Entwicklung thermisch optimierter Wandelemente aus Massivholzplatten mit eingefrästen Lufteinschlüssen

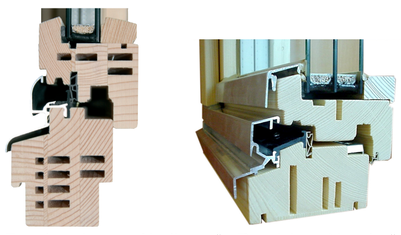
Im Rahmen der theoretischen Diplomarbeit wurde die **Technologie „Massivholzbauteile durch eingefräste Lufteinschlüsse thermisch zu optimieren“** untersucht und zur Entwicklung von Wandelementen aus Massivholz eingesetzt. Durch die Berechnung des thermischen Verhaltens vielfältiger Konstruktionsvarianten konnte festgestellt werden, dass **bis zu ca. -26 bis -27 % Verringerung der Wärmeleitfähigkeit** bzw. Verbesserung der Wärmedämmung möglich sind. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde eine **labortechnische Messung der Wärmeleitfähigkeit** an einer Bauteilvariante durchgeführt, die bestätigte, dass die Berechnung eine gute Annäherung an die gemessenen Werte ermöglicht.
Doch nicht nur ein besserer U-Wert spricht für das Einfräsen der Hohlräume: Durch eine Stoffflussanalyse konnte berechnet werden, dass der **Mehrwert der anfallenden Sägespäne** derzeit ca. 2 - 3 % des durchschnittlichen Preises von Brettsperrholz (~425 €/m³) betragen würde.

Grundsätzlich ist die Integration von Hohlräumen in **Brettsperr-, Brettschicht- und Brettstapelholz** entweder durch **Längsfräsungen** an der Brettoberfläche oder durch **Querfräsungen** innerhalb der Brettlage (Einfräsungen von der Brettseite) möglich. Querfräsungen in Brettsperrholz ermöglichen das Verleimen der einzelnen Brettlagen, während Brettsperrholz mit Lufteinschlüssen bisher an Dübel- oder Nagelverbindungen gebunden war.

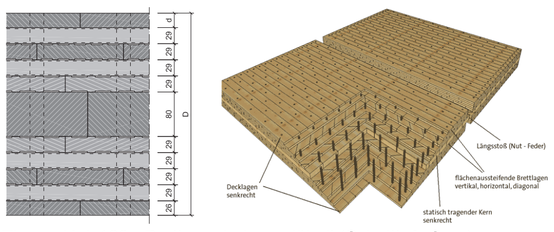
Das **Potenzial der Lufteinschlüsse zur thermischen Optimierung** wird im Wesentlichen durch die Wärmeleitfähigkeit des Holzes, die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Lufteinschlüsse, den Volumenanteil der Hohlräume, die Tragfestigkeit des Holzes und die technische Machbarkeit bestimmt. Je kleiner ein Hohlraum und je geringer die Dicke in Wärmestromrichtung, desto niedriger ist die äquivalente Wärmeleitfähigkeit und desto größer ist die wärmedämmende Wirkung.

Marktrecherche: Produkte aus Massivholz mit Lufteinschlüssen

Trotz der relativ jungen Technologie gibt es eine Reihe an Produkten am Markt, die diese Methode nutzen.



Fensterrahmen „Airotherm“, „PassivhausVenster“

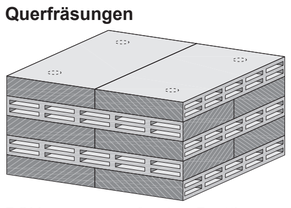


Thoma Holz100 - Brettsperrholz verdübelt (Schnitt, Aufbau)

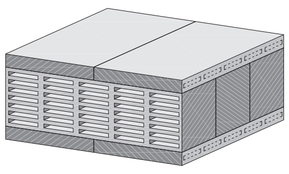
Konstruktionsarten (Beispiele)

Grundsätzlich ist die **Integration von Hohlräumen in Brettsperr-, Brettschicht- und Brettstapelholz** möglich. Die Verwendung der Holzerzeugnisse Brett (liegend oder hochkant) sowie Kantholz und verschiedenartige Anordnungen der Hohlräume ermöglichen vielfältige Konstruktionsvarianten.

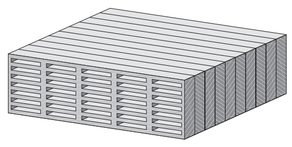
Querfräsungen



BSH aus quergefrästen Brettlagen

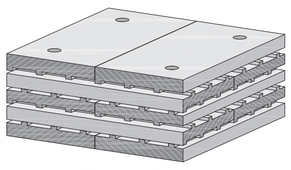


BSP mit quergefr. Kanthölzern als Mittellage

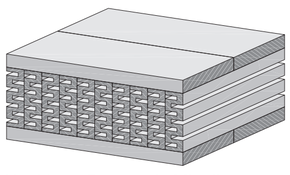


BSH od. BST aus quergefr. Hochkant-Brettern

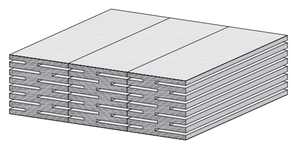
Längsfräsungen



BSP aus längsgefrästen Brettlagen (verdübelt)



Hochkant-Bretter als Mittellage

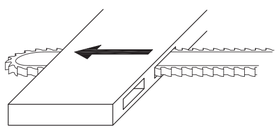


BSH oder BST aus längsgefr. Kanthölzern

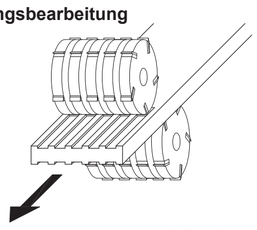
Herstellungsprozess der Lufteinschlüsse

Einerseits können **Längsfräsungen** an der Brettoberfläche Lufteinschlüsse erzeugen, andererseits können Hohlräume durch das Einfräsen von Schlitzen in die Brettseite hergestellt werden (**Querfräsungen**). Die Brettoberfläche bleibt somit erhalten, wodurch auch verleimtes Brettsperrholz mit einem relativ großen Anteil an Lufteinschlüssen erzeugt werden kann. Für schmale, tiefe Längsfräsungen sind Mehrblatt-Kreissägemaschinen denkbar, und breite, wenig tiefe Fräsungen könnten mittels Nutmesserköpfen oder profilierten Hobelmesserköpfen hergestellt werden. Für Querfräsungen weist die Kettenschlitzfräse die meisten Vorteile auf.

Werkzeugaufsätze für Quer- bzw. Längsbearbeitung

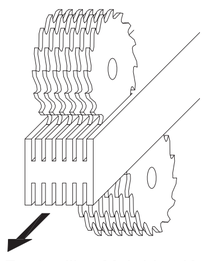


Kettenschlitzfräsen



Hobelmesserkopf mit Profileinsatz

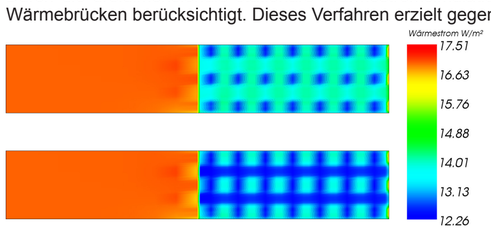
Nutmesserkopf



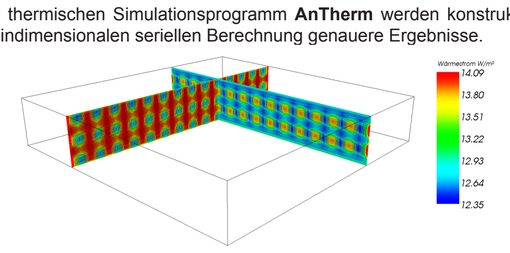
Zweiwellige Mehrblatt-Kreissäge

Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit

Dreidimensionale numerische Berechnung
Durch die dreidimensionale stationäre Wärmestromsimulation mit dem thermischen Simulationsprogramm **AnTherm** werden konstruktionsbedingte Wärmebrücken berücksichtigt. Dieses Verfahren erzielt gegenüber der eindimensionalen seriellen Berechnung genauere Ergebnisse.



Wärmestrombild von BSP ohne und mit Lufteinschlüssen



3d-Wärmestrombild von BSP mit Lufteinschlüssen

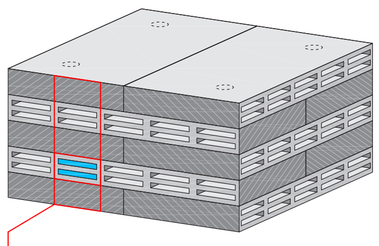
Eindimensionale serielle Berechnung
Durch Analyse des Einflusses der Wärmebrücken auf das Rechenergebnis zeigte sich, dass die eindimensionale serielle Berechnung (beim Material Holz) eine gute Annäherung zum Ergebnis der dreidimensional numerischen Berechnung bringt. Diese Methode kann also zur annäherungsweisen Berechnung verwendet werden (Abweichung 1 bis 2 Prozent).

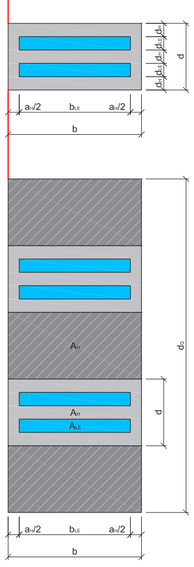
Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Holz mit Lufteinschluss-Anteil

$$\lambda_{H+LE} = \frac{1}{\frac{H\%}{\lambda_H} + \frac{LE\%}{\lambda_{LE}}}$$

λ_{H+LE} .... äqu. Wärmeleitfähigkeit von Holz mit Luftschicht-Anteil [W/mK]
λ_H ..... Wärmeleitfähigkeit von Holz [W/mK]
λ_{LE} ..... äqu. Wärmeleitfähigkeit des Lufteinschlusses (Luftschicht oder Lufthohlraum) [W/mK]
H%..... Holz-Anteil [%]
LE%.... Lufteinschluss-Anteil [%]

Berechnungsbeispiel: Brettsperrholz aus quergefrästen Brettlagen





Äquivalente Wärmeleitfähigkeit und U-Wert von Brettsperrholz aus quergefrästen Brettlagen

zu definierende Parameter			
d_{LE} =	6	[mm]	Dicke* des Lufteinschlusses
b_{LE} =	50	[mm]	Breite des Lufteinschlusses
n_{LE} =	2	[-]	Anzahl der Lufteinschluss-Schichten pro Brett
d_H =	6	[mm]	Dicke* des Holzes zwischen den Lufteinschlüssen bzw. der Oberfläche
a_H =	11	[mm]	Abstand des Holzes zwischen den Lufteinschlüssen
n_B =	5	[-]	Anzahl der Brettschichten mit Lufteinschlüssen (ungerade)
d_{OB} =	0	[mm]	wenn vorhanden: Dicke der äußersten Brettlage (ohne Lufteinschlüsse)
λ_H =	0,1	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Holzes
R_i =	0,13	[m²K/W]	innerer Wärmeübergangswiderstand
R_a =	0,04	[m²K/W]	äußerer Wärmeübergangswiderstand
Ergebnisse - Geometrie			
d =	30	[mm]	Dicke* des Brettes
b =	61	[mm]	Breite des Ausschnittes
d_0 =	150	[mm]	Dicke* des gesamten Bauteils
A =	9150	[mm²]	Fläche des (großen) Ausschnittes
A_{LE} =	3000	[mm²]	Fläche der Lufteinschlüsse im (großen) Ausschnitt
A_H =	6150	[mm²]	Fläche des Holzes im (großen) Ausschnitt
LE-Anteil =	32,8	[%]	Anteil der Lufteinschlüsse
H-Anteil =	67,2	[%]	Anteil des Holzes
Ergebnisse - Wärmeleitfähigkeit			
b_{LE}/d_{LE} =	8,3	[-]	Proportion $b_{LE}/d_{LE} \leq 10$: Berechnung als Lufthohlraum, > 10: Berechnung als Luftschicht
λ_{LE} =	0,0488	[W/mK]	äqu. Wärmeleitfähigkeit des Lufthohlraumes oder der Luftschicht
λ_{H+LE} =	0,0744	[W/mK]	äqu. Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit Lufteinschlüssen
Diff. (zu λ_H) =	-25,6	[%]	Verbesserung der äqu. Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit Lufteinschlüssen
Ergebnisse - U-Wert			
R_{H+LE} =	2,0150	[m²K/W]	Wärmedurchgangswiderstand des Holzes mit Lufteinschlüssen
U_{H+LE} =	0,4577	[W/m²K]	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Holzes mit Lufteinschlüssen
U_H =	0,5988	[W/m²K]	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Holzes
Diff. (zu U_H) =	-23,6	[%]	Verbesserung des U-Wertes von Holz mit Lufteinschlüssen

Anmerkungen:
* Der Parameter "Dicke" bezieht sich jeweils auf die Abmessung in Wärmestromrichtung.
Farbe orange: Berechnung von λ_{LE} als Lufthohlraum ($b_{LE}/d_{LE} \leq 10$)
Farbe blau: Berechnung von λ_{LE} als Luftschicht ($b_{LE}/d_{LE} > 10$)

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von BSP(LE) λ_{H+LE} [W/mK] in Abhängigkeit der LE-Dicke und der Dicke des Holzes zw. LE

b_{LE} = 50 [mm] a_H = 11 [mm] n_{LE} = 2 [-]
n_B = 5 [-] d_{OB} = 0 [mm]

d_{LE} [mm]	d_H [mm] 3	4	5	6	7	8	9	10
3	0,0648	0,0688	0,0720	0,0747	0,0768	0,0786	0,0802	0,0815
4	0,0651	0,0687	0,0716	0,0741	0,0761	0,0778	0,0793	0,0807
5	0,0655	0,0688	0,0714	0,0737	0,0756	0,0773	0,0787	0,0800
6	0,0671	0,0700	0,0724	0,0744	0,0762	0,0778	0,0791	0,0803
7	0,0690	0,0715	0,0737	0,0756	0,0772	0,0786	0,0798	0,0810

Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit (Differenz zu λ_H) [%]

d_{LE} [mm]	d_H [mm] 3	4	5	6	7	8	9	10
3	-35,2	-31,2	-28,0	-25,3	-23,2	-21,4	-19,8	-18,5
4	-34,9	-31,3	-28,4	-25,9	-23,9	-22,2	-20,7	-19,3
5	-34,5	-31,2	-28,6	-26,3	-24,4	-22,7	-21,3	-20,0
6	-32,9	-30,0	-27,6	-25,6	-23,8	-22,2	-20,9	-19,7
7	-31,0	-28,5	-26,3	-24,4	-22,8	-21,4	-20,2	-19,0

Anteil der Lufteinschlüsse [%]

d_{LE} [mm]	d_H [mm] 3	4	5	6	7	8	9	10
3	32,8	27,3	23,4	20,5	18,2	16,4	14,9	13,7
4	38,6	32,8	28,5	25,2	22,6	20,5	18,7	17,3
5	43,1	37,3	32,8	29,3	26,4	24,1	22,2	20,5
6	46,8	41,0	36,4	32,8	29,8	27,3	25,2	23,4
7	49,9	44,1	39,6	35,9	32,8	30,2	28,0	26,1

Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von BSP(LE) λ_{H+LE} [W/mK] in Abhängigkeit der LE-Dicke und der LE-Breite

d_H = 6 [mm] a_H = 11 [mm] n_{LE} = 2 [-]
n_B = 5 [-] d_{OB} = 0 [mm]

d_{LE} [mm]	b_{LE} [mm] 40	50	60	70	80	90	100	110
3	0,0755	0,0747	0,0741	0,0736	0,0733	0,0730	0,0728	0,0726
4	0,0743	0,0741	0,0735	0,0730	0,0727	0,0724	0,0722	0,0720
5	0,0744	0,0737	0,0739	0,0735	0,0731	0,0729	0,0726	0,0725
6	0,0750	0,0744	0,0740	0,0745	0,0742	0,0739	0,0737	0,0735
7	0,0760	0,0756	0,0752	0,0750	0,0757	0,0754	0,0752	0,0751

Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit (Differenz zu λ_H) [%]

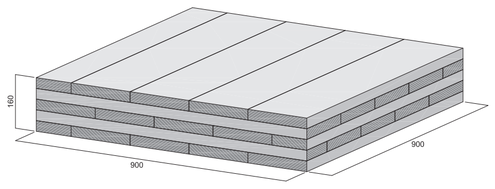
d_{LE} [mm]	b_{LE} [mm] 40	50	60	70	80	90	100	110
3	-24,5	-25,3	-25,9	-26,4	-26,7	-27,0	-27,2	-27,4
4	-25,7	-25,9	-26,5	-27,0	-27,3	-27,6	-27,8	-28,0
5	-25,6	-26,3	-26,1	-26,5	-26,9	-27,1	-27,4	-27,5
6	-25,0	-25,6	-26,0	-25,5	-25,8	-26,1	-26,3	-26,5
7	-24,0	-24,4	-24,8	-25,0	-24,3	-24,6	-24,8	-24,9

Anteil der Lufteinschlüsse [%]

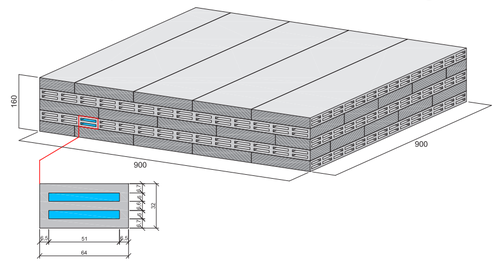
d_{LE} [mm]	b_{LE} [mm] 40	50	60	70	80	90	100	110
3	19,6	20,5	21,1	21,6	22,0	22,3	22,5	22,7
4	24,1	25,2	26,0	26,6	27,0	27,4	27,7	28,0
5	28,0	29,3	30,2	30,9	31,4	31,8	32,2	32,5
6	31,4	32,8	33,8	34,6	35,2	35,6	36,0	36,4
7	34,3	35,9	37,0	37,8	38,5	39,0	39,4	39,8

Herstellung und Eigenschaften der Prüfkörper(paare)

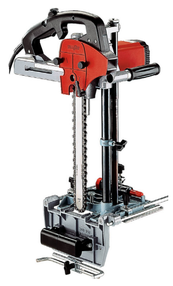
Zur Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften mit dem Heizkasten mit Wärmestrommesser wurden 3 Prüfkörper mit und 3 Prüfkörper ohne Lufthohlräume hergestellt. Um möglichst gleiche Holzeigenschaften zu erzielen, wurde ein Prüfkörperpaar (1x Vollholz, 1x mit Lufteinschlüssen) jeweils aus den selben Brettern hergestellt. Folgend werden die Parameter der Prüfkörper und die Arbeitschritte der Herstellung kurz aufgelistet.



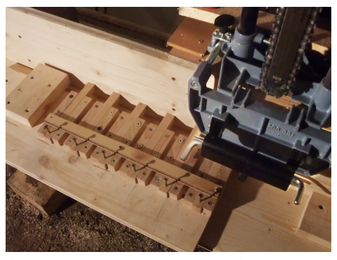
3 x Brettsperrholz VH (ohne Lufthohlräume)



3 x Brettsperrholz LHR (mit quergefr. Lufthohlräumen)



- Holzware: Fichte, Seitenware, Qualität B/C, Dicke: 32 mm, Breite: ca. 196 mm
- Fräsung: Schlitzgerät SG 230 bzw. Kettenstemmer LS 103 Ec (Fa. Mafell)
- Verleimung: flächig (ohne Schmalseiten-Verleimung), PVAC, Weißleim, D3, hydraulische Flächenpresse
- Abmessung: 90 / 90 / 16 cm, Rohdichte: ca. 455 kg/m³, Holzfeuchte: 12,1 - 13,0 % (ohne LHR) / 9,2 -10,2 % (mit LHR)



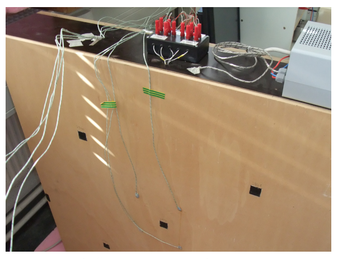
Schablone und Kettenschlitzfräse

Prüfkörper

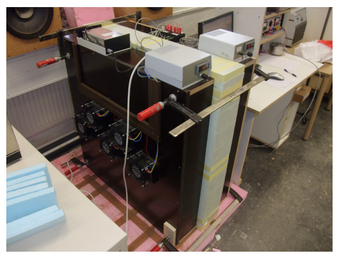
Prüfkörper (Seitenansicht)

Labortechnische Prüfung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Heizkasten

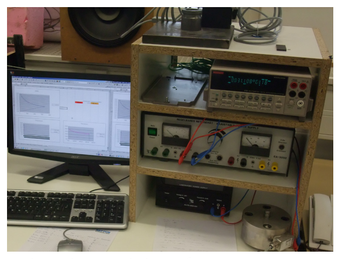
Zur Überprüfung der Berechnung des thermischen Verhaltens wurde eine labortechnische Messung der Wärmeleitfähigkeit an einer Bauteilvariante durchgeführt. Als Konstruktionsvariante wurde 5-lagiges Brettsperrholz mit quergefrästen Lufteinschlüssen gewählt. Laut Berechnung sollte sich die Wärmeleitfähigkeit (je nach angenommener Wärmeleitfähigkeit des Holzes) um ca. -19,2 und -22,5 % verringern. Die Differenz der gemessenen Werte betrug im Mittel -18,6 %. Der Vergleich zeigt, dass die Berechnung eine relativ gute Annäherung an die gemessenen Werte bringt, jedoch eine geringfügig niedrigere Wärmeleitfähigkeit der Platten mit Hohlräumen erwarten lässt.



„Warmseite“ des Heizkastens



Heizkasten mit Wärmestrommesser in Betrieb



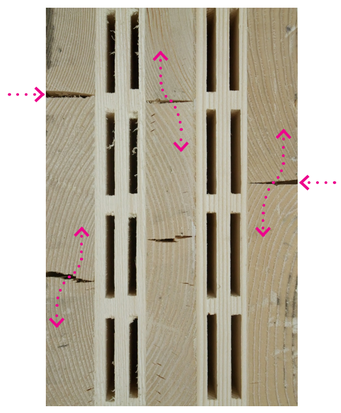
Automatische Datenerfassung

Wärmeleitfähigkeit der Prüfkörper ohne und mit Hohlräumen laut Berechnung und Messung

Wärmeleitfähigkeit der Prüfkörper	λ_H [W/mK]	λ_{H+LHR} [W/mK]	Diff. (zu λ_H) [%]
Berechnung mit AnTherm			
Var. 1 (λ_H = 0,10 W/mK)	0,1000	0,07745	-22,5
Var. 1 (λ_H = 0,09 W/mK)	0,0900	0,07275	-19,2
Messung im Heizkasten			
Prüfkörperpaar Nr. 1 (24 h)	0,1013*	0,0817*	-19,3
Prüfkörperpaar Nr. 2 (72 h)	0,0956**	0,0783**	-18,1
Prüfkörperpaar Nr. 3 (72 h)	0,0893**	0,0730**	-18,3

Anmerkung: * Mittelwerte der letzten 2 h Messdauer, ** Mittelwerte der letzten 6 h Messdauer.

Mögliche Ursachen für die Abweichung zwischen Berechnung und labortechnischer Messung
- Berechnung beruht teilweise auf normierten Werten (Abweichung von der Realität)
- Messung mit dem Heizkasten ungenau
- Anisotropie und Heterogenität des Holzes
- fehlende Verleimung der Brettseiten ermöglicht den Luftaustausch zwischen den Hohlräumen
- ausfallende Äste ermöglichen den Luftaustausch zwischen den Hohlräumen



Ökologische und ökonomische Aspekte

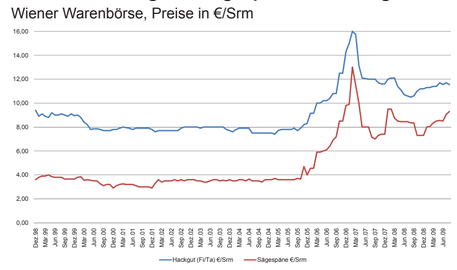
Neben einer besseren Wärmedämmung verursachen die gefrästen Hohlräume einen vermehrten Anfall an Sägespäne, die als Kuppelprodukt zur weiteren Verarbeitung dienen. Da um Sägespäne eine starke Konkurrenzsituation zwischen der aufstrebenden Pelletsindustrie und der Holzwerkstoffindustrie herrscht, sind die Preise für Sägespäne seit einigen Jahren relativ hoch und im Steigen begriffen. Durch eine Stoffflussanalyse konnte berechnet werden, dass der **Mehrwert der anfallenden Sägespäne derzeit 2 - 3 % des durchschnittlichen Preises von Brettsperrholz** betragen würde. Der zur Herstellung notwendige zusätzliche Maschinenaufwand bleibt natürlich zu beachten.

Pluspunkte
- Höhere Wärmedämmung bei gleicher Dicke (od. geringere Dicke bei gleicher WD)
- geringerer Holzverbrauch
- Sägespäne fallen vermehrt an (+ 0,9-1,2 Srm/m³ BSP)
- leichteres Produkt (Transport, Montage)
- technische Trocknung von Holz mit Hohlräumen könnte Energie sparen

Minuspunkt
- aufwändigere Herstellung

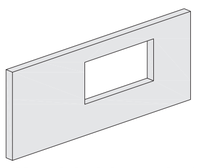
Preisentwicklung Sägespäne
- Preissteigerung ab Mitte 2006
- Konkurrenzsituation Holzwerkstoffindustrie - Pelletsindustrie
- bei Rundholz ist kein Aufwärtstrend ersichtlich

Preisentwicklung von Sägespäne und Hackgut
Wiener Warenbörse, Preise in €/Srm

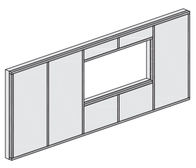


Bausysteme zur konstruktiven Anwendung

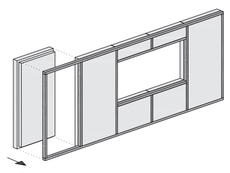
Für die konstruktive Anwendung der entwickelten Bauteile in einem - oder als Holzbausystem wurden mehrere Möglichkeiten skizziert. Bei genügender Tragfestigkeit können sie als (großflächige) Wandelemente hergestellt bzw. montiert werden. Sollte die **Tragfestigkeit in Folge der Hohlräume** zu stark sinken, könnten integrierte Vollholzprofile die vertikale Lastabtragung übernehmen, während die Massivholzplatten mit Lufteinschlüssen die Aufgabe der Aussteifung übernehmen. Unterschiedliche Vorfertigungsgrade und Elementgrößen sind möglich.



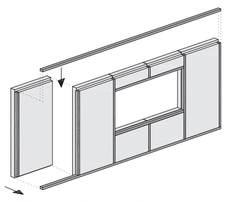
„Massivholzbauweise“
Großflächiges Wandelement



„Tafelbauweise“
Großflächiges Wandelement mit integriertem lastabtr. Rahmen



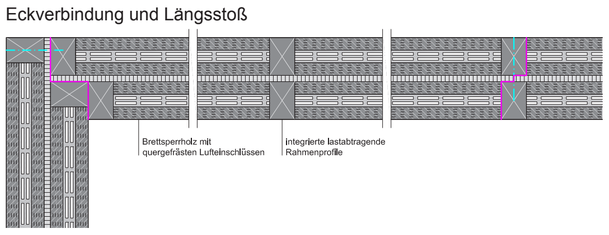
„Skelettbauweise“
Kleinflächige Wandelemente als aussteifende Füllung



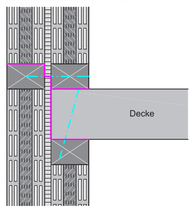
„Elementbauweise“
Kleinflächige WE mit intergr. lastabtr. Profilen zw. Ober- und Untergurt

Beispiel: „Tafelbauweise“
Großflächiges Wandelement mit integriertem lastabtragenden Rahmen / Brettsperrholz (LE) mit mittiger Dreischichtplatte, Rahmenprofil beidseitig

Eckverbindung und Längsstoß



Deckenanschluss



Elementaufbau (Dicke: 200 mm)

90 mm Rahmenprofil (lastabtragend)
BSP mit quergefrästen Lufteinschlüssen
(3-lagig, verleimt oder verdübelt)
20 mm Dreischichtplatte
90 mm BSP mit quergefrästen Lufteinschlüssen
(3-lagig, verleimt oder verdübelt)

Die mittig liegende Dreischichtplatte erfüllt die Funktion der Winddichtung (falls erforderlich).

Bernhard Brigola I Matr. Nr.: 0025456 I Email: bernhardbrigola@gmx.at I Tel: 0650 6177177 **Betreuung:** O.Univ.Prof. DDI Wolfgang Winter I Ao.Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Klaus Krec