erscheint dieser Nachteil nicht so gravierend. Durch die gegebene Wandstärke werden auch die Leibungen der Fenster relativ tief, was einen geringeren Lichteinfall zur Folge hat.

Die Geometrie sowie die Wandstärke richten sich nach der Größe der verfügbaren Strohballen. Da ein üblicher Strohballen eine Länge von 1 m hat, erscheint auch ein Grundraster, der durch 1 m teilbar ist, geeignet. Die Teilung eines Strohballens ist zwar möglich, erschwert aber den Wandaufbau.

Weiters reagiert der Baustoff Stroh wie schon erwähnt auf länger andauernde Feuchteeinwirkung empfindlich. Dieses Problem lässt sich jedoch durch geeignete Wandaufbauten vermeiden. Bei der Herstellung der Strohballenwände ist darauf zu achten, dass der Innen- und Außenputz nicht zu nass aufgetragen werden und das Austrocknen nicht lang verzögert wird, da ansonsten eine wenn auch relativ geringe Gefahr der Schimmelbildung besteht. (Das Verzögern des Austrocknens minimiert die Rissbildung.)

Die Angst, dass sich Nagetiere in der Strohdämmung einnisten können, besteht bei vielen Bauherren. Doch Stroh besteht aus Zellulose und dieser Stoff kann von Tieren – Ausnahme sind hier nur Termiten – nicht verdaut werden. Stroh stellt demnach „keinen besonderen Anziehungspunkt für Kleinnagetiere und Insekten“ [Gruber, 2000] dar. Mit dem heutigen Stand der Technik ist es auch keine Herausforderung mehr, den Kornanteil, der wiederum vor allem Mäuse anziehen würde, auf nahezu Null zu bringen. Auch zum Nestbauen eignet sich ein gepresster Strohballen nicht, da keine Hohlräume vorhanden sind. Möchte man trotzdem auf Nummer sicher gehen, kann man den unteren Teil der Strohwände mit einem feinmaschigen Drahtgitter einhüllen, um den Kleinnagern den Zutritt zu verwehren.

## 8.4 **Mögliche Aufbauten von Strohballenwände**

### 8.4.1 Wandaufbau mit Schilfplatte

Dieser Wandaufbau besteht gänzlich aus natürlichen Baustoffen, auch eine Dampfbremse ist nicht notwendig, da die äußeren Schichten dampfdiffusionsoffen sind und so die Konstruktion nach außen hin austrocknen kann. Zu beachten ist aber, dass die Sparschalung die Dämmung nicht abdichtet, sondern dass zwischen jedem Brett der Schalung einige Zentimeter Abstand sind, sodass die Dampfdiffusion nicht eingeschränkt ist. Die Sparschalung und die Schalung an der Innenseite der Strohballendämmung dienen als Aussteifung der Konstruktion. Die Windbremse ist nicht unbedingt notwendig, da auch der Kalktrassputz diese Eigenschaft übernimmt. Einige Hersteller empfehlen jedoch eine

Windbremse mit Dampfdiffusionszahl  $\mu = 0$ , sodass die Winddichtheit auch gewährleistet ist, wenn der Putz dünne Risse bekommt. Die Wandstärke ist mit 39 cm relativ gering für ein Strohballenhaus, geht aber zu Lasten einer fehlenden Installationsebene.

Tabelle 8–1 Wandaufbau mit Strohballendämmung und Schilfplatte

Wandaufbau mit Strohballendämmung und Schilfplatte				
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Kalktrassputz	2,5	1600	0,87	0,03
Schilfplatte	5,0	190	0,056	0,89
Windsperr				
Sparschalung (diagonal)	2,5	300	0,13	0,19
Holzsteher 6x24 dazw.		460	0,13	0,08
Strohballen	24,0	110	0,045	0,92
Holzschalung	2,5	460	0,13	0,19
Lehmputz /Lehmbauplatten	2,5	1700	0,8	0,03
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>39 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,15 W/m<sup>2</sup>K</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>144 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß</b>	<b>k.A.</b>			

#### 8.4.2 Wandaufbau mit magnesitgebundenen Holzwolleplatten

Dieser Aufbau ist der am häufigsten verwendete Wandaufbau von Strohballenhäusern in Österreich. Die magnesitgebundenen Holzwolleplatten dienen einerseits als Putzträger, andererseits können sie als Installationsebene verwendet werden. Wenn eine dickere Installationsebene benötigt wird, können auch 5 cm starke Holzwolleplatten eingesetzt werden. Die OSB-Platten dienen gleichzeitig als Dampfbremse und als Aussteifung der Konstruktion. Wichtig ist, dass die Fugen und alle Öffnungen der OSB-Platten dampfdicht verklebt werden.

Die Windsperr ist auch hier nicht unbedingt notwendig, da neben dem Außenputz auch die OSB-Platten diese Funktion übernehmen. Eine andere Möglichkeit der Windbremse besteht daran, die magnesitgebundenen Holzwolleplatten mit Lehmputz zu verschmieren, sodass deren Poren verschlossen werden.

Statt dem Lehmputz an der Wandinnenseite können auch Lehmbauplatten (Lehmtrockenputzplatten) verwendet werden. Diese werden im Gegensatz zum Lehmputz trocken verlegt, d.h. mit der Holzwerkstoffplatte verklebt und zusätzlich angetackert und mit Lehmdünnputz verspachtelt. Lehmbauplatten haben eine geringere Dichte und eine geringere Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda = 0,13$  W/mK) als Lehmputz, da sie leichte Zuschlagstoffe wie Stroh, Hanf und Jutte enthalten. Das hat den Vorteil, dass sich Lehmbauplatten wärmer anfühlen als normaler Lehmputz. Doch auch Lehmputze sind mittlerweile mit diesen

Zuschlägen und ähnlicher Wärmeleitfähigkeit erhältlich. Auf dem Gesamt-U-Wert der Konstruktion hat dies jedoch kaum einen Einfluss, da sich die Änderung erst in der dritten Nachkommastelle bemerkbar machen.

**Tabelle 8–2 Wandaufbau mit Strohballendämmung und Holzwolleplatten**

<b>Wandaufbau mit Strohballendämmung und Holzwolleplatten</b>					
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	Anteil	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$					0,04
Kalktrassputz	2,5	1600	0,87		0,03
Magnesitgebundene Holzwolleplatte	3,5	400	0,1		0,35
Windsperre					
Holzschalung (diagonal)	2,5	300	0,13		0,19
Holzsteher 6x24 dazw.	24,0	460	0,13	0,08	5,05
Strohballen		110	0,045	0,92	
OSB – Platte	2,5	640	0,13		0,19
Magnesitgebundene Holzwolleplatte	3,5	400	0,1		0,35
Lehmputz /Lehmbauplatten	2,5	1700	0,8		0,03
Übergangswiderstand innen $R_{si}$					0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>41 cm</b>				
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,16 W/m<sup>2</sup>K</b>				
<b>Masse der Wand</b>	<b>167 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>Schalldämmmaß</b>	<b>k.A.</b>				

Der Aufbau mit schlanken Strohballen ist für ein Niedrigenergiehaus geeignet, der gleiche Aufbau mit den Standard-Strohballen eignet sich für ein Passivhaus. Der U-Wert verringert sich auf 0,12 W/m<sup>2</sup>K, die Masse erhöht sich auf etwa 183 kg/m<sup>2</sup>.

#### 8.4.3 Hinterlüfteter Wandaufbau mit tragenden KLH-Platten

Der folgende Wandaufbau wurde beim S-House in Böhheimkirchen, Niederösterreich, einem von der GraT im Jahre 2004 errichteten Informationszentrum für den Strohballenbau und erneuerbare Baustoffe, angewendet. Das S-Haus – als Passivhaus konzipiert – wurde jedoch mit einer Dämmstärke von 50 cm ausgestattet und erreicht einen U-Wert von 0,08 W/m<sup>2</sup>K. Als tragende und zugleich aussteifende Konstruktion wird eine 11 cm starke KLH-Platte verwendet. Diese kann an der Innenseite sichtbar gelassen oder auch verkleidet und verputzt werden. Die Vollholzplatte besteht aus fünf Schichten, die mit lösungsmittel- und formaldehydfreiem Kleber kreuzweise unter Druck verleimt werden, ist winddicht, aber trotzdem diffusionsoffen. Der Dampfdiffusionswiderstand ist jedoch um ein vielfaches höher als der Dampfdiffusionswiderstand der Strohballendämmung. Die Dämmung ist somit nicht feuchtegefährdet durch Kondensation, da die Strohballen mehr Wasserdampf bzw. kondensiertes Wasser nach außen transportieren können als Wasserdampf durch die KLH-Platten gelangen kann.

Tabelle 8–4 Wandaufbau aus Massivholz mit Strohballeddämmung

Wandaufbau mit KLH-Platten und 35cm Strohdämmung, hinterlüftet				
	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(mK)]	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Horizontal-/Stülpchalung (Lärche)	2,0	590	0,13	0,15
Hinterlüftung/Konterlattung	5,0			
Lehmputz	2,0	1700	0,8	0,03
Strohballen	35,0	110	0,045	7,78
KLH-Platte	11,0	460	0,13	0,85
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>55 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b>	<b>0,11 W/m<sup>2</sup>K</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>135 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß</b> (Abschätzung)	<b>51 dB</b>			



**Abb. 8-7 S-House, Böheimkirchen**  
[www.s-house.at]



**Abb. 8-8 S-House, Böheimkirchen**  
[www.s-house.at]

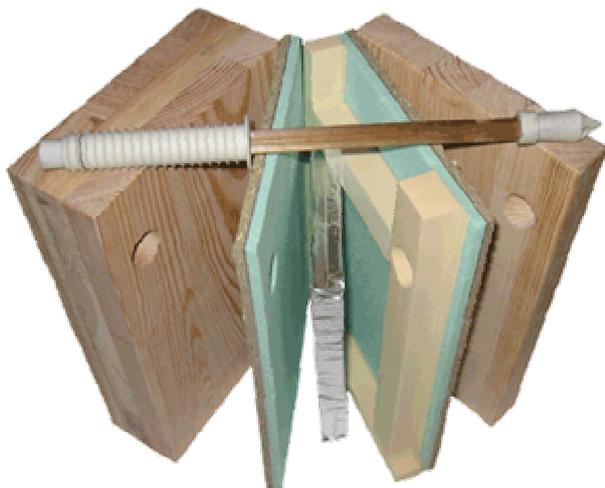
Die Strohballe werden mit Schnüren, die mit Holzdübeln an den KLH-Platten befestigt sind, an die Wand gehalten. Zusätzlich werden die Strohballe untereinander mit Rundstäben verbunden, um eine gewisse Steifigkeit zu erlangen (Abb. 8-7). Anschließend werden die Strohballe mit Lehm verputzt um den Brandschutz der Hinterlüftungsebene zu gewährleisten. Außerdem wirkt der Lehmputz auch als Windbremse, sodass der Wind die Wärmedämmung nicht auskühlen lässt. Mit Spezialdübel wird die Konterlattung an die Strohballe geschraubt. Die mit einem ökologischen Holzschutzmittel behandelten Fassadenlatten werden mit Holzdübel an der Konterlattung befestigt (Abb. 8-8).

## 9 WANDAUFBAUTEN MIT VAKUUMDÄMMUNG

### 9.1 Beschreibung der Vakuumdämmung

Vakuumdämmungen werden schon seit Jahrzehnten z.B. in Kühlgeräten eingesetzt. Der Einsatz im Bauwesen ist jedoch relativ jung, da Bauwerke eine längere Lebensdauer als elektrische Geräte haben und es erst in den letzten Jahren gelungen ist, Vakuumdämmplatten zu produzieren, die über Jahrzehnte hinweg nur sehr wenig von ihrem Dämmwert einbüßen.

Vakuumisolationspaneele (VIP) bestehen aus mikroporöser Kieselsäure, die gepresst wird und von einer mehrschichtigen, metallisierten, gas- und wasserdampfdichten Hochbarrierefolie umgeben ist. Diese Folie hat die Aufgabe, das Vakuum von etwa ein bis zehn Millibar über viele Jahre hindurch konstant zu halten. Durch die runde Form der einzelnen Elemente der Kieselsäure wird die Wärmeübertragung durch Festkörperleitung reduziert, da sich die Teilchen nur punktförmig berühren. Weiters verringert ein Infrarot-Trübungsmittel die Wärmeübertragung durch Strahlung. Die dritte Art der Wärmeleitung, die Konvektion, wird durch das Vakuum, das die Luftmoleküle reduziert, minimiert.



**Abb. 9-1 VIP in Holz-Sandwichkonstruktion**  
[Fa. Variotec]

Um die Vakuumisolationspaneele vor mechanischer Beschädigung zu schützen, gibt es neue Entwicklungen, diese Paneele in eine Sandwichkonstruktion aus Holz oder Beton (z.B. für Perimeterdämmungen) zu integrieren. Dabei wird das Vakuumisolationspaneel zuerst beidseitig mit massivem Polyurethan (PUR) und zusätzlich mit einer Aluminiumschicht eingehaust. Letztere dient gleichzeitig als zusätzliche Diffusionssperrschicht. Die einzelnen, eingepackten, fünf Zentimeter starken Paneele – vom Hersteller Variotec „Qasa-Elemente“ genannt – werden diffusionsdicht mit Hilfe eines Butylbandes aneinander geschlossen und in eine Holz-Sandwichkonstruktion eingepackt (Abb. 9-1). Die äußeren Teile der Sandwichkonstruktion werden mit Verbindungsankern aus Kohlefaser oder bei höherer Beanspruchung aus Edelstahl zusammengehalten. Diese Anker durchdringen die Vakuumdämmschicht in der Fuge zwischen zwei Paneelen [Enz et al., 2006].

Dieses System wurde erstmals im Jahr 2005 an einem Demonstrationsobjekt eingesetzt. Die Forschungs- und Entwicklungsphase ist jedoch bei diesem Produkt noch lange nicht abgeschlossen, weswegen hier nur der derzeitige Stand der Entwicklungen beleuchtet werden kann.

Weitere Möglichkeiten, die Vakuumisulationspaneele in die Wandkonstruktion zu integrieren, sind einerseits das Ankleben, andererseits das Befestigen der Paneele mittels einer PVC-Schiene. Erstere Konstruktion hat den Nachteil, dass die Paneele auf Grund des Klebstoffes nicht mehr recycelt werden können. Außerdem kann die Dauerhaftigkeit der Klebung nicht gewährleistet werden [Dutzler, 2002]. Die Zweite erwähnte Befestigungsmöglichkeit hat den Nachteil, dass PVC zu den Materialien gehört, die aus ökologischer Sicht grundsätzlich vermieden werden sollten (siehe Kapitel 9.3.3).



**Abb. 9-2 VIP mit Holzkonstruktion**  
[BMVIT, 2006]

Im Zuge von Forschungen der vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie initiierten Arbeitsgruppe „Haus der Zukunft“ wurde eine neue, mechanische Befestigungsart mit Hilfe von Holzlatten entwickelt (Abb. 9-2). Diese wurde bei einer Sanierung eines Reihenhauses im Jahr 2006 eingebaut [BMVIT, 2007]. Wie auch bei oben genannten Anwendungen müssen die Vakuumisulationspaneele im eingebauten Zustand mit einer Schutzschicht (EPS, XPS, PE-Schaumfolie, Holzweichfaserplatte) umgeben werden, um die Wahrscheinlichkeit der mechanischen Beschädigung zu minimieren.

## 9.2 Bauphysikalische Eigenschaften der Vakuumdämmung

### 9.2.1 Thermische Eigenschaften

Die Vakuumdämmplatte hat eine äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,004 W/mK. Aufgrund der Neuartigkeit dieses Produkts kann aber noch nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob dieser Wert auch noch nach einigen Jahrzehnten aufrechterhalten werden kann. Laut Angaben der Firma Variotec weisen diese Elemente auch nach 50 Jahren eine maximale Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/mK auf. Diese Werte wurden mit Hilfe von Langzeitsimulationen ermittelt. Bei Vakuumdämmplatten, die nicht zusätzlich mit Polyurethan und Aluminium eingepackt sind, kann die Wärmeleitfähigkeit auf Grund der Alterung jedoch auf bis zu 0,02 W/mK anwachsen [Korjenic, 2003]. Geht das Vakuum durch mechanische Beschädigung der Außenhülle verloren, so ändert sich die Wärmeleitfähigkeit zu 0,019 W/mK [Variotec, 2006].

Geht man von einer konstanten Wärmeleitfähigkeit aus, so lassen sich schon mit vier bis fünf Zentimetern Vakuumdämmung Wände für Niedrigenergiegebäude herstellen. Die spezifische Wärmekapazität beträgt 1050 J/kgK. Die oben beschriebene Holz-Sandwichkonstruktion erreicht einen U-Wert von 0,15 W/m<sup>2</sup>K, eine Masse von 96 kg/m<sup>2</sup> und eine spezifische Wärmespeicherfähigkeit von 156 kJ/m<sup>2</sup>K [Enz et al., 2006].

### 9.2.2 Feuchteempfindlichkeit

Der Einsatz von Vakuumisolationspaneelen erfordert einen dampfdiffusionsdichten Wandaufbau, da die Vakuumplatten selbst dampfdiffusionsdicht sind und ein Entweichen der Feuchtigkeit durch die Wandkonstruktion nach außen hin unmöglich ist. Auch Fugen zwischen den VIPs müssen dampfdiffusionsdicht ausgeführt werden. Feuchte darf nicht in die Paneele eindringen, da benetzende Flüssigkeiten die Struktur des Kerns zerstören.

### 9.2.3 Brandverhalten

Der Pulverkern der Vakuum-Dämmplatten ist hochtemperaturstabil und der Baustoffklasse A1 „nicht brennbar“ zugeordnet. Die Hülle ist temperaturstabil bis 80 °C [Variotec, 2006]. Das „Qasa-Element“ hat ein Brandverhalten, dass der Klasse B1 „schwer entflammbar“ entspricht. Die Einstufung des gesamten Wandaufbaus ist noch nicht erfolgt, derzeit werden die Zulassungen im Einzelfall erteilt.

Problematisch im Brandfall sind die Stoffe PVC und PUR-Schaum, die in den meisten Wandkonstruktion mit Vakuumisolationspaneelen vorkommen, da bei deren Verbrennung hochgiftige Substanzen, die zum Teil auch als krebserregend eingestuft werden, entstehen.

### 9.2.4 Schallschutz

Da es sich bei diesen Wandaufbauten um sehr schlanke und leichte Konstruktionen handelt, leidet der Schallschutz massiv darunter. Der oben beschriebene Wandaufbau mit „Qasa-Elementen“ in einer Holzkonstruktion hat lediglich ein Schalldämmmaß von 36 dB [Enz et al., 2006]. Ein besserer Schallschutz kann mit vorgesetzten biegeweichen Schalen oder einer vorgesetzten Fassade erreicht werden. Damit würde aber der Hauptvorteil, der Platzgewinn, wieder verloren gehen.

## 9.3 Weitere Vorteile und Nachteile der Vakuumdämmung

### 9.3.1 Platzgewinn

Der Einsatz von Vakuumisolationspaneelen kann im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen den Nutzflächengewinn um etwa 10% steigern. Dies ist vor allem bei relativ kleinen, gut gedämmten Baukörpern bedeutend. Auch bei vorhandenen Gebäuden, bei denen eine thermische Sanierung mit herkömmlichen Dämmstoffen nicht möglich wäre, erscheint der Einsatz von Vakuumdämmungen sinnvoll. Durch die schlanken Wände ergibt sich weiters eine geringe Leibungstiefe, wodurch der Lichteinfall vergrößert wird.

### 9.3.2 Fertigung und Preis

Die Vakuumisolationspaneele können zwar von einigen Firmen in einer Größe von bis zu 3x10 m hergestellt werden, stellen aber zur Zeit für jedes Haus eine Maßanfertigung dar, was sich im Preis niederschlägt. Es handelt sich um ein High-Tech-Produkt, das allein schon wegen seiner aufwändigen und genau überwachten Produktion einen höheren Preis als herkömmliche Produkte hat. Auch Eigenleistungen sind auf Grund der hohen Technologie und den hohen Qualitätsanforderungen kaum möglich. Wie sich der Preis in den kommenden Jahren entwickeln wird, ist noch nicht abzusehen. Falls Häuser mit diesem Wandaufbau ähnlich wie Fertigteilhäuser in Serie erzeugt werden, wird der Preis vermutlich stark sinken.

Ein Vorteil der Sandwich-Elemente ist die hohe Vorfertigung im Werk und die kurze Rohbauzeit von einigen Tagen. Außerdem können mit dem „Sandwich-System“ alle Außenbauteile eines Hauses (Außenmauern, Kellermauern, Bodenplatte, Dach) abgedeckt werden. Bei erdberührten Bauteilen kommt dabei das Beton-Sandwich-Element zum Einsatz. Der gestalterischen Vielfalt sind kaum Grenzen gesetzt, da die Paneele ohnehin Maßanfertigungen für jedes einzelne Bauwerk sind.

### 9.3.3 Ökologie

Der Energieaufwand zur Erzeugung eines Wandaufbaus mit Vakuumdämmung erfordert mindestens doppelt so viel Energie wie konventionelle Wandaufbauten, etwa Ziegelhäuser mit EPS-Dämmung oder Leichtbauten mit Mineralwollendämmung [Enz et al., 2006]. Verglichen mit ökologischen Wandkonstruktionen (Strohballenhäuser, Leichtbauten mit Flachsdämmung, Massivholzhäuser) kann der Wert auch das Vier- bis Fünffache erreichen. Ganz ähnlich sieht es mit dem CO<sub>2</sub>-Äquivalent aus, das etwa doppelt so hoch wie bei Massivbauten mit EPS-Dämmung und drei bis sieben mal so hoch wie bei Holzhäusern ist, obwohl das tragende Element der untersuchten Wand mit Vakuumdämmung ebenfalls aus Brettsperholz besteht [Enz et al., 2006].

Zusätzlich werden bei Wandaufbauten mit Vakuumdämmung in den meisten Fällen Baumaterialien verwendet, vor allem Polyurethan und PVC, dessen Vermeidung auch das Österreichische Institut für Baubiologie und -ökologie anrät. Für die Herstellung von PUR werden u.a. Isocyanate benötigt, die hochgiftig sind und teilweise auch als krebserregend gelten. Weiters können diese und andere giftige Substanzen, z.B. aromatische Amine, nach dem Einbau noch ausdampfen. Im Brandfall setzen Polyurethan u.a. Blausäure und Isocyanate, beides hochgiftige Stoffe, frei.

Die Erzeugung von PVC erfordert einen hohen Energieeinsatz. Weiters fallen dabei giftige, dioxinhaltige Abfälle an. Auch Vorprodukte des PVCs sind gesundheitsschädigend und krebserregend (z.B. Vinylchlorid). Ein weiterer Nachteil des PVC ist, dass es nur sehr schwer bis gar nicht recyclingfähig ist. Thermisch verwerten in einer Müllverbrennungsanlage ist nicht unproblematisch, da neben einer hohen Rauchentwicklung krebserregende Dioxine freigesetzt werden. Daher sollte der Einsatz von PCV generell vermieden werden.

Die positiven ökologischen Eigenschaften des Holzbaus treffen bei diesem Wandaufbau daher nur sehr bedingt zu. Aus ökologischer Sicht haben diese Elemente – so wie sie bisher eingebaut wurden – daher nur einen Sinn, wenn aufgrund des fehlenden Platzes andere Dämmungen unmöglich sind (z-B.: Sanierungen, Fensterlaibungen, Türen). Bei neu entwickelten Systemen, die ohne problematische Baumaterialien auskommen und erneuerbare Dämmstoffe zum Schutz der Paneele einsetzen, kann dieses Dämmsystem in Zukunft jedoch auch als ökologische Dämmung relevant sein.

#### 9.3.4 Prototyp – Charakter

Der wohl entscheidende Nachteil ist, dass es sich um ein sehr neues System handelt, dass sich im Bauwesen in der Praxis noch nicht über Jahrzehnte bewährt hat, sondern dessen Langzeitwerte nur durch Simulationen berechnet wurden. Insbesondere die Aspekte Lebensdauer der Vakuumpaneele, Wartung und Austausch beschädigter Paneele sind noch nicht restlos geklärt. Aber auch über die bauphysikalischen Aspekte wie Brandbeständigkeit, Wärmebrücken und Feuchteproblematik gibt es noch Forschungsbedarf [Enz et al., 2006].

## 9.4 Mögliche Aufbauten von Wänden mit Vakuumdämmung

### 9.4.1 Wand mit „Qasa-Element“ in Holzsandwichkonstruktion

Tabelle 9–1 Wandaufbau aus Brettsperrholz mit Vakuumdämmung

Wandaufbau aus Brettsperrholz mit Vakuumdämmung ("Qasa-Element")				
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/(mK)]	[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Furnierschichtholz (Kerto)	3,30	480	0,15	0,22
Diffusionsdichte Folie				
PUR-Massiv	0,25	300	0,07	0,04
Diffusionssperrschicht aus Aluminium				
PUR-Schaum	0,25	50	0,025	0,10
Vakuuminisulationspaneel	4,00	150	0,004	10,00
PUR-Schaum	0,25	50	0,025	0,10
Diffusionssperrschicht aus Aluminium				
PUR-Massiv	0,25	300	0,07	0,04
Diffusionsdichte Folie				
Brettsperrholz verleimt	9,40	600	0,15	0,63
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>17,70</b>	<b>cm</b>		
<b>U-Wert der Wand</b> [Variotec, 2006])	<b>0,12</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>		
<b>Masse der Wand</b>	<b>79,99</b>	<b>kg/m<sup>2</sup></b>		
<b>Schalldämmmaß</b> [Enz et al., 2006]	<b>36</b>	<b>dB</b>		

Dieser Wandaufbau ist in seiner Schlankheit kaum noch zu unterbieten und das obwohl sein U-Wert auch für ein Passivhaus geeignet wäre. Wie aber schon in Kapitel 5.2.1 erwähnt, ist für den Heizwärmebedarf sowohl die sommerliche Überhitzung auch die speicherwirksame Masse von Bedeutung. Diese ist bei dem hier gewählten Aufbau sehr gering – noch geringer als bei den meisten Leichtbauten. Daher wäre der Einsatz von Latentwärmespeichern (siehe Kapitel 4.3.1.) sinnvoll, um die Temperaturschwankungen abzufedern und eine sommerliche Überhitzung zu vermeiden.

Rein rechnerisch ergibt sich für diesen Wandaufbau ein U-Wert von 0,10 W/m<sup>2</sup>K. Da jedoch jede Art der Befestigung – in diesem Fall Kohlefaseranker – eine Wärmebrücke verursachen und sich gerade bei Hochleistungsdämmstoffen Wärmebrücken besonders deutlich auswirken, wurde der Wert auf 0,12 W/m<sup>2</sup>K erhöht (siehe auch Kapitel 10.1).

Aus ökologischer Sicht ist der Wandbaubau nur bedingt empfehlenswert (siehe Kapitel 9.3.3).

#### 9.4.2 Wand aus Brettsperrholz und Vakuumdämmung

**Tabelle 9–2 Wandaufbau aus Brettsperrholz und Vakuumdämmung**

<b>Wandaufbau aus Brettsperrholz und Vakuumdämmung</b>				
	Dicke	Rohdichte	$\lambda$	R-Wert
	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/(mK)]	[m <sup>2</sup> K/W]
Übergangswiderstand außen $R_{se}$				0,04
Fassade aus Sperrholz	2,00	600	0,15	0,13
Holzweichfaserplatte	2,00	170	0,055	0,36
Vakuumisolationspaneel	4,00	150	0,004	9,00
Dampfbremse				
Brettsperrholz verdübelt	9,40	600	0,15	0,63
Übergangswiderstand innen $R_{si}$				0,12
<b>Wandstärke</b>	<b>17,40 cm</b>			
<b>U-Wert der Wand</b> [Dutzler, 2002]	<b>0,12 W/mK</b>			
<b>Masse der Wand</b>	<b>77,80 kg/m<sup>2</sup></b>			
<b>Schalldämmmaß</b> (Abschätzung)	<b>36 dB</b>			

Bei diesem Wandaufbau werden die Vakuumisolationspaneele mit einer PVC-Schiene an die Konstruktion befestigt. Durch den Einsatz dieses sehr bedenklichen Baumaterials ist auch dieser Wandaufbau ökologisch nicht empfehlenswert (siehe Kapitel 9.3.3). Die übrigen eingesetzten Materialien sind ökologisch gut vertretbar.

Da hier die Paneele erst auf der Baustelle eingebaut werden, ist die Gefahr der Beschädigung wesentlich größer als beim Wandaufbau 9.4.1, bei dem die Paneele in einer Sandwichkonstruktion geschützt angeliefert und eingebaut werden.

Bezüglich der speicherfähigen Masse gilt dasselbe wie bei vorherigem Wandaufbau.

## 10 BAUPHYSIKALISCHE BERECHNUNGEN

Um das Wärme- und Feuchteverhalten der Wandaufbauten besser beurteilen zu können, wurden einige Wandaufbauten mit bauphysikalischen Berechnungsprogrammen untersucht.

### 10.1 Berechnung des Wärmeflusses

Der Wärmefluss wurde mit dem Programm THERM 5.2 berechnet. Die Ergebnisse waren wenig überraschend, da in der Auswahl der Wandaufbauten schon darauf geachtet wurde, Wärmebrücken so gut wie möglich zu vermeiden. Bei den folgenden Berechnungen wurde eine Außentemperatur von  $-10^{\circ}$  und eine Innentemperatur von  $+20^{\circ}$  Celsius angenommen. Die Farben der Abbildungen umfassen den Bereich von 0-30 W/m<sup>2</sup>.

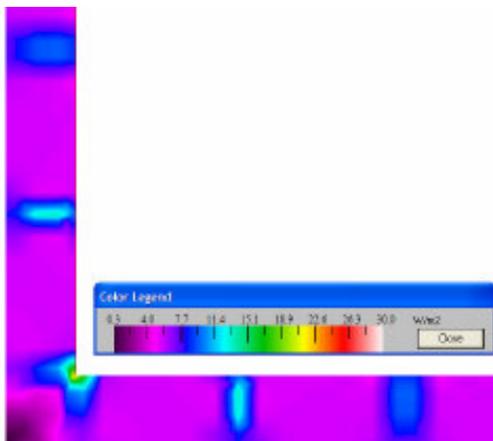


Abb. 10-1 Wärmestrom einer Leichtbauwand mit Außendämmung

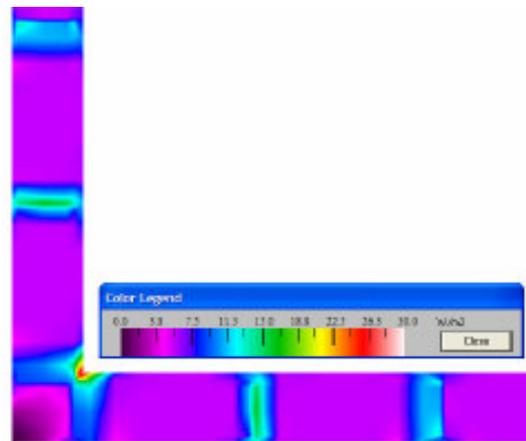


Abb. 10-2 Wärmestrom einer Leichtbauwand ohne Außendämmung

Die Abbildung 10-1 zeigt den Wärmestrom einer Leichtbaukonstruktion, die unter dem Putz eine Holzfaserplatte als Außendämmung besitzt (Wandaufbau siehe 5.4.1). Die Holzriegel, deren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den Dämmstoffen wesentlich größer ist, lassen sich farblich deutlich erkennen.

Die Abbildung 10-2 zeigt eine Konstruktion mit derselben Dämmstoffstärke, wobei hier der gesamte Dämmstoff zwischen den Holzriegeln liegt, also keine zusätzliche Außendämmung angebracht wurde. Es entstehen Wärmebrücken, da sich außerhalb der Holzriegel nur mehr eine dünne Putzträgerplatte und der Putz befinden. Die Wärmebrücken durch die Holzriegel wirken sich deutlicher aus. Besonders in der Ecke, wo zwei Holzriegel aneinander stoßen, ist der Wärmestrom groß. Ein Wandaufbau ohne durchgehende Dämmebene sollte daher möglichst vermieden werden.

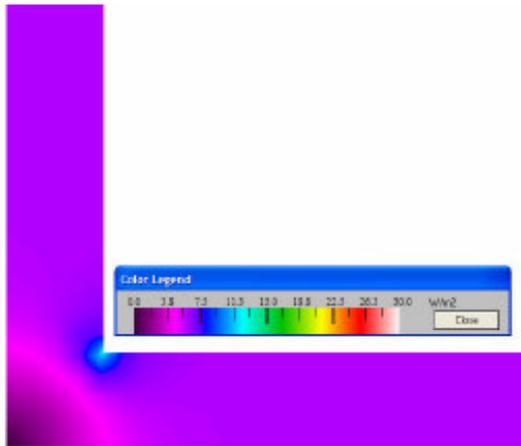


Abb. 10-3 Wärmestrom einer Massivholzwand

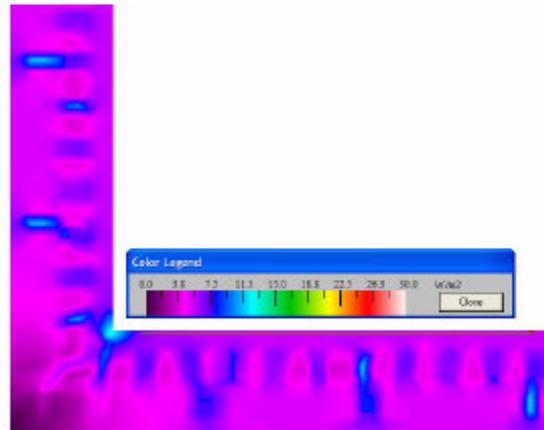


Abb. 10-4 Wärmestrom einer „Steko-Wand“

Die Abbildung 10-3 zeigt einen homogenen Wandaufbau in Massivbauweise (Aufbau siehe 6.6.1). Lediglich eine Wärmebrücke in der Ecke ist zu erkennen, welche (bei eckigen Häusern) unvermeidbar ist. Die Abbildung 10-4 zeigt einen Wandaufbau mit dem „Steko“-System (Aufbau siehe 7.4.2) mit hinterlüfteter Fassade. Hier ist erkennbar, dass die Holzfaserdämmung an der Außenseite nicht durchgehend ist, sondern durch Holzstaffeln unterbrochen ist. Dies bewirkt (geringe) Wärmebrücken.

Der Wandaufbau mit Strohballendämmung (Abb. 10-5) besitzt eine durchgehende Außendämmung aus Schilfplatten (Aufbau siehe 8.4.1). Dadurch werden – wie schon bei Abbildung 10-1 bemerkbar – die Wärmebrücken, die durch die Holzsteher entstehen, entschärft. Durch die relativ dicke Dämmstoffebene von 24 cm und der geringen Wärmeleitfähigkeit des Strohs, ergibt sich ein sehr geringer Wärmedurchlass zwischen den Holzstehern.

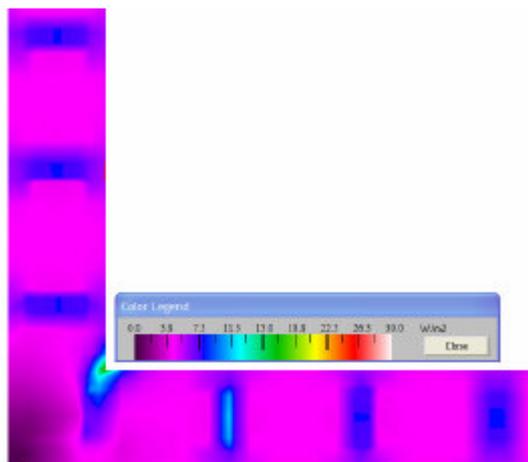


Abb. 10-5 Wärmestrom eine Wand mit Strohballendämmung

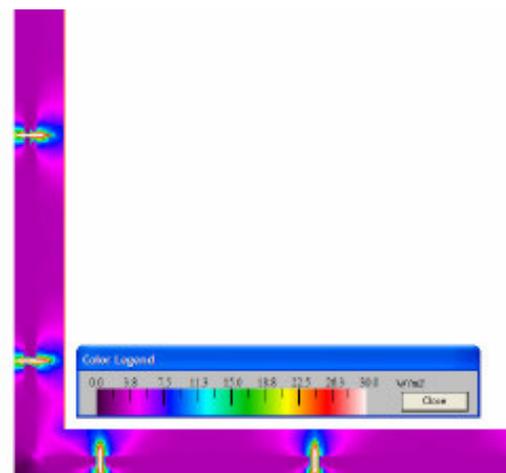


Abb. 10-6 Wärmestrom einer Wand mit Vakuumdämmung

Die Abbildung 10-6 zeigt den Wärmedurchlass einer massiven Holzwand mit Vakuumdämmung. Problempunkte sind hier die Befestigungsanker der Vakuumisoliationspaneele, die, obwohl sie nur einen gerigen Durchmesser haben, farblich deutlich zu erkennen sind. Das liegt daran, dass sich bei Hochleistungsdämmstoffen Wärmebrücken

besonders deutlich auswirken. Obwohl die Befestigungsanker nicht durch die ganze Holzkonstruktion reichen, sind sowohl an der Innen- als auch an der Außenoberfläche Temperaturunterschiede von etwa 2 Grad Celsius zu erkennen. Die eigentliche Tragkonstruktion ist aufgrund der Außendämmung nur sehr geringen Temperaturunterschieden ausgesetzt (siehe Abb. 10-7). Dies trifft auch auf andere Wandaufbauten zu, dessen Hauptdämmebene geschlossen außerhalb der Tragkonstruktion liegt.

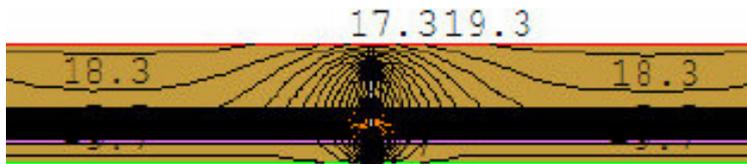


Abb. 10-7 Isothermen einer Wand mit Vakuumdämmung

Generell ist erkennbar, dass Wandaufbauten in Holzbauweise im Vergleich zu Wänden aus Beton oder Ziegel eher unanfällig für Wärmebrücken sind, da Holz im Vergleich zu anderen tragenden Baumaterialien eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

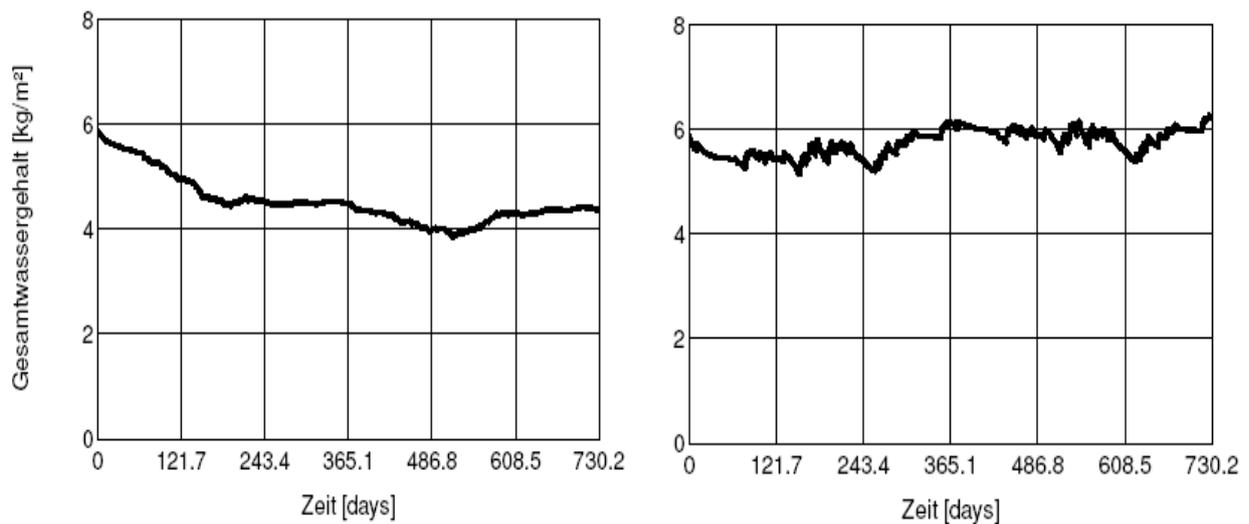
## 10.2 Berechnung des Feuchtetransportes

Der Feuchtetransport der Wandaufbauten wurde mit dem Programm WUFI berechnet. WUFI steht für „Wärme und Feuchte instationär“ und wurde vom deutschen Fraunhofer Institut, Abteilung Bauphysik, entwickelt. Das Programm erlaubt eine Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von mehrschichtigen Wandaufbauten unter wirklichkeitsnahen Bedingungen. Diese Analysen sind notwendig, da einerseits eine längerfristige Feuchtebelastung die Konstruktion maßgeblich schädigen kann und andererseits das thermische Verhalten einer Wand auch vom Feuchtigkeitsgehalt der einzelnen Materialien abhängt. Je nach Materialeigenschaft erhöht sich der Wärmedurchlass kaum bis sehr gravierend. WUFI eignet sich unter anderem zur Bestimmung der Austrocknungszeit von Baufeuchte und zur Erkennung von Tauwassergefahr in Bauteilen.

Bei nachfolgenden Rechnungen wurden jeweils dieselben Rand- und Anfangsbedingungen angenommen. Dies sind die Klimadatei von Holzkirchen, Deutschland (Standort des Fraunhofer Institut, Abteilung Bauphysik) und die Nordseite für die äußeren Randbedingungen. Für die inneren Randbedingungen wurden eine mittlere Feuchtebelastung und eine minimale Innentemperatur von 20°C gewählt. Die Simulationen erstrecken sich über mindestens zwei Jahre.

### 10.2.1 Feuchtegehalt von Leichtbauwänden

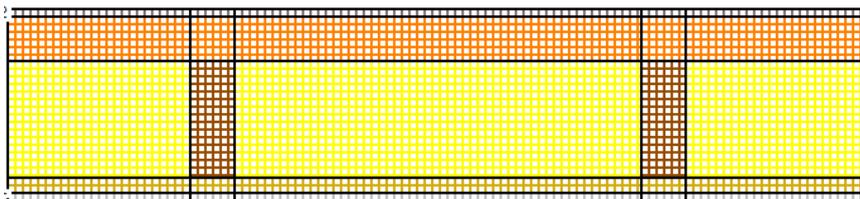
Mit WUFI lassen sich sehr gut die Notwendigkeit und der  $s_d$ -Wert einer Dampfbremse bestimmen. Dies ist besonders für Wände in Leichtbauweise von Bedeutung. Zwei Wandaufbauten, die sich darin unterscheiden, dass eine Wand eine Dampfbremse an der Innenseite hat (Aufbau siehe 5.4.1), die andere nicht, wurden an Hand der Ergebnisse der Simulation miteinander verglichen.



**Abb. 10–8 Vergleich Gesamtwassergehalt einer Leichtbaukonstruktion mit und ohne Dampfbremse**

Die linke Graphik in Abbildung 10-8 zeigt den Gesamtwassergehalt der Wandkonstruktion einer Leichtbauwand mit Dampfbremse im Verlauf von zwei Jahren. Der Wassergehalt nimmt kontinuierlich ab. Die größte Austrocknung geschieht jeweils in der ersten Jahreshälfte, da im Sommer die absolute Luftfeuchte der Außenluft wesentlich höher als im Winter ist, sodass auch die Wandkonstruktion kaum weiter an Feuchtigkeit verliert. Bei der rechten Graphik ist zu erkennen, dass der Gesamtwassergehalt im Laufe der Zeit zunimmt. Dieser Wandaufbau funktioniert bauphysikalisch gesehen nicht, da nach einigen Jahren die Konstruktion durch die Feuchte geschädigt sein würde und sich vermutlich Schimmel bildet. Dieser Fall kann auch eintreten, wenn die Dampfbremse unsachgemäß eingebaut oder mechanisch beschädigt wird. Die Feuchte sammelt sich vor allem in den Dämmebenen an, besonders in jener unter dem Außenputz, da der Putz eine wesentlich höhere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl hat als der Dämmstoff. Die Feuchte kann daher nach außen hin nur sehr langsam verdunsten. Der Feuchtetransport von innen bis zum Putz geschieht wesentlich schneller, was eine Wasseranreicherung verursacht.

Die beiden Rechnungen wurden mit der eindimensionalen Version von WUFI berechnet. Um jedoch auch die Holzsteher in der Dämmebene berücksichtigen zu können, wurde die Leichtbauwand mit Dampfbremse zusätzlich mit WUFI 2D simuliert. Der Wandaufbau ist mit jenem des Kapitels 5.4.1 ident und in Abbildung 10-9 ersichtlich. Auch die Randbedingungen entsprechen jenen der eindimensionalen Simulation. Die Zeitspanne beträgt jedoch vier Jahre.



**Abb. 10-9 Wandaufbau der simulierten Leichtbauwand**

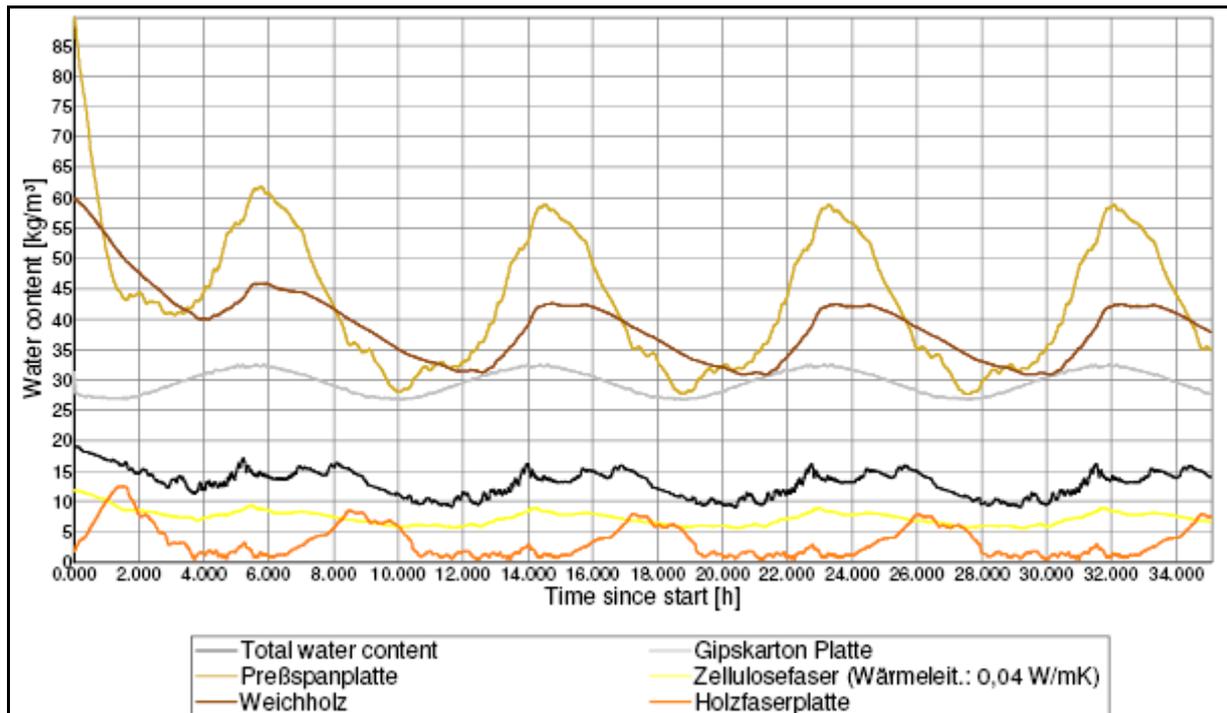


Abb. 10-10 Wassergehalt der einzelnen Schichten einer Leichtbauwand

Die Abbildung 10-10 lässt erkennen, dass die Leichtbauwand in den ersten beiden Jahren an Wassergehalt verliert. In den darauf folgenden Jahren ändert sich der Wassergehalt nur mehr über die Jahreszeiten. Der über den Jahresverlauf gemittelte Wassergehalt ändert sich jedoch kaum.

Weiters ist ersichtlich, dass der Wassergehalt der innenliegenden Bauteile deutlich höher ist als jener der außenliegenden. Das liegt daran, dass hier der absolute Wassergehalt gezeigt wird. Da im Innenraum die Temperaturen übers Jahresmittel gesehen höher sind als draußen, ist auch der absolute Wassergehalt der Luft im Raum höher.

### 10.2.2 Feuchtegehalt von massiven Holzwänden

Anders als beim Leichtbau trocknet der Holzmassivbau auch ohne Dampfbremse kontinuierlich aus. Die linke Graphik in Abbildung 10-11 zeigt den Gesamtwassergehalt eines Blockbohlenwand mit Außendämmung (Aufbau siehe 6.5.3), die Graphik daneben den Gesamtwassergehalt einer Vollholzwand mit Zwischen- und Außendämmung (Aufbau siehe 6.6.2). Bei zweiterer besteht die Fassade aus einem mineralischen Putz mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von  $\mu = 25$ . Wesentlich höher sollte dieser Wert nicht liegen. In der Regel werden diffusionsoffenerer Putze verwendet. Der absolute Wassergehalt des Tafelbaus ist etwa doppelt so hoch, da dieser über wesentlich mehr Masse verfügt. Der relative Wassergehalt liegt sowohl bei der Blockbohlenwand als auch beim Wandaufbau aus Brettsperrholz am Ende der Simulation bei etwa 9%.

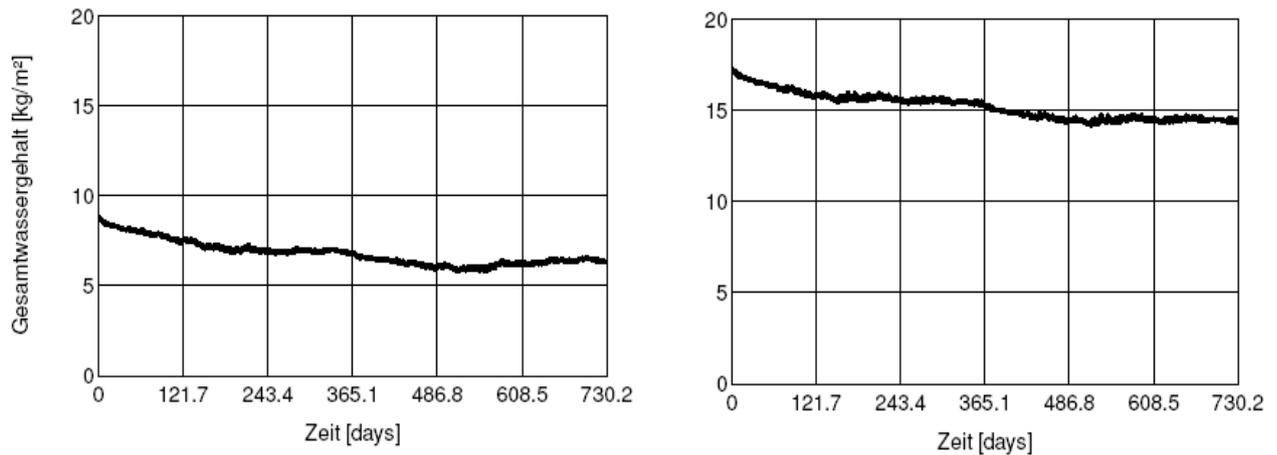


Abb. 10–11 Gesamtwassergehalt von massiven Holzwänden

Die „Steko-Wand“ zählt ebenfalls zu den massiven Holzwänden. Bei untersuchtem Aufbau handelt es sich um eine „Steko-Wand“ mit Zellulosedämmung und Außendämmung aus Holzfaserplatten (Aufbau siehe 7.4.1).

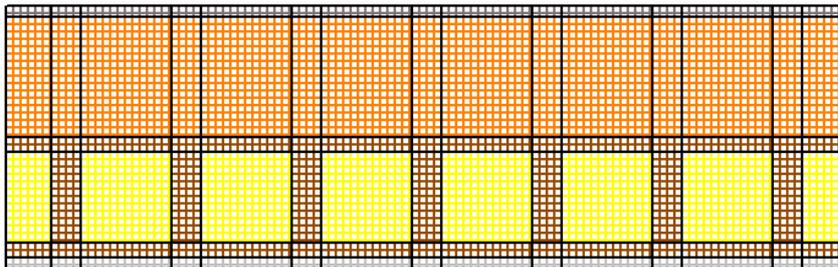


Abb. 10-12 Wandaufbau der simulierten „Steko-Wand“

Bezüglich des Feuchtetransportes verhält sich die „Steko-Wand“ sehr ähnlich der oben simulierten Massivholzwände. Die Abbildung 10-13 zeigt, dass der Wassergehalt in den ersten beiden Jahren leicht abnimmt, dann konstant bleibt. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind – ebenso wie beim Block- und Tafelbau – geringer als beim Leichtbau. Die Simulation lässt erkennen, dass der Wandaufbau auch ohne Dampfbremse bauphysikalisch gesehen funktioniert. Es kommt zu keiner Feuchteanreicherung der Konstruktion. Die schwarze Linie bezieht sich auf den Gesamtwassergehalt der Konstruktion.

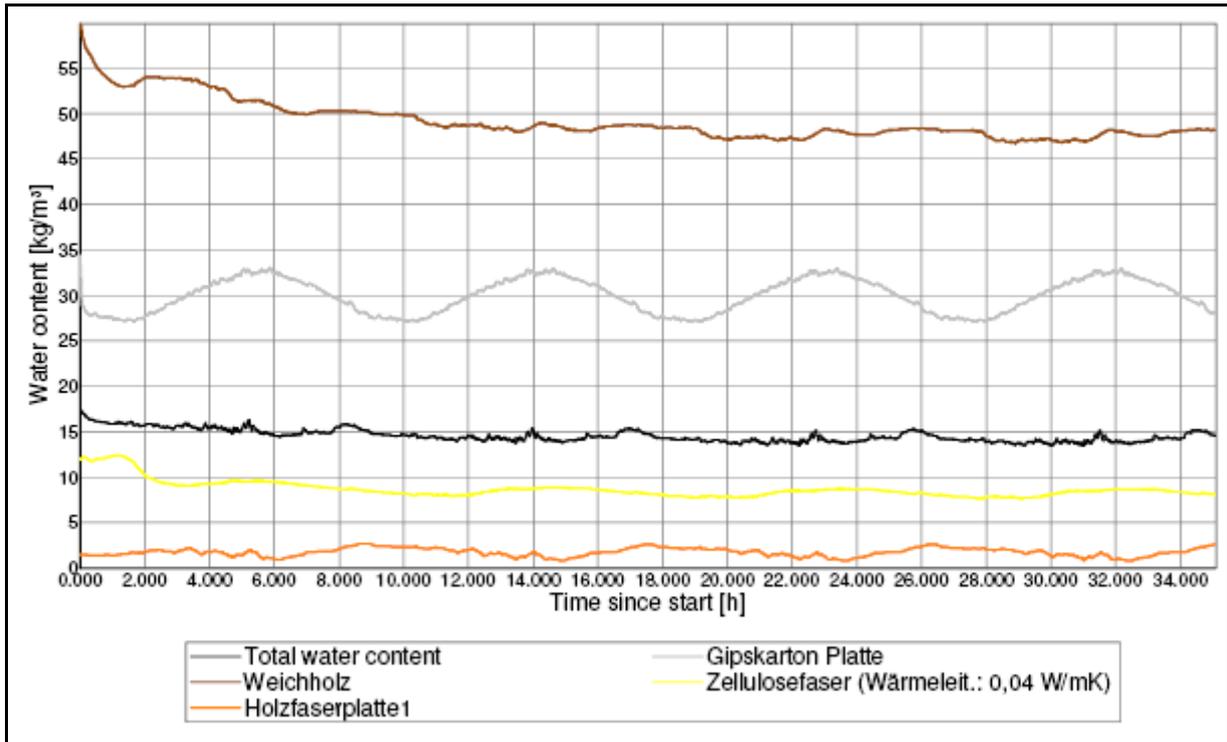


Abb. 10-13 Wassergehalt der einzelnen Schichten einer „Steko-Wand“

10.2.3 Feuchtegehalt einer Strohballenwand

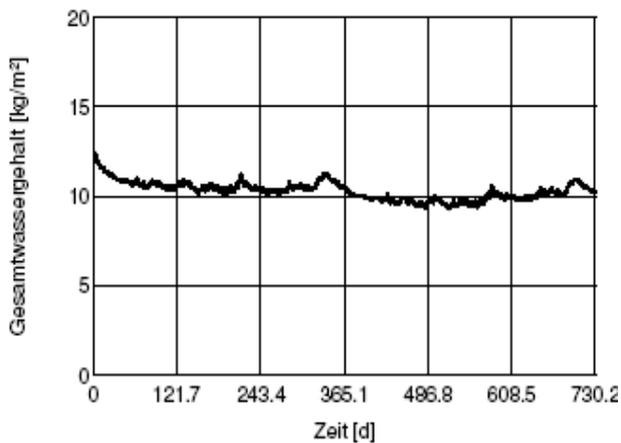


Abb. 210-14 Gesamtwassergehalt einer Strohballenwand

Die Strohballenwand wurde sowohl mit WUFI 1D als auch mit WUFI 2D simuliert, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Es wurde der Aufbau 8.4.2 untersucht, der eine OSB-Platte als Dampfbremse verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Gesamtwassergehalt im ersten Jahr leicht verringert. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind etwas höher als beim Holzmassivbau. Der Wassergehalt des Strohs bleibt jedoch auf Grund der Dampfbremse über das Jahr gesehen beinahe konstant.

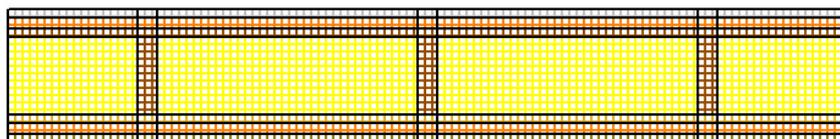


Abb. 10-15 Aufbau der simulierten Strohballenwand

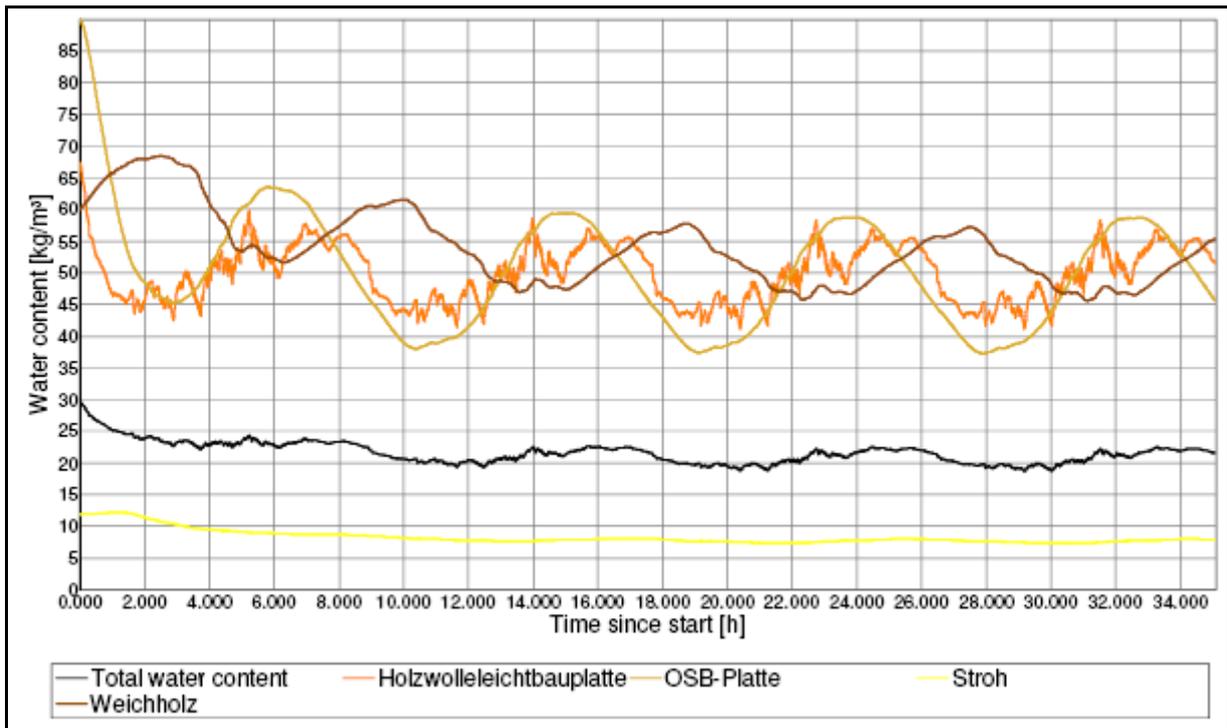
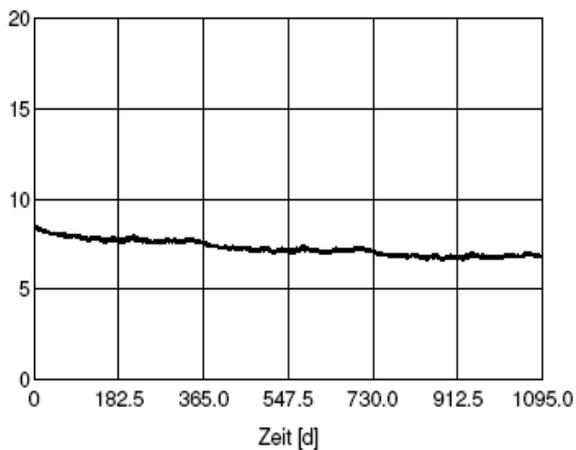


Abb. 10-16 Wassergehalt der einzelnen Schichten einer Wand mit Strohballedämmung

10.2.4 Feuchtegehalt einer massiven Holzwand mit Vakuumdämmung



Beim Wandaufbau mit Vakuumdämmung handelt es sich um einen dampfdiffusionsdichten Aufbau (siehe 9.4.2), daher sind die Änderungen des Wassergehalts auch bei einer Simulation über drei Jahre sehr gering. Der Wassergehalt der Vakuumisulationspaneele bleibt unverändert. Das tragende Brettsperrholz gibt im Laufe der Zeit etwas Feuchte an die Raumluft ab und pendelt sich dann bei etwa 9 % relativer Feuchte ein.

Abb. 10-16 Gesamtwassergehalt einer Wand mit Vakuumdämmung

### III. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Baustoff Holz ist sehr gut für Wandaufbauten von Niedrigenergiehäusern geeignet und bietet gegenüber Beton, Stahl und Ziegel einige Vorteile.

Die bauphysikalischen Vorteile betreffen die geringe Wärmeleitfähigkeit, das Wärmespeicherungsvermögen, die hygroskopischen Eigenschaften und die Dampfdiffusionsoffenheit. Da Holz einen guten Wärmeschutz bietet, kann auch mit Wandaufbauten, die ausschließlich aus Holz bestehen, der erforderliche U-Wert für ein Niedrigenergiehaus, realisiert werden. In der Regel besitzen Wandaufbauten aus Holz jedoch eine oder zwei Dämmstoffebenen. Auf Grund der genannten Eigenschaften des Holzes sind diese weniger anfällig auf Wärmebrücken als Beton oder Ziegelbauten. Die hygroskopischen Eigenschaften sowie die Dampfdiffusionsoffenheit des Holzes wirken sich positiv auf das Raumklima aus und ermöglichen – zumindest bei Holzmassivbauten – diffusionsoffene Wandaufbauten.

Obwohl es sich bei Holz grundsätzlich um einen brennbaren Baustoff handelt, ist der Brandschutz von massiven Holzbauten i.d.R. sehr gut. Dies bestätigen sowohl Prüfergebnisse als auch praktische Erfahrungen. Leichtbauten und Holzkonstruktionen mit geringen Holzquerschnitten erreichen die Brandschutzanforderungen nur durch Beplankung mit feuerresistenten Plattenwerkstoffen.

Statisch gesehen ist Holz auch für mehrstöckige Wohnbauten geeignet. Seine Tragfähigkeit bezogen auf sein Gewicht liegt höher als bei Stahl oder Beton. Holz kann auf Druck, Zug, Biegung und Schub belastet werden und dient in Plattenform auch der Aussteifung. Ein weiterer Vorteil ist, dass Holz im Druckbereich über eine gewisse Duktilität verfügt, Verformungen zulässt und ein Versagen nicht plötzlich eintritt.

Bezüglich der Ökobilanz schneiden Holz sowie die meisten Holzwerkstoffe sehr gut ab. Holz entzieht der Atmosphäre während seines Wachstums  $\text{CO}_2$  und speichert dieses über seine gesamte Lebensdauer. Weiters ist Holz regional verfügbar und dient am Ende seiner Lebensdauer genauso wie Holzabfälle, die während der Produktion entstehen, als erneuerbarer Energieträger. Holz ist in ganz Österreich regional verfügbar und erweist sich bei sachgemäßer Verwendung und Verarbeitung als sehr langlebig und widerstandsfähig. Ein weiterer Vorteil des Holzbaus ist die größtmögliche Vorfertigung im Werk, die eine kurze Bauzeit mit sich bringt.

Da der Holzanteil von Leichtbauten bezogen auf das Gesamtvolumen der verwendeten Baustoffe in der Regel nicht mehr als 30% beträgt, wirken sich bei dieser Bauweise die positiven bauphysikalischen Eigenschaften des Holzes nur sehr geringfügig aus. Mit dem Einsatz von nachwachsenden Dämmstoffen lässt sich das Raumklima eines Leichtbaus verbessern, die Vorteile eines massiven Holzhauses lassen sich jedoch dadurch nicht erreichen.

Der Dämm- und Baustoff Stroh bietet ähnlich gute bauphysikalische Eigenschaften wie Holz und ist in vielen Regionen im Überfluss vorhanden. Ein Haus mit Strohdämmung stellt daher eine gute Alternative zu Massivholzhäusern dar bzw. ist als kostengünstige Dämmung für Massivholzhäuser einsetzbar.

Der Schallschutz stellt einen Nachteil des Holzbaues dar. Holz verfügt gegenüber Ziegel oder Beton über relativ wenig Masse. Daher kann der Schallschutz bei vielen Holzhäusern nicht ausschließlich über Masse erreicht werden. Der für den Wohnbau geforderte Schallschutz von Wänden kann jedoch über mehrschalige Konstruktionen oder sehr dicke Massivholzwände zu Stande gebracht werden.

Holz ist vor länger andauernden, massiven Feuchteinwirkung zu schützen. Bei lange anhaltenden Holzfeuchten kann es zu Schimmel oder Pilzbefall kommen. Holzzerstörende Pilze können jedoch erst ab einer anhaltenden Feuchte von 25-30% überleben. Dies entspricht etwa dem zwei bis dreifachen Wert der Holzfeuchte, der sich bei Holzhäusern unter normalen Bedingungen einstellt. Bei Holzbauwerken ist einerseits auf den konstruktiven Holzschutz andererseits auf das Vermeiden von Kondensation im Wandaufbau zu achten.

Ein weiterer Nachteil ist die Anisotropie des Holzes. Seine mechanischen Eigenschaften sowie das Quell- und Schwindmaß sind von der Faserrichtung abhängig. Kreuzweise verleimte oder verdübelte Holzelemente wurden entwickelt um dieser Eigenschaft entgegenzuwirken.

Nachwachsende Dämmstoffe lassen sich gut in ein Holzhaus integrieren. Sie besitzen neben den ökologischen Vorteilen auch günstige bauphysikalische Eigenschaften. Besonders die größere speicherfähige Masse und die geringere Temperaturleitfähigkeit, die einen Indikator für den sommerlichen Wärmeschutz darstellt, zeichnen sie gegenüber den konventionellen Dämmstoffen Polystyrol und Mineralwolle aus.

Der Trend im Wohnbau zu energiesparenden Bauweisen wird sich auch in Zukunft fortsetzen. Um jedoch von ökologischen Häusern sprechen zu können, muss neben dem Energieverbrauch während der Lebensdauer eines Hauses auch der Energieverbrauch der Herstellung und der Entsorgung bzw. des Recycling betrachtet werden. Da diese Betrachtung in den letzten Jahren vermehrt Anklang findet und sich bisweilen auch bei einigen Wohnbaukriterien, wie etwa der Förderung, niederschlägt, ist davon auszugehen, dass der Anteil der Holzbauten in den kommenden Jahren weiter steigen wird.

## IV. ANHANG

## 11 Allgemeine Bauteilanforderungen des Brandschutzes

Tabelle 11–1 Allgemeine Bauteilanforderungen [OIB-Richtlinie 2, 2007]

	Gebäudeklassen (GK)	GK 1	GK 2 <sup>(1)</sup>	GK 3 <sup>(1)</sup>	GK 4 <sup>(1)</sup>	GK 5
<b>1</b>	<b>tragende Bauteile (ausgenommen Decken und brandabschnittsbildende Wände)</b>					
1.1	im obersten Geschoß	ohne	R 30	R 30	R 30	R 60 <sup>(2)</sup>
1.2	in sonstigen oberirdischen Geschoßen	R 30 <sup>(3)</sup>	R 30	R 60	R 60	R 90
1.3	in unterirdischen Geschoßen	R 60	R 60	R 90	R 90	R 90
<b>2</b>	<b>Trennwände <sup>(4)</sup></b>					
2.1	im obersten Geschoß	nicht zutreffend	EI 30	EI 30	EI 60	EI 60 <sup>(5)</sup>
2.2	in oberirdischen Geschoßen	nicht zutreffend	EI 30	EI 60	EI 60	EI 90
2.3	in unterirdischen Geschoßen	nicht zutreffend	EI 60	EI 90	EI 90	EI 90
2.4	zwischen Wohnungen bzw. Betriebseinheiten in Reihenhäusern	nicht zutreffend	EI 60	nicht zutreffend	EI 60	nicht zutreffend
<b>3</b>	<b>brandabschnittsbildende Wände und Decken</b>					
3.1	brandabschnittsbildende Wände an der Grundstücks- bzw. Bauplatzgrenze	REI 60 EI 60	REI 90 <sup>(6, 7)</sup> EI 90 <sup>(6, 7)</sup>	REI 90 EI 90	REI 90 EI 90	REI 90 EI 90
3.2	sonstige brandabschnittsbildende Wände oder Decken	nicht zutreffend	REI 90 <sup>(6)</sup> EI 90 <sup>(6)</sup>	REI 90 <sup>(6)</sup> EI 90 <sup>(6)</sup>	REI 90 <sup>(6)</sup> EI 90 <sup>(6)</sup>	REI 90 EI 90
<b>4</b>	<b>Decken und Dachschrägen mit einer Neigung von nicht mehr als 60 Grad gegenüber der Horizontalen</b>					
4.1	Decken über dem obersten Geschoß	ohne	R 30	R 30	R 30	R 60 <sup>(2)</sup>
4.2	Trenndecken über dem obersten Geschoß	ohne	REI 30	REI 30	REI 60	REI 60 <sup>(2)</sup>
4.3	Trenndecken über sonstigen oberirdischen Geschoßen	ohne	REI 30	REI 60	REI 60	REI 90
4.4	Decken innerhalb von Wohnungen bzw. Betriebseinheiten in oberirdischen Geschoßen	R 30 <sup>(3)</sup>	R 30	R 30	R 30	R 90 <sup>(2)</sup>
4.5	Decken über unterirdischen Geschoßen	R 60	REI 60 <sup>(7)</sup>	REI 90	REI 90	REI 90
<b>5</b>	<b>Balkonplatten</b>	ohne	ohne	ohne	R 30 oder mindestens A2	R 30 und mindestens A2
(1)	Sofern das Fluchtniveau nicht mehr als 11 m beträgt und jeder Aufenthaltsraum zumindest an einer Stelle nicht mehr als 7 m über dem angrenzenden Gelände liegt, (a) haben Gebäude der GK 1, die lediglich aufgrund der Hanglage in GK 4 fallen, nur die Bauteilanforderungen für GK 2 zu erfüllen, (b) haben Gebäude der GK 2 oder GK 3, die lediglich aufgrund der Hanglage in GK 4 fallen, nur die Bauteilanforderungen für GK 2 oder GK 3 zu erfüllen;					
(2)	Bei Gebäuden mit nicht mehr als sechs oberirdischen Geschoßen genügt für die beiden obersten Geschoße die Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten;					
(3)	Nicht erforderlich bei Gebäuden, die nur Wohnzwecken oder der Büronutzung bzw. büroähnlichen Nutzung dienen;					
(4)	Für tragende Trennwände gelten zusätzlich die Anforderungen an tragende Bauteile gemäß Punkt 1 der Tabelle 1;					
(5)	Bei Reihenhäusern genügt für die Wände zwischen den Wohnungen bzw. Betriebseinheiten auch an der Grundstücks- bzw. Bauplatzgrenze eine Ausführung in der Feuerwiderstandsklasse von REI 60 bzw. EI 60;					
(6)	Die Bauteile müssen nicht aus Baustoffen der Euroklasse des Brandverhaltens mindestens A2 bestehen;					
(7)	Für Reihenhäuser sowie Gebäude mit nicht mehr als zwei Wohnungen oder zwei Betriebseinheiten mit Büronutzung bzw. büroähnlicher Nutzung genügt die Anforderung R 60.					

Bauteile mit der Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten müssen aus Baustoffen der Euroklasse des Brandverhaltens mindestens A2 bestehen, sofern in Tabelle 11-1 keine Ausnahmen vorgesehen sind [OIB-Richtlinie 2, 2007].

**Gebäude der Gebäudeklasse 1 (GK1):** Freistehende, an mindestens drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen für die Brandbekämpfung von außen zugängliche Gebäude mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus einer Wohnung oder einer Betriebseinheit von jeweils nicht mehr als 400 m<sup>2</sup> Grundfläche.

**Gebäude der Gebäudeklasse 2 (GK2):** Gebäude mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus höchstens fünf Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m<sup>2</sup> Grundfläche; Reihenhäuser mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von jeweils nicht mehr als 400 m<sup>2</sup> Grundfläche.

**Gebäude der Gebäudeklasse 3 (GK3):** Gebäude mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, die nicht in die Gebäudeklassen 1 oder 2 fallen.

**Gebäude der Gebäudeklasse 4 (GK4):** Gebäude mit nicht mehr als vier oberirdischen Geschoßen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 11 m, bestehend aus einer Wohnung bzw. einer Betriebseinheit ohne Begrenzung der Grundfläche oder aus mehreren Wohnungen bzw. mehreren Betriebseinheiten von jeweils nicht mehr als 400 m<sup>2</sup> Grundfläche.

**Gebäude der Gebäudeklasse 5 (GK5):** Gebäude mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 22 m, die nicht in die Gebäudeklassen 1, 2, 3 oder 4 fallen, sowie Gebäude mit ausschließlich unterirdischen Geschoßen.

[OIB-Richtlinien: Begriffsbestimmungen, 2007]

## LITERATURVERZEICHNIS

Baratta, Mario von (Hrsg.) (2004): Der Fischer Weltalmanach 2005. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag

Baubiologie (2006): Strohballenbau: Strohballen und Brandbeständigkeit.. [www.baubiologie.at/asbn](http://www.baubiologie.at/asbn). 16.1.2007

Becker, Philipp: Vor- und Nachteile von Massiv- und Leichtbauweise, In: <http://www.architektur.tu-darmstadt.de/powerhouse>, 2.6.2007

BMVIT Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.) (2007): Aktuelle Ergebnisse: Haus der Zukunft, erweiterte Neuauflage 2007. Wien: AV+Astoria Druckzentrum

Clark, Halsa Regehr (2000): Heilung ist möglich: Eine revolutionäre Technik zur Behandlung chronischer Erkrankungen. München: Droemer Knauer

Dataholz (2007): Katalog bauphysikalisch ökologisch geprüfter Holzbauteile. [www.dataholz.com](http://www.dataholz.com)

Dehne, Michael; Kruse, Dirk; Ulf Krüger (2006): Brandschutz bei mehrgeschoßigen Holzbauten, In: Detail, Ausgabe 10/2006

Dutzler, Barbara (2002): Vakuumdämmung im Holzbau: Die Entwicklung eines vorgefertiges und schlanken Wandsystems für den Niedrigenergiebau. Diplomarbeit an der Fakultät für Architektur und Raumplanung, Technische Universität Wien

Dreyer, Jürgen (Hrsg.) (2004): Skriptum zur Vorlesung Bauphysik II. Technische Universität Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

Enz, Daniela; Hastings, Robert (2006): Innovative Wandkonstruktionen für Minergie-P und Passivhäuser. Heidelberg: Müller Verlag

Feist, Wolfgang (Hrsg.) (1997): Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. Heidelberg: C.F. Müller Verlag

gap-solar (2005): FAQ-Antworten. [www.gap-solar.at](http://www.gap-solar.at). 01.10.2005

Gruber, Herbert; Gruber, Astrid (2000): Bauen mit Stroh. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verlag

Hausladen, Gerhard; Saldanha, Michael de; Liedl, Petra; Sager, Christina (2005): KlimaDesign: Lösungen für Gebäude die mit weniger Technik mehr können. München: Verlag Georg D.W. Callwey GmbH & Co. KG.

Haustein, Tilo (2006): Schäden durch fehlerhaftes Konstruieren mit Holz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag

IBO (2003): Ergebnisbericht des österreichischen Instituts für Baubiologie und –ökologie der Prüfung der ökologischen Kennwerte für Holz100 der Firma Thoma. 18.03.2003

IBO (2006): Berechnete Ökologische Kennzahlen von ECOSOFT WBF. [www.ibo.at](http://www.ibo.at). 10.2.2006

Jaschok, Johannes (2007) in persönlichem Gespräch mit dem Autor. 10.2.2007

Humm, Othmar (1997): Niedrigenergiehäuser: Innovative Bauweisen und neue Standards. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag

KLH (2006): Produktbeschreibung, Brandschutz. Broschüre der KLH-Massivholz GmbH. Katsch: Eigenverlag

Kluger, Norber (2005): Mineralwolle-Dämmstoffe, ein neues Faserproblem. In: Schadstoffe bei Rückbau / Abbau und bei der Sanierung von Gebäuden, Internationales Symposium 9.-10. März 2005, St. Gallen, Schweiz.

Kolb, Bernhard (1988): 1000 Tips zum Bauen & Wohnen: bauen, renovieren, einrichten: gesünder, besser, schöner. München : Blok-Verlag

Korjenic, Azra (2003): Vakuumdämmung, In: Fakulta Stavební: 5. Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno.

LanaTherm (2006): LanaTherm, Naturbaustoffe, Widdemoos. [www.lanatherm.ch](http://www.lanatherm.ch). 20.5.2007

Längle, Peter (2007) an den Autor. 6.6.2007 (Emailverkehr)

Lingotrend (2007): Technische Daten Wandelemente. [www.lingotrend.de](http://www.lingotrend.de). 10.3.2007

Löfflad, Hans (2005): Bauen mit Holz: Konstruktion, Kosten, Planungsbeispiele. Handbuch für die planerische und baupraktische Umsetzung. Essen: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Wingen

Natterer, Julius (2005) : „Ich bin so kleinkariert“ : Holzbaupast Julius Natterer im Interview mit Roland Kanfer. In: Bau und Immobilien Report. <http://www.oesterreichonline.at>. 15.06.2005.

Meemken, Arne Berga (2006), Dämmen mit nachwachsenden Rohstoffen, In: Deutsche Bauzeitschrift, Ausgabe: 7/2006. Gütersloh: Bauverlag BV GmbH

Merl, Adolf (2006): Nachhaltiges Bauen mit Holz, In: Detail, Ausgabe 10/2006. Gütersloh: Bauverlag BV GmbH

Minke, Gernot; Mahlke Friedemann (2004): Der Strohballenbau: Ein Konstruktionshandbuch. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag

- Mötzl, Hildegund (2000): Ökologie der Dämmstoffe. Wien: Springer Verlag
- Nierobis, Lars (2003): Wärmedämmstoffe. [www.waermedaemmstoffe.com](http://www.waermedaemmstoffe.com). 15.4.2007
- Ökox (2006): Ausgezeichnete Ökobauprodukte, Informations- und Deklarationszentrale. [www.oebox.at](http://www.oebox.at). 9.5.2007
- Öko-Test (1996): Haus im Schafspelz: Testbericht Dämmstoffe. In: Öko-Test, Sonderausgabe Energie 1996. Frankfurt am Main: Öko-Test Verlag
- Österreichische Energieagentur (2007): Effizientere Heizungen durch bessere Installation. <http://www.eva.ac.at/projekte>. 15.5.2007
- Pavatex (2007): Richtig gedämmt mit Holzfaserprodukten. [www.pavatex.ch](http://www.pavatex.ch). 2.5.2007
- Pech, Anton; Kolbitsch, Andreas (2005): Baukonstruktionen Band 4: Wände. Wien: Springer-Verlag
- Petraschka, Klaus (2003): Massivholzbauweise. In: Project-m-Newsletter: Tragwerksplanung, Ausgabe 1/2003. [www.project-m.at/profil.htm](http://www.project-m.at/profil.htm)
- Reinsperger, Uwe (2005): Energieeffizientes und nachhaltiges Bauen am Beispiel eines Wohnhauses in Holzriegelkonstruktion mit Strohballendämmung. Diplomarbeit an der Fakultät für Architektur und Raumplanung, Technische Universität Wien
- Rösner, Christian (2006): Energieausweis soll Heizkosten sichtbar machen. Wiener Zeitung, 3.11.2006. Wien: Herold Druck und Verlag AG
- Scheer, Claus; Mandy Peter (2004): Holzbau-Taschenbuch: Bemessungsbeispiele nach DIN 1052, Ausgabe 2004, 10. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG
- Schickhofer, Günther (2002): Alte und neue Holzhäuser: Eigenschaften-Bausysteme-Beispiele. Graz: Leopold Stocker Verlag
- Schmitz-Günther, Thomas (2000): Gut Verpackt: Testbericht Dämmstoffe, Wärmedämmverbundsysteme. In: Öko-Haus, Sonderausgabe Energie 2000. Frankfurt am Main: Öko-Test Verlag
- Steiger, René (1995): Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktion. Zürich: Publikation des Instituts für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich
- Steko (2007): Steko-Wandbausystem: Detailkatalog der Fa. Steko Holz-Bausysteme AG. Uttwil: Eigenverlag

Stingl, Robert; Hansmann, Christian (2006): Holz und Hygiene: Antibakterielle Eigenschaften von Materialien. In: Zuschnitt: Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz Ausgabe: Nr. 22, Juni 2006

Stommel, Franz (2007): Ein Haus wie ein Baum. Neunkirchen-Seelscheid: Eigenverlag

Straube, John (2000): Moisture Properties of Plaster and Stucco for Strawbale Buildings. Enderbericht einer Studie des CMHC. [www.baubiologie.at/download/CMHCsbplaster.pdf](http://www.baubiologie.at/download/CMHCsbplaster.pdf)

Thoma, Erwin (2003): Für lange Zeit: Leben und Bauen mit Holz, Alte Weisheiten für moderne Technologien. Wien: Verlag Christian Brandstätter

Thoma, Erwin (2006): Forschung & Entwicklung: Prüfberichtaufstellung. [www.thoma.at](http://www.thoma.at). 30.11.2006

Thoma, Erwin (2007): Holz100, Installationen. [www.thoma.at](http://www.thoma.at). 2.6.2007

Variotec (2006): VIP- die Zukunft des Dämmens, Ideen / Konzepte / Erfolge: Werkbericht Nullheizenergiehaus. Neumarkt: Eigenverlag der Firma VARIOTEC Sandwichelemente GmbH & Co. KG

Walter, Gabriele; Ries, Kurt (2000): Ein Haus aus Holz: Planen-Bauen-Wohnen. München: BLV Verlagsgesellschaft

Wikipedia (2007): Graue Energie. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). 3.6.2007

Winter, Wolfgang; Dreyer, Jürgen; Schöberl, Helmut (2001): Holzbauweisen für den verdichteten Wohnbau. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie

Winter, Wolfgang (Hrsg.) (2002): Skript Holzbau II, Bausysteme Holz, C1 Holztragwerke im Geschoßbau. Wien: Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau

## **Verwendete Normen, Richtlinien und Gesetze**

BGBl. 1 / Nr.137/2006: Energieausweis-Vorlage-Gesetz EAVG

BGBl (für Deutschland) 2004/Nr.64: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: Energieeinsparverordnung

EU-Richtlinie 2002/91/ EG: Energy Performance of Buildings Directive

OIB (2007 A): Erläuternde Bemerkungen zur OIB-Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“ und zum OIB-Leitfaden „Energietechnisches Verhalten von Gebäuden“. Ausgabe: April 2007

OIB (2007 B): Erläuternde Bemerkungen zur OIB-Richtlinie 2 „Brandschutz“ Ausgabe: April 2007

OIB-Richtlinie 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit. April 2007

OIB-Richtlinie 2: Brandschutz. April 2007

OIB-Richtlinie 5: Schallschutz. April 2007

OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz. April 2007

OIB-Richtlinien: Begriffsbestimmungen. April 2007

ÖNORM B 8110-1: 2004-12-01 : Wärmeschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von Gebäuden/Gebäudeteilen

Vorschlag ÖNORM B 8110-1:2007-15-03 : Wärmeschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von Gebäuden/Gebäudeteilen, Heizwärmebedarf und Kühlbedarf

ÖNORM B 8110-5: 2002-12-01 (Vornorm): Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Niedrig- und Niedrigstenergie-Gebäude - Anforderungen und Nachweisverfahren

ÖNORM B 8110-5: 2007-04-01 (Entwurf): Wärmeschutz im Hochbau – Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile

ÖNORM B 8115-2: 2006-12-01: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz

ÖNORM B 1995-1-2: 2006-10-01: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall

ÖNORM EN 13501-1: 2007-05-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten

ÖNORM EN 13501-2: 2006-07-01 (Entwurf): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen

ÖNORM EN 13829: 2001-05-01: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren

MA 50 (2004): Informationsblatt Niedrigenergiehausförderung. [www.wien.gv.at/ma25](http://www.wien.gv.at/ma25). 26.11.2006

Moritz, Reinhold (2007): .Bauordnung für Wien: Kurzkomentar samt Durchführungsverordnungen und Nebenbestimmungen. Wien: Manz-Verlag

## 12 QUELLENVERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- Abb. 1-1: Österreichische Energieagentur, [www.energyagency.at](http://www.energyagency.at)  
Abb. 3-1: Steiger, 1995  
Abb. 4-1: [www.mineralwolle.de](http://www.mineralwolle.de)  
Abb. 4-2: [www.isofloc.de](http://www.isofloc.de)  
Abb. 4-3: [www.homatherm.com](http://www.homatherm.com)  
Abb. 4-4: [www.bautipps.de](http://www.bautipps.de)  
Abb. 4.5: [www.umweltschutz-bw.de](http://www.umweltschutz-bw.de)  
Abb. 4.6: [www.architektur.tu-darmstadt.de](http://www.architektur.tu-darmstadt.de)  
Abb. 4-7, Abb. 4-9: [www.gap-solar.at](http://www.gap-solar.at)  
Abb. 4-8: Markus Winkler  
Abb. 4-10: [www.kapella.de](http://www.kapella.de)  
Abb. 6-1 - Abb. 6-2: Firma Stommel-Haus GmbH, Deutschland  
Abb. 6-3: Ing. Erwin Thoma Holz GmbH, Österreich  
Abb. 7-1: STEKO Holz-Bausysteme AG, Schweiz  
Abb. 8-1: [www.strawhomes.com](http://www.strawhomes.com)  
Abb. 8-2: [www.strawhomes.com](http://www.strawhomes.com)  
Abb. 8-3: [www.thelaststraw.org](http://www.thelaststraw.org)  
Abb. 8-4, Abb. 8-5: Herbert Gruber, Österreichisches Strohballennetzwerk  
Abb. 8-6: Minke et. al, 2004  
Abb. 8-7, Abb. 8-8: [www.s-house.at](http://www.s-house.at)  
Abb. 9-1: VARIOTEC Sandwichelemente GmbH, Deutschland  
Abb. 9-2: BMVIT, 2006