Schlussbericht

zum Forschungsvorhaben

Verbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände

gefördert durch das

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA)

über die

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und den internationalen Verein für Technische Holzfragen (iVTH)

Durchführende Stellen:

Forschungsstelle 1

Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) Bienroder Weg 54 E 38108 Braunschweig

Forschungsstelle 2

Technische Universität Braunschweig Institut für Baukonstruktion und Holzbau Schleinitzstraße 21a 38106 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen		4
2. Stand der Technik		
3. Problemstellung und Zielset	zung	5
4. Anforderungen an den Verl	bundquerschnitt	7
4.1 Anforderungen an die 1	Fragfähigkeit	7
4.2 Anforderungen an das	hygro-thermische Verhalten	8
4.3 Anforderungen an die F	Fertigungstechnik	9
5. Materialien und Prüfkörper		
5.1 Materialien		
5.1.1 Deckschichten		
OSB		
Gipsfaserplatten		
5.1.2 Kern		
Holzfaserdämmplatter	1	
Wabenkarton		
Wellpappe		
5.1.3 Verbindungsmittel		
Kleber		
Klammern		
5.1.4 Randabschluss		
5.2 Prüfkörper		
5.2.1 Untersuchungen ar	n kleinen Prüfkörpern	
5.2.1.1 Untersuchunge	en am Verbundguerschnitt	
Biegeversuche	'	
Schubversuche		
Zua- und Druckversuc	he	
5.2.1.2 Untersuchung	en am Randabschluss	
5.2.2 Untersuchungen ar	n großen Prüfkörpern	
5.2.2.1 Schubversuche	e (Horizontallasten)	
5.2.2.2 Druckversuche	(Vertikallasten)	
5.2.2.3 Hyaro-thermis	che Versuche	
6. Methoden		
6.1 Analytische Methoden.		
6.2 Experimentelle Untersu	chungen	
6.2.1 Untersuchungen ar	kleinen Prüfkörpern	
6.2.1.1 Untersuchunge	en am Verbundguerschnitt	
Biegeversuche	'	
Schubversuche		
Zug- und Druckversucl	ne	
6.2.1.2 Untersuchung	en am Randabschluss	
6.2.2 Untersuchungen ar	n großen Prüfkörpern	
6.2.2.1 Schubversuche	e (Horizontallasten)	
6.2.2.2 Druckversuche	(Vertikallasten)	
6.2.2.3 Hygro-thermis	che Untersuchungen	
Verformungen im Diff	erenzklima	
Temperaturverhalten		
7. Ergebnisse	·····	
7.1 analytische Untersuchur	naen	
7.1.1 Beanspruchung du	rch Längskräfte und Plattenbiegung	
7.1.1.1 Steifiakeitswer	te und Beanspruchungen der Bauteile	27
7.1.1.2 Nachweis für F	Plattenbiegung	
	0 0	

7.1.1.3 Druckkragtahigkeit von Verbundwänden. 3 7.1.2 Beanspruchung durch Horizontalkräfte in Tafelebene. 3 7.1.3 Verbindung des Randabschlusses mit den Deckschichten 3 7.1.3.1 Schubkrafte in Wandebene 3 7.1.3.1 Schubkrafte in Wandebene 3 7.1.3.2 Schubkrafte senkrecht zur Wandebene 3 7.1.3.3 Druckkrafte. 3 7.1.4.4 Auflagerdreihwinkel der Decken 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen aus Feuchtedlfferenzen 4 Vilade ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedlfferenzen 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Kelnen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertik		7 1 1 2 Nachwois für Druckkräfte	20
7.1 2 Beanspruchung durch Horizontalkräfte in Tafelebene 3 7.1.3 Verbindung des Randabschlusses mit den Deckschichten 3 7.1.3.1 Schubkräfte in Wandebene 3 7.1.3.2 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene 3 7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.3.4 Körner 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.6 Wände mit Offfungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am kleinen Prüfkorpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am kleinen Prüfkorpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.4 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2		7.1.1.3 Nachweis für Druckstafte	.29
7.1.3 Verbindung des Randabschlusses mit den Deckschichten 3 7.1.3.1 Schubkräfte in Wandebene 3 7.1.3.2 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene 3 7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.4 Auflagerdrehwinkel der Decken 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.6 Wande mit Offnungen 4 7.1.7 Uberlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Fürzellasten 4 Vande ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 Vande ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 7.2.1 Zergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6		7.1.7.4 Drucktragrangkeit von verbundwanden	.30
7.1.3.1 Schubkräfte in Wandebene 3 7.1.3.2 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene 3 7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.4 Auflagerdrehwinkel der Decken 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.6 Wände mit Öffnungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Allgemeines 4 Vände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Durtersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Durtersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.4 Ergebnisse der Durtersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.2 Ergebnisse der Schubversuc		7.1.3 Verhindung des Randahschlusses mit den Deckschichten	. JZ 3/
7.1.3.2 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene. 3 7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.4 Auflagerdrehwinkel der Decken. 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.5 Wande mit Öffnungen 4 Allgemeines. 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 Vande ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen an kleinen Prüfkorpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.3.4 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen <t< td=""><td></td><td>7.1.3 1 Schubkräfte in Wandebene</td><td>. J4 2/</td></t<>		7.1.3 1 Schubkräfte in Wandebene	. J4 2/
7.1.3.3 Druckkräfte 3 7.1.4 Auflagerdrehwinkel der Decken 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.6 Wande mit Offnungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 Vände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 Vande ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedlfferenzen 4 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an Kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Siegeversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 </td <td></td> <td>7.1.3.1 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene</td> <td>.54 27</td>		7.1.3.1 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene	.54 27
7.1.4 Auflägerdrehvinkel der Decken. 3 7.1.5 Konsollasten 4 7.1.5 Wande mit Öffnungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines. 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Schubversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Subversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Subversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Tergebnisse der Nutversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Subversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Subversuche (Vertikallasten) 6 7.2.3 Ergebnisse der Subversuche (Verti		7.1.3.2 Schubklarte schkrecht zur Wahdebene	25
7. 1.5 Konsollasten 4 7. 1.5 Konsollasten 4 7. 1.6 Wande mit Offnungen 4 7. 1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Einzellasten 4 Vände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 Vande ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 8 Vergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Nagro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.6 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6		7.1.3.3 Didekkrate	.33 20
7.1.6 Wände mit Offnungen 4 7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.5 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.6 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.7 Erge		7 1 5 Konsollasten	.J7
7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen 4 Allgemeines 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Biegeversuche 5 Schubversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Prüfkörpern 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 9. Verfermungen an die Fertigungstechnik 6 9. 1.1 Anford		7.1.6 Wände mit Öffnungen	43
Allgemeines 4 Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1 8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Siegeversuche 5 Schubversuche 5 7.2.1 2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2 1 Zegebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 8. Vergleich Anforderungen an die Tragfähigkeit 6 8. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.		7 1 7 Überlagerung von Beanspruchungen	43
Einzellasten 4 Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 8. Vergleich Anforderungen an die Baustoffe 6 9. Weiterreichende Ekenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessun		Allgemeines	43
Winde ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe 4 7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Schubversuche (Vortikallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.5 Ergebnisse der Brückversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.6 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnises der Brückversuche (Vertikallasten) 6 <		Finzellasten	43
7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen 4 7.2 Experimentelle Untersuchungen 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Biegeversuche 5 Schubversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Prückversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Prückversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.4 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderungen an die Tragfähigkeit 6 8. Vergleich Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. 1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9. 1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9. 1.3 Anforderungen an		Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe	44
7.2 Experimentelle Untersuchungen 5 7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Biegeversuche 5 Schubversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Nygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 Anforderungen an die Tragfähigkeit 6 8. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 9.1.1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 6 1.1 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 <td></td> <td>7 1 8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen</td> <td>47</td>		7 1 8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen	47
7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern 5 7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Biegeversuche 5 Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen. 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 8. Vergleich Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 9.1.1 Anforderungen an die Beutsoffe 9. 1.1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementa		7 2 Experimentelle Untersuchungen	51
7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt 5 Biegeversuche 5 Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Prüfkörpern 5 7.2.2.3 Ergebnisse der Prüfkörpern 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Prüfkörpern 6 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Prüfkörpern 6 7.2.2.4 Ergebnisse der Prüfkörpern 6 7.2.2.5 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 <		7.2.1 Fraebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern	.51
Biegeversuche 5 Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9.1.1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.2 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7		7.2.1.1 Fraebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt	.51
Schubversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Druckversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung		Biegeversuche	.52
Zug- und Druckversuche 5 7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 5 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 </td <td></td> <td>Schubversuche</td> <td>.54</td>		Schubversuche	.54
7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss 5 7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der Schubversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 8. Vergleich Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 6 9.1.1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.2 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebe		Zua- und Druckversuche	.54
7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern 5 7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 Anforderungen an die Fartigungstechnik 6 9.1 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an den Kleber 6 9.1.3 Anforderungen an der Fertigungstechnik 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementferti		7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss	.55
7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten) 5 7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen 6 Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9. 1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.4 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 7 7 7 10. Veröffentlichungen 7 7 </td <td></td> <td>7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern</td> <td>.57</td>		7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern	.57
7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten) 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen. 6 7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen. 6 Verformungen im Differenzklima. 6 Temperaturverhalten. 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 71. Veröffentlichungen 7 72.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 <t< td=""><td></td><td>7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten)</td><td>.57</td></t<>		7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten)	.57
7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen. 6 Verformungen im Differenzklima. 6 Temperaturverhalten. 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 Anforderung an die Tragfähigkeit. 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe. 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen. 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung. 7		7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten)	.60
Verformungen im Differenzklima 6 Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 7 2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 7 72.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 7 7 7 10. Veröffentlichungen 7 7		7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen	.62
Temperaturverhalten 6 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse. 6 Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick 6 6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 71. Förderung 7 72.1 Literatur 7 73. Zusammenfassung 7		Verformungen im Differenzklima	.62
 8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse		Temperaturverhalten	.64
Anforderung an die Tragfähigkeit 6 Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick .6 6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.2 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.3 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12. Literatur 7 13. Zusammenfassung 7	8.	Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse	.67
Bauphysikalische Anforderungen 6 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick.6 6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2.1 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12. Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		Anforderung an die Tragfähigkeit	.67
Anforderungen an die Fertigungstechnik 66 9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick. 67 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 67 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 68 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 68 9.1.3 Anforderungen an die Deckschichten 66 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 67 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 77 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 77 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 77 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 77 71. Förderung 77 72.1 Literatur 77 73. Zusammenfassung 77		Bauphysikalische Anforderungen	.67
9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick.6 9.1 Anforderungen an die Baustoffe 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an den Kleber 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zu		Anforderungen an die Fertigungstechnik	.67
9.1 Anforderungen an die Baustoffe 6 9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12. Literatur 7 13. Zusammenfassung 7	9.	Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick	.68
9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht) 6 9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an den Kleber 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12. Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.1 Anforderungen an die Baustoffe	.68
9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten 6 9.1.3 Anforderungen an den Kleber 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht)	.68
9.1.3 Anforderungen an den Kleber 6 9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten	.68
9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik 6 9.2 Möglichkeiten der Nutzung. 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den 7 Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie. 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.1.3 Anforderungen an den Kleber	.69
9.2 Möglichkeiten der Nutzung. 7 9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel. 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie. 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik	.69
9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.2 Möglichkeiten der Nutzung	.70
Handel 7 9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb über den	
9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie 7 9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen 7 9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte 7 10. Veröffentlichungen 7 11. Förderung 7 12 Literatur 7 13. Zusammenfassung 7		Handel	.70
9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen		9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie	.70
9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte		9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen	.71
10. Veröffentlichungen		9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte	.71
11. Förderung	10	Veröffentlichungen	.72
12 Literatur	11	. Förderung	.73
13. Zusammentassung7	12	Literatur	.73
	13	. Zusammentassung	.74

1. Vorbemerkungen

Der Anteil an Holzgebäuden ist in Deutschland im Gegensatz zu Nordamerika oder Skandinavien trotz technologischer und ökologischer Vorteile gering. Dabei kann durch elementierte Konstruktionen mit einem hohen Anteil an Holz bzw. Holzwerkstoffen ein hoher Vorfertigungsgrad erreicht werden, der ein kostengünstiges und umweltverträgliches Bauen ermöglicht und darüber hinaus die Bewirtschaftung der heimischen Wälder fördert. Zusätzlich haben Holzwerkstoffe im Vergleich zu Vollholz nicht die Nachteile anisotroper inhomogener Materialeigenschaften. Weitere Vorteile weisen Holzwerkstoffe durch die mögliche Herstellung aus Recyclingmaterial oder Produktionsresten auf. Holzwerkstoffe sind nach einer Nutzung unter Beachtung des Standes der Technik problemlos stofflich oder energetisch zu verwerten.

2. Stand der Technik

Die elementierte Bauart wird bei Holzkonstruktionen von zwei Systemen geprägt, der Holztafelbauart und der Skelettbauart. Die ältere Bauart ist die Skelettbauart, deren Ursprung noch im Vorläufer des Fachwerkbaus, dem Ständerbau zu finden ist. Bei der Skelettbauart werden die vertikalen Lasten über geschossübergreifende Stützen abgetragen. Zur Gebäudeaussteifung gegenüber horizontalen Lasten dienen vorrangig Streben oder Zugbänder in den Wänden. Es werden zwar zum Teil Holzwerkstoffplatten einoder beidseitig auf den Skelettbauwänden montiert, sie werden aber meistens nicht rechnerisch beim Nachweis der Aussteifung des Gebäudes berücksichtigt.

Hierin liegt der wesentliche Unterschied gegenüber der Holztafelbauart. Bei der Holztafelbauart wirken die Beplankungen mit Holzwerkstoffplatten, aber auch andere Platten wie Gipsfaser- oder Gipskartonplatten, bei der Lastabtragung mit. Sie werden sowohl rechnerisch bei der Aussteifung gegenüber horizontalen Lasten als auch bei der Lastabtragung der vertikalen Lasten berücksichtigt. Dadurch ist es möglich, für die Rippen Hölzer mit geringeren Querschnittsflächen als bei der Skelettbauart einzusetzen. Die Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Holztafelelementes mit der Beschreibung der Funktionen einzelnen Komponenten anhand einer Ansichtsskizze mit einem Horizontalschnitt.

Holztafelwände werden geschossweise montiert. Nachteilig ist bei der Holztafelbauart der geringe und aus einer Vielzahl von Gründen nahezu starr festgelegte Rippenabstand von 0,625 m. Dadurch müssen für die Herstellung einer großen Wandfläche viele Einzelbauteile zusammengefügt werden. Diesem Nachteil wird bei der Holztafelbauart durch einen hohen Vorfertigungsgrad entgegengewirkt, der deutlich höher ist als bei der Skelettbauart. Zusammengefasst liegen die Vorteile bei der Skelettbauart in einer flexibleren Planung unter Verwendung weniger Einzelbauteile und bei der Holztafelbauart in einer statischen Mitwirkung aller Einzelbauteile sowie einem hohen Vorfertigungsgrad. Beide Bauarten benutzen zur Herstellung des Holzskeletts beim Skelettbau und der Rippen beim Holztafelbau in der Regel Vollholz. Die flächigen Wandabschlüsse bestehen bei beiden Bauarten aus Holzwerkstoffplatten



Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau eines Holztafelelementes mit Funktionsbeschreibung der Einzelkomponenten (Ansichtsskizze mit Horizontalschnitt)

In Deutschland ist die Holztafelbauart mit Abstand weiter verbreitet als der Skelettbau. Den Holztafelbau wenden nicht nur Fertighausunternehmen mit einem hohen Vorfertigungsgrad sondern auch zunehmend mittelständische Zimmereibetriebe an, die aus Wettbewerbsgründen einem steigenden Rationalisierungsdruck unterliegen.

3. Problemstellung und Zielsetzung

Problemstellung

Eine herkömmliche Holztafelwand wird aus zahlreichen Baustoffen, z. B. Vollholz, Holzwerkstoffe, Dämmstoffe oder Kunststofffolien, die jeweils spezielle Funktionen besitzen, mit unterschiedlichen Fügetechniken hergestellt. Die Vielzahl von Baustoffen und Verbindungen führt zu einem hohen Aufwand bei der Herstellung und beim Materialverbrauch. Jedes Material erfüllt nur eine spezielle Aufgabe, somit ist die gesamte Wand in viele einzelne Funktionsebenen aufgeteilt. Die materialspezifischen Funktionen können nicht auf andere Materialien verteilt werden und dadurch gegebenenfalls zu einem optimierten Materialverbrauch führen. Ein weiterer Nachteil der Materialdiversifizierung liegt in einer aufwendigen Entsorgung nach der Nutzung. Dabei ist für die Zukunft nicht auszuschließen, dass die Anforderungen und Auflagen an eine Entsorgung steigen werden, z. B. beim Rückbau von Gebäuden.

Verbundquerschnitte aus ähnlichen Basisrohstoffen, die aufgrund des Verbundes gemeinsam an der Tragwirkung beteiligt sind, führen zu einem verringerten Materialverbrauch. Ein Verbundquerschnitt, insbesondere aus Holzwerkstoffen, verhält sich jedoch inneren Spannungen, z. B. infolge hygrisch bedingten Verformungen, nicht unproblematisch. Daher muss die Verbundwirkung der einzelnen Materialien in der Art ausgeführt sein, dass keine Schäden aus Verformungen auftreten.

Zielsetzung

Das Projektziel war die Entwicklung von modularen Verbundelementen, z. B. aus einem Kern mit statischen und wärmeschutztechnischen Aufgaben und Außenschichten mit tragenden und feuchteschutztechnischen Aufgaben. Die Zuordnung einzelner Funktionen auf einzelne Bauteilschichten sollte aufgehoben werden. Eine Wärmedämmschicht im Kern sollte auch an der Tragwirkung beteiligt sein. Dabei sollte im Rahmen des geplanten Vorhabens zunächst ein Wandelement entwickelt werden, das statisch sowohl zur Abtragung vertikaler Lasten als auch zur Aussteifung gegenüber Horizontallasten wirkt sowie Einzelkräfte aus Konsollasten und Horizontalstoß aufnehmen kann.

Es wurde beabsichtigt, werkseitig ein möglichst großflächiges Element mit nur durch Transportbedingungen eingeschränkten Abmaßen herstellen zu können. Zur Herstellung der einzelnen Wände sollten diese großflächigen Elemente mit einfachen Sägetechniken mit den entsprechenden Abmessungen herstellbar sein. Es sollte gewissermaßen ein als Meterware herstellbares Wandelement entwickelt werden. Für die Schichten des Verbundguerschnitts sollten Holzwerkstoffe mit unterschiedlichen Partikelstrukturen, z. B. Fasern oder Späne, verschiedenen Bindemitteln, z. B. organischen und anorganischen, und variierten Rohdichten, z. B. mitteldichte Faserplatten und poröse Holzfaserplatten, variiert werden. Die Plattenwerkstoffe sollten nicht kleinflächig aus mehreren Teilen, sondern zur schnelleren Herstellung möglichst aus einem Stück hergestellt werden können. Dadurch würde als weiterer Vorteil eine Luftdichtheit der Umgebungshülle erreicht. Der Verbundguerschnitt sollte auch Hohlräume zur Aufnahme von haustechnischen Installationen und zur Materialeinsparung aufweisen können. Der Wandverbundguerschnitt sollte in der Art hergestellt werden können, dass Öffnungen für Fenster, Türen, Rollläden usw. leicht anzufertigen sind. Die Ränder an den Öffnungsleibungen sind wie die Ränder an den Außenkanten mit einem Randabschluss zu versehen.

Das Innovationspotenzial des geplanten Wandverbundquerschnitts liegt in einer großflächigen Herstellung von leicht zu bearbeitenden Wandelementen aus Holzwerkstoffen, bei denen der Materialeinsatz aufgrund der Geometrie und der Verteilung der statischen und bauphysikalischen Funktionen auf möglichst alle Schichten optimiert ist.

4. Anforderungen an den Verbundquerschnitt

4.1 Anforderungen an die Tragfähigkeit

Das Wandverbundelement soll als statisch wirksame Innen- und Außenwand im Holzhausbau verwendet werden können. Solche Wände werden vor allem durch

- Vertikallasten aus über den Wänden liegenden Bauteilen wie Decken, Dächern und weiteren Geschosswänden,
- Horizontallasten, z.B. aus Beanspruchung durch Wind, und
- Konsollasten z.B. aus Hängeschränken

beansprucht.

Alle äußeren Beanspruchungen verursachen Spannungen und Verformungen innerhalb des Wandelements und müssen vom Wandelement mit ausreichender Sicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit aufgenommen werden können.

Die für die Wand zulässigen vertikalen Lasten sollten größer als 20 kN, die zulässigen horizontalen Lasten größer als 5 kN pro Meter Wandlänge sein.

Die Höhe der für die Wand zulässigen Konsollasten ist an DIN 18183:1988-11 angelehnt und sollte mindestens 0,4 kN/m erreichen. Windstaudruck beansprucht die Wandelemente senkrecht zu Ihrer Ebene. Die Größe der Beanspruchung richtet sich unter anderem nach der Höhe des Gebäudes. Da die üblichen Wohngebäude in Holzbauart eine maximale Höhe unter 20 m aufweisen, ist der maximale Windstaudruck mit 0,8 kN/m² und der Kraftbeiwert für allseitig geschlossene prismatische Körper mit 1,3 angenommen worden. Tabelle 4.1 bietet eine Gegenüberstellung der geforderten statischen Eigenschaften sowie der Untersuchungsmethode im Rahmen des Projektes.

	Höhe der Beanspruchung	Methode der Untersuchung im Projekt
Einleitung vertikaler Lasten	20 kN/m	analytisch experimentell
Einleitung horizontaler Las- ten	5 kN/m	analytisch experimentell
Einleitung von Konsollasten	0,4 kN/m	analytisch
Einleitung von Lasten senk- recht zur Wandebene	1 kN/m ²	analytisch

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der geforderten statischen Eigenschaften sowie der Untersuchungsmethode im Rahmen des Projektes

4.2 Anforderungen an das hygro-thermische Verhalten

Da der geplante Wandverbundquerschnitt auch als Raumabschluss von unterschiedlich klimatisierten Räumen oder gegebenenfalls auch als Außenwand eingesetzt werden soll, durfte der zu entwickelnde Querschnitt sich nicht übermäßig infolge Klimadifferenzen zwischen den beiden Bauteiloberflächen verformen. Als Grenzwert wurde ein Stichmaß von ca. 3 mm bei einer raumhohen, also ca. 2,5 m, und ca. 8 cm dicken Wand definiert. Dieses Maß ist angelehnt an die Empfehlungen der DIN 18202 Toleranzen im Hochbau. Dort wird bei Wänden mit erhöhten Anforderungen ein Stichmaß von bis zu 8 mm bei einem Messpunktabstand von bis zu 400 cm als hinnehmbar definiert. In Tabelle 4.2 sind die Empfehlungen an die hinzunehmenden Ebenheitstoleranzen nach DIN 18202 : 1997-04 angegeben.

Spalte	1	2	3	4	5	6
70:10	Decug	Stichma	ß als Grenzmaß	in mm bei Mess	ounktabständen	in m bis
Zelle	Bezug	0,1	1	4	10	15
1	Nichtflächenfertige O- berseiten von Decken und Unterböden	10	15	20	25	30
2	Nichtflächenfertige O- berseiten von Decken und Unterböden mit erhöhten Anforderungen	5	8	12	15	20
3	Flächenfertige Böden zur Aufnahme von Bodenbe- lägen	2	4	10	12	15
4	Flächenfertige Böden zur Aufnahme von Bodenbe- lägen mit erhöhten An- forderungen	1	3	9	12	15
5	Nichtflächenfertige Wände	5	10	15	25	30
6	Flächenfertige Wände	3	5	10	20	25
7	Flächenfertige Wände mit erhöhten Anforde- rungen	2	3	8	15	20

Tabelle 4.2: Ebenheitstoleranzen

Die immer weiter steigenden Anforderungen an die Energieeinsparung von Gebäuden erfordern immer dickere Dämmschichten. Da der relativ hohe Anteil an Vollholz in einer herkömmlichen Holztafel eine Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften gegenüber dem reinen Dämmstoff bewirkt, kann davon ausgegangen werden, dass ein homogener Querschnitt bessere Eigenschaften hinsichtlich der Wärmedämmung aufweist. Dies hängt aber wesentlich von der Wärmeleitfähigkeit des Kerns ab, die aber in der Regel wiederum umgekehrt proportional, aber in keinem linearen Verhältnis, zur Festigkeit des Kerns ist. Hier musste ein Optimum an bisher auf dem Markt zur Verfügung stehenden Materialien gefunden werden. Der Verbundquerschnitt soll keine schlechteren Wärmedämmeigenschaften aufweisen als eine übliche Holztafelwand mit ca. 20 % Holzanteil und einer Wärmedämmung der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040, da dies den Stand der Technik weitestgehend darstellt. Somit sollte der Kern eine Wärmeleitfähigkeit von maximal 0,055 W/(mK) aufweisen. In weiteren Schritten kann eine Optimierung des Kerns hinsichtlich seiner Festigkeits- und Wärmedämmeigenschaften durchgeführt werden, was aber nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens war.

4.3 Anforderungen an die Fertigungstechnik

Es war beabsichtigt, werkseitig ein möglichst großflächiges Element mit nur durch Transportbedingungen eingeschränkten Abmaßen herstellen zu können. Zur Herstellung der einzelnen Wände sollen diese großflächigen Elemente mit einfachen Sägetechniken in den entsprechenden Abmessungen hergestellt werden. Es soll gewissermaßen ein als Meterware herstellbares Wandelement entwickelt werden.

5. Materialien und Prüfkörper

5.1 Materialien

Zu Beginn des Projektes wurde auf Grundlage vorhandener Informationen und Literaturquellen eine Vorauswahl für mögliche Beplankungswerkstoffe für die Deckschichten und Dämmstoffe für den Kern getroffen. Bei den Materialien, die aus dieser Vorauswahl hervorgingen, handelte es sich bei den Plattenwerkstoffen um Spanplatten, OSB, Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten und bei den Dämmstoffen für den Kern um Kork, Holzfaserdämmplatten, Pappwaben und Wellpappe. Für diese Materialien wurden die in der Literatur befindlichen Kennwerte erfasst. In der ersten Sitzung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe wurde eine Auswahl der Materialien getroffen mit denen die weiteren Untersuchungen fortgeführt wurden. Mit diesen ausgewählten und im Folgenden beschriebenen Materialien wurden die Untersuchungen in Laufe des Forschungsvorhabens durchgeführt.

Als Plattenmaterialien wurden OSB und Gipsfaserplatten, als Dämmstoffe für den Kern leichte und schwere Holzfaserdämmplatten, Pappwaben und Wellpappe festgelegt. Für die Verbindung zwischen Vollholz, Dämmstoff und Beplankung wurde die Verklebung mit einem PU-Kleber gewählt. Für die Verbindung der Deckschichten mit dem Randabschluss wurden als mechanische Verbindungsmittel zusätzlich Klammern ausgewählt.

5.1.1 Deckschichten

OSB

Bei den für die Deckschichten verwendeten Platten handelt es sich um OSB/3 mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Die Platten wurden in einem Paket direkt vom Hersteller ans WKI geliefert. Die Lagerung der Platten erfolgte in einer überdachten Lagerhalle. Vor dem Zuschnitt und dem Verbau der Platten wurde die Platten im Klima mit 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert.

Alle Platten waren 12 mm dick. Die Außenabmessungen in Länge und Breite der Platten betrugen 125 cm als Plattenbreite und 250 cm als Plattenlänge. Für kleinere Prüfkörper wurden die Platten unter Beachtung der Strandorientierung handwerklich zugeschnitten.

Gipsfaserplatten

Bei den für die Deckschichten verwendeten Platten handelt es sich um Gipsfaserplatten mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Die Platten wurden in einem Paket direkt vom Hersteller ans WKI geliefert. Die Lagerung der Platten erfolgte in einer überdachten Lagerhalle. Vor dem Zuschnitt und dem Verbau der Platten wurde die Platten im Klima mit 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert. Alle Platten waren 12,5 mm dick. Die Außenabmessungen in Länge und Breite der Platten betrugen 125 cm als Plattenbreite und 250 cm als Plattenlänge. Für kleinere Prüfkörper wurden die Platten handwerklich zugeschnitten.

5.1.2 Kern

Holzfaserdämmplatten

Bei den Holzfaserdämmplatten wurden zwei unterschiedliche Platten verwendet, die sich hauptsächlich durch Ihre Rohdichte unterschieden. Da mit Variation der Rohdichte auch eine Veränderung der mechanischen und bauphysikalischen Materialeigenschaften einhergeht sind in Tabelle 5.1 die wichtigsten Kennwerte nach Herstellerangaben aufgeführt. Die Platten wurden nach DIN 68755-1 Holzfaserdämmstoffe für das Bauwesen - Teil 1: Dämmstoffe für die Wärmedämmung, hergestellt. Die Plattendicke betrug jeweils 22 mm. Um dickere Schichten für den Kern zu bekommen, wurden einzelne Platten schichtweise miteinander verklebt. Als Kleber wurde immer ein Einkomponenten-PU-Kleber verwendet, der mit jeweils ca. 85 g/m² streifenförmig im Abstand von ca. 7 cm aufgebracht wurde.

	Holzfaserdämmplatte ρ = 250 kg/m ³	Holzfaserdämmplatte ρ = 320 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612 [W/(m x K)]	0,050	0,055
Spezifische Wärmekapazität nach DIN 4108-4 [J/(kg x K)]	2100	2700
Wasseraufnahme nach DIN EN 317 [%]	30	30
Biegefestigkeit nach DIN EN 310 [N/mm²]	1,8	3,3

Tabelle 5.1: Materialeigenschaften der Holzfaserdämmplatten

Wabenkarton

Bei dem Wabenkarton handelte es sich um ein nicht genormtes Produkt. Die Waben hatten eine Größe von ca. 4,9 cm². Die Wanddicke betrug ca. 0,24 mm. Die Waben waren zur einen Seite mit einem Karton mit einer Dicke von ca. 0,49 mm verschlossen, die andere Seite war offen. Die Gesamtdicke des Wabenkartons betrug 60 mm und wies eine Rohdichte von ca. 24 kg/m³ auf.

Wellpappe

Bei der Wellpappe handelte es sich ebenfalls um ein nicht genormtes Produkt. Die Wellenhöhe betrug 4 mm, waren in Plattenebene ausgerichtet und wurden vom Hersteller in 5 cm dicke Platten zugeschnitten. Das Material hatte eine Rohdichte von 85 kg/m³.

5.1.3 Verbindungsmittel

Kleber

Bei dem Kleber handelte es sich um einen Einkomponenten-PU-Kleber. Der Lieferant hat die in Tabelle 5.2 angegebenen Materialeigenschaften angegeben.

Tabelle 5.2: Materialeigenschaften des Klebers

	Einkomponenten-PU-Kleber
Viskosität [mPa x s]	ca. 9000
Festkörper bei 20 °C [%]	ca. 100
Dichte [g/cm ³]	ca. 1,14
NCO-Gehalt [%]	ca. 15
Aussehen	braun transparent

Klammern

Bei den Klammern handelt es sich um Klammern nach DIN 1052 Teil 2 Holzbauwerke; Mechanische Verbindungen, mit einem Drahtdurchmesser von 1,53 mm und einer Länge von 45 mm. Die Klammern waren nicht beharzt.

5.1.4 Randabschluss

Der Randabschluss wurde ausschließlich aus getrocknetem, handelsüblichen Fichtenvollholz gefertigt. Die Bearbeitung erfolgte handwerklich in den Werkstätten des WKI. Die Holzfeuchte wurde stichprobenartig mit einem elektronischen Holzfeuchtenmessgerät der Fa. Gann überprüft. Die ermittelten Holzfeuchten lagen zwischen 13 % und 16 %.

5.2 Prüfkörper

Flächige Verklebungen der einzelnen Materialien, auch zwischen dem Kern und den Deckschichten wurden alle ohne Wärmezufuhr und mit einem geringen Druck von ca. 2 kN/m² bei einem Klebstoffauftrag von ca. 85 g/m² durchgeführt. Der Klebstoffauftrag erfolgte streifenförmig mit einem Abstand von ca. 7 cm. Die Holzfaserdämmplatten wurden in mehreren Lagen zu 66 mm oder 132 mm dicken Kernplatten verklebt. Der Wabenkarton und die Wellpappe wurde immer einlagig in den vorgegebenen Dicken verwendet.

5.2.1 Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern

5.2.1.1 Untersuchungen am Verbundquerschnitt

Die Untersuchungen am Verbundquerschnitt wurden alle mit freien Rändern durchgeführt. Sie waren somit mit keinem Randabschluss versehen. Der Kern wurde von beiden Seiten mit einer Deckschicht versehen, so dass ein symmetrischer Querschnitt entstand. Der Kern bestand aus 3 Lagen Holzfaserdämmplatten oder aus einer Lage Wabenkarton bzw. Wellpappe.

Biegeversuche

Die Prüfkörper für die Biegeversuche waren 300 mm breit und 600 mm lang. In Abbildung 5.1 ist ein Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem Kern aus Wabenkarton abgebildet.



Abbildung 5.1: Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem Kern aus Wabenkarton

Schubversuche

Die Prüffläche wies eine Breite von 300 mm und eine Länge von 350 mm auf. Der obere und untere Überstand der Deckschichten betrug jeweils 50 mm. In Abbildung 5.2 ist ein Prüfkörper im Schubversuch mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem Kern aus Wellpappe zu sehen. Es wurden immer zwei Prüfkörper gleichzeitig geprüft.



Abbildung 5.2: Prüfkörper im Schubversuch mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem Kern aus Wellpapppe

Zug- und Druckversuche

Die Prüfkörper für die Zug- und Druckversuche hatten eine Fläche von 300 mm x 300 mm. Bei den Zugversuchen wurde eine extra angefertigte Metallplatte, wie in Abbildung 5.3 zu erkennen ist, mit den Deckschichten verschraubt. Die Schrauben griffen nicht bis in den Kern hinein, so dass keine Schwächung des Verbundes zwischen Deckschicht und Kern eintrat. Bei den Zugprüfungen, bei denen nur der Dämmstoff als Kern quer zur Plattenebene geprüft wurde, wurde auf die Oberflächen der Prüfkörper eine Sperrholzplatte mit einem Phenolharzkleber analog den Querzugprüfungen für Holzwerkstoffe verklebt.



Abbildung 5.3: Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem Kern aus Wabenkarton zur Ermittlung der Zugfestigkeit quer zur Plattenebene

5.2.1.2 Untersuchungen am Randabschluss

Bei den Versuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbundelemente stellte sich heraus, dass ein wichtiger Punkt der Anschluss der Beplankung an den Randabschluss und die Detailausbildung im Bereich der Lastweiterleitung vom Verbundelement in den unteren Randabschluss war. Bei den geklebten Verbindungen versagte die Rollschubfestigkeit der Gipsfaserplatte bzw. bei den Wänden mit einer Beplankung aus OSB die Rollschubfestigkeit des Vollholzes. Daher wurde an Stelle eines Rechteckprofils ein Randabschluss mit einem Hutprofil ausgeführt. In Abbildung 5.4 ist ein sogenanntes Hutprofil mit den maßgebenden Beanspruchungen dargestellt.



Abbildung 5.4: schematische Darstellung eines Hutprofils mit den maßgebenden Beanspruchungen

Da geklebte, tragende Verbindungen nicht von allen Unternehmen ausgeführt werden dürfen, sollte die Eignung einer geklammerten Verbindung ermittelt werden. Um eine höhere Steifigkeit und Tragfähigkeit der Verbindung zu realisieren, wurde ein Hutprofil, welches in Abbildung 5.5 in einer Prinzipskizze dargestellt ist, untersucht. Die Deckschichten stehen dabei auf dem Randabschluss. Es wurden daraufhin unterschiedliche Anschlüsse auf ihre Tragfähigkeit hin untersucht. Dabei wurde um die Anzahl der Parameter zu verringern der Einfluss des Kerns nicht mit untersucht. Alle Prüfkörper wurden ohne Kern hergestellt.



Abbildung 5.5: Prinzipskizze eines geklammerten Hutprofils Die Versuche wurden in der Art durchgeführt, dass jeweils zwei gegenüberliegende Randabschlüsse durch Deckschichtmaterial miteinander verbunden waren und die zu untersuchende Fuge zwischen Randabschluss und Deckschicht eine Länge von je 20 cm aufwies. In Abbildung 5.6 ist der untere Teil eines Prüfkörpers mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem geklammerten Hutprofil während einer Prüfung zur Ermittlung des Tragverhaltens bei Beanspruchung senkrecht zum Randabschluss abgebildet. Deutlich sind bereits die Verformungen des Hutprofils unterhalb der auf Druck beanspruchten Deckschicht zu erkennen.



Abbildung 5.6: Unterer Teil eines Prüfkörpers mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem geklammerten Hutprofil während einer Prüfung zur Ermittlung des Tragverhaltens bei Beanspruchung senkrecht zum Randabschluss

In Abbildung 5.7 ist ein bereits bis zum Versagen geprüfter Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem geklebten Randschluss mit Rechteckprofil abgebildet. Diese Art des Versuchkörpers wurde zur Untersuchung des Tragverhalten bei Beanspruchung parallel zum Randabschluss verwendet. Die beanspruchte Fuge weist auch hier eine Länge von 20 cm auf.



Abbildung 5.7: Bis zum Versagen geprüfter Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem geklebten Randschluss aus einem Rechteckprofil

5.2.2 Untersuchungen an großen Prüfkörpern

5.2.2.1 Schubversuche (Horizontallasten)

Die verschiedenen Konstruktionsvarianten für die Vordimensionierung und die Schubprüfung der Wandtafeln wurden auf der zweiten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses festgelegt. Kombiniert wurden jeweils die beiden Beplankungswerkstoffe mit allen vier Dämmstoffen. Da die Entwicklung eines Wandelementes gefordert war, das sich nahezu in beliebiger Länge herstellen lässt, wurde insbesondere der Einfluss des vertikalen Randabschusses (im Holztafelbau die Randrippe) auf das Tragverhalten eines Verbundelementes untersucht. Dafür wurden Versuche im Wandscheibenprüfstand mit umlaufendem Randabschluss und mit teilweisem Randabschluss durchgeführt. Bei dem teilweisen Randabschluss wurden die Wandelemente nur am oberen und unteren Rand und im Bereich des Zuganschlusses mit einem Abschluss versehen. Tabelle 5.3 zeigt eine tabellarische Übersicht der zu prüfenden Varianten. Abbildung 5.8 zeigt die prinzipielle Darstellung eines umlaufenden und eines teilweisen Randabschlusses.

	Gipsfaser	platten	OS	В
Randabschluss	umlaufend	teilweise	umlaufend	teilweise
ohne Kern	X	Х	X	X
Wellpappe	X	Х	Х	Х
Wabenkarton	x	X	x	Х
Holzfaserdämmplatte 250 kg/m ³	x	X	х	Х
Holzfaserdämmplatte 320 kg/m ³	x	Х	X	х

Tabelle 5.3: Schubprüfungen an Wandelementen – Übersicht der geprüften Varianten

teilweiser Randabschluss



Abbildung 5.8: prinzipielle Darstellung eines Wandverbundelements mit vollständig umlaufendem (links) und teilweisem (rechts) Randabschluss

Die Prüfkörper waren 125 cm breit und 250 cm hoch. Der Kern bestand aus drei Lagen Holzfaserdämmplatten oder einer Lage Wellpappe bzw. Wabenkarton. Der Randabschluss wurde eingeleimt und hatte die Form des Rechteckprofils.

5.2.2.2 Druckversuche (Vertikallasten)

Die Prüfkörper hatten eine Länge von 250 cm und eine Dicke von 9 cm oder 16 cm. Die Deckschichten bestanden aus 12 mm dicken OSB oder 12 mm dicken Gipsfaserplatten. Der Kern wurde ausschließlich aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von ca. 250 kg/m³ gefertigt. Der Randabschluss war geklebt oder geklammert und hatte entweder die Form eines Hut- oder eines Rechteckprofils. Tabelle 5.4 gibt eine Übersicht der geprüften Varianten. Die Elemente hatten ausschließlich oben und unten einen horizontalen Randabschluss und wiesen somit in Richtung der Krafteinleitung keine senkrechten Randabschlüsse auf. Die Deckschichten wurden wie bei allen Versuchen mit dem Kern verklebt. Es wurde ein Einkomponenten-PU Kleber verwendet, der streifenförmig mit einer Menge von ca. 85 g/m² aufgebracht wurde.

	Gipsfaserplatten		0	SB
Wanddicke	9 cm	16 cm	9 cm	16 cm
Hutprofil geklebt	Х	Х	Х	Х
Rechteckprofil geklebt	х	Х	Х	Х
Hutprofil geklammert				х
Rechteckprofil geklammert				Х

Tabelle 5.4: Schubprüfungen an Wandelementen – Übersicht der geprüften Varianten

5.2.2.3 Hygro-thermische Versuche

Die Prüfkörper für die hygro-thermischen Versuche waren jeweils 100 cm breit und 200 cm hoch. Der Kern bestand aus 3 Lagen Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von ca. 250 kg/m³, die Deckschichten waren jeweils 12 mm dick und bestanden aus OSB oder Gipsfaserplatten.

6. Methoden

6.1 Analytische Methoden

Für die Berechnung von Verbundbauteilen mit dem vorgesehenen Aufbau gibt es ingenieurmäßige Methoden, mit denen die Tragfähigkeit solcher Konstruktion und die erforderlichen Eigenschaften der Materialien bei vorgegebener Beanspruchung berechnet werden können. Bei Aicher (1984), der solche Sandwichelemente aus Spanplatten mit einem Polyurethan-Hartschaumkern untersucht, findet sich eine umfangreiche Sammlung der entsprechenden Literatur.

Für mehrschichtige nachgiebig verbundene Holzbauteile gibt DIN 1052 ein Verfahren an (E DIN 1052:2003 Abschnitt 8.6.2 "Verbundbauteile aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen"), nach dem die Beanspruchungen der Bauteile aus Einwirkungen senkrecht zur Wandebene (Biegebeanspruchung) und aus vertikalen Einwirkungen (Druckbeanspruchung) nach der Balkentheorie berechnet werden können. Die Schubverformungen des Kerns der Verbundbauteile entsprechen mechanisch den Verformungen in den nachgiebigen Verbindungen (Aicher 1987/1, 1987/2; Kreuzinger 1994).

Das Nachweisverfahren der DIN 1052 wird in Kapitel 7.1.1 für die Verbundwände angepasst und die zu erwartende Tragfähigkeit bzw. die erforderlichen Materialeigenschaften der entwickelten Verbundwände dargestellt.

Das Tragverhalten der Verbundwände unter Horizontallast in Wandebene wird an einem statischen Modell als Stabwerk bzw. Schubfeld in Anlehnung an den Nachweis der Wandtafeln nach DIN 1052 untersucht. Das Verfahren und die Besonderheiten bei den zu untersuchenden Verbundbauteilen werden in 7.1.2 behandelt.

Die o. g. Verfahren berücksichtigen nicht den Nachweis der Einleitung der Kräfte in das Verbundbauteil. Neben den Versuchen zum Tragverhalten der Randabschlüsse wird in 7.1.3 die Einleitung der Kräfte aus dem Randprofil in die Sandwichkonstruktion mit einer FEM-Simulation untersucht. Aus den Ergebnissen werden die Konsequenzen für die sinnvolle Gestaltung des Abschlussprofils erarbeitet. Die Einleitung von horizontalen Linienlasten (Zugkomponente aus Konsollast) behandelt 7.1.5.

Bei Sandwichkonstruktionen mit sehr dünnen bzw. biegeweichen Deckschichten kann das Versagen der Konstruktion durch örtliches Beulen bzw. Knittern der Deckschichten eingeleitet werden. Aicher (1984) zeigt, dass das lokale Beulen bzw. Knittern für die dort untersuchten Sandwichkonstruktionen nicht maßgebend ist. Die hier vorgesehenen Verbundquerschnitte haben sehr ähnliche mechanische Eigenschaften und Abmessungen. Ein Versagen durch örtliches Beulen ist deshalb nicht zu erwarten und hat sich auch bei keinem Versuch eingestellt. Diese Versagensform wurde deshalb in diesem Vorhaben nicht weiter untersucht.

In dieser Voruntersuchung wurden keine genauen Nachweise für das Verhalten von Wänden mit Öffnungen erarbeitet. Aicher (1984) untersuchte Verbundwände mit Öffnungen. Unter Berücksichtigung dieser Untersuchungen und nach einfachen ingenieur-

mäßigen Überlegungen werden in 7.1.6 Hinweise für eine Abschätzung des Tragverhaltens von Wänden mit Öffnungen gegeben.

Die bei Holzwerkstoffen nicht vernachlässigbaren Feuchteänderungen führen zu Verformungen und Eigenspannungen der Verbundwände. Für Holztafeln gibt es hierzu bisher kaum Untersuchungen. Die Auswirkungen werden vernachlässigt. Die Verformungen und Beanspruchungen, die in gleicher Weise auch bei üblichen Holztafeln auftreten, werden in 7.1.8 mit einer FEM-Simulation berechnet. Aus den Ergebnissen dieser Berechnung wird eine einfache Gleichung zur Ermittlung der Vorkrümmung durch Feuchteunterschiede hergeleitet.

6.2 Experimentelle Untersuchungen

6.2.1 Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern

6.2.1.1 Untersuchungen am Verbundquerschnitt

Biegeversuche

Die Biegeversuche wurden in Anlehnung an DIN EN 789, Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen, im Dreipunktbiegeversuch an 300 mm breiten und 600 mm langen Versuchskörpern durchgeführt.

Als Prüfmaschine stand eine Zwick Z 250 mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN zur Verfügung. Es wurden die Größen Kraft und Weg aufgenommen. Als Weg wurde die Durchbiegung des Prüfkörpers in Stützweitenmitte direkt am Prüfkörper mit einem Wegaufnehmer der Fa. Zwick 068980 gemessen. Die Prüfkraft wurde über eine Druckmessdose AST KAD-Z – 0,05 direkt am Kolben gemessen.

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 3 mm/min.

Schubversuche

Die Versuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit der Verklebung wurden in Anlehnung an DIN EN 789, Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen, durchgeführt. Die Prüfkörper wurden wie in Abbildung 5.2 zu erkennen ist in die Prüfvorrichtung eingespannt. Die unteren seitlichen Winkel verhinderten das seitliche Ausweichen der Prüfkörper während der Prüfungen. Die untere zwischen den Deckschichten befindliche Platte diente zur Fixierung der Prüfkörper und hatte ausschließlich losen Kontakt zu den Deckschichten.

Als Prüfmaschine stand eine Zwick Z 250 mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN zur Verfügung. Es wurden die Größen Kraft und Weg aufgenommen. Als Weg wurde der Kolbenhub direkt am Kolben aufgenommen. Die Prüfkraft wurde über eine Druckmessdose AST KAD-Z – 0,05 direkt am Kolben gemessen.

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/min.

Zug- und Druckversuche

Die Zug- und Druckversuche sind in Anlehnung an DIN EN 789, Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen, an jeweils 300 mm x 300 mm großen Prüfkörpern durchgeführt worden. Bei den Zugversuchen wurde eine extra angefertigte Metallplatte, wie in Abbildung 5.3 zu erkennen ist, mit den Deckschichten verschraubt. Die Schrauben griffen in nicht bis in den Kern hinein, so dass keine Schwächung des Verbundes zwischen Deckschicht und Kern eintrat. Bei den Zugprüfungen, bei denen nur der Dämmstoff als Kern quer zur Plattenebene geprüft wurde, wurde auf die Oberflächen der Prüfkörper eine Sperrholzplatte mit einem Phenolharz analog den Querzugprüfungen für Holzwerkstoffe verklebt und dann wie oben beschrieben geprüft.

Auch hier wurden die Prüfungen an einer Zwick Z 250 mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN durchgeführt. Es wurden die Größen Kraft und Weg aufgenommen. Bei den Zugversuchen wurde der Weg über einen externen Wegnehmer Zwick B 066608 aufgenommen. Bei den Druckversuchen wurde als Weg wurde der Kolbenhub direkt am Kolben aufgenommen.

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min.

6.2.1.2 Untersuchungen am Randabschluss

Bei den Untersuchungen am Randabschluss wurden die vorbereiteten Prüfkörper in die Prüfmaschine gelegt und bis zum Versagen auf Druck geprüft. Da keine adäquate Prüfnorm zur Verfügung stand, wurden die Prüfungen wie nachstehend beschrieben durchgeführt.

Als Prüfmaschine diente eine Zwick Z 250 mit einer maximalen Prüfkraft von 250 kN.

Es wurden die Größen Kraft und Weg aufgezeichnet. Die Kraft wurde über eine Druckmessdose GTM 250 kN am Prüfzylinder gemessen. Alle Prüfkörper wurden in Druckprüfungen untersucht.

Bei den Prüfkörpern, die rechtwinklig zum Randabschluss beansprucht wurden, wurde der zurückgelegte Weg des unteren Randes der Deckschicht mit dem Wegaufnehmer der Fa. Zwick 068980 gemessen.

Bei den Prüfkörpern, die unter 45 ° oder parallel Randabschluss beansprucht wurden, wurde die relative Verschiebung zum Randabschluss in Richtung des Randabschlusses ermittelt. Zur Aufnahme des Weges standen Wegaufnehmer des Typs Heidenhaim MT 25 zur Verfügung.

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/min.

6.2.2 Untersuchungen an großen Prüfkörpern

6.2.2.1 Schubversuche (Horizontallasten)

Die Schubversuche wurden in Anlehnung an DIN EN 594 Holzbauwerke - Prüfverfahren - Wandscheiben-Tragfähigkeit und -Steifigkeit von Wänden in Holztafelbauart durchgeführt.

Die Lasten wurden mit einem ölhydraulischen Prüfzylinder aufgebracht. Die zu prüfenden Wandelemente standen mit der Fußrippe bündig auf einem Aluminium- oder Sperrholz-Rechteckprofil, so dass sich die Deckschichten nicht auf dem Prüfrahmen abstützen konnten. Ein Kippen der gesamten Tafel wurde durch seitliche Konsolen verhindert. Um einen Widerstand bei einer Kopfauslenkung seitlich zur Wandebene möglichst gering zu halten, sind an den Enden der Konsolen Hartkunststoffrollen angeordnet. Die Horizon-

talkraft wurde zentrisch in den oberen Randabschluss durch eine Druckplatte, die den Abmessungen des Randabschlusses entsprach, eingeleitet. Die Zugkraftübertragung im Fußbereich des Wandelementes erfolgte durch eine in dem senkrechten Randabschluss verschraubte Stahlgelenkkonstruktion, die gelenkig gelagert mit dem Fußboden starr verankert ist. Das horizontale Verschieben des Wandelements in Richtung der Kraft wurde zusätzlich durch einen Winkel am unteren Randabschluss verhindert, der am Prüfrahmen befestigt war.

Die hydraulische Anlage wurde von der Firma Toni Technik, Berlin, hergestellt. Der Differentialzylinder wurde weggeregelt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von in der Regel 5 mm/min bis zum Erreichen der maximalen ElorizontalkZafinalegestiettegriertes



Abbildung 6.1: Prinzip des Versuchsaufbaus im Wandscheibenprüfstand des WKI

Wegmess-System der Firma Toni-Technik lieferte die Messwerte für die weggeregelte Steuerung. Die am Prüfzylinder angebaute DMS-Messdose, ebenfalls von der Firma Toni Technik, hat die auftretenden Horizontalkräfte direkt an der Lasteinleitung gemessen. Der Weg und die Kraft standen als analoges Spannungssignal zur Verfügung. Die Diagonalverformung der Wandtafel wurde mit Wegaufnehmern (1-WA 50 mm) mit einer Linearitätsabweichung von 0,2 % der Fa. HBM Mess- und Systemtechnik GmbH, Darmstadt, ermittelt. Es wurde auf beiden Seiten der Wand die Dehnung der Diagonalen des

Wandtafel-Rahmens gemessen. Hierzu wurde jeweils ein Winkel in den Ecken des oberen und unteren Randabschlusses direkt befestigt. Daran wurde der mit einer Zugfeder versehende Wegaufnehmer in der einen Ecke befestigt und durch eine Drahtlitze mit der anderen Ecke verbunden. Sämtliche Messwert-Signale wurden von einem MGC-Messverstärkersystem der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, aufgenommen und von einem Datenerfassungssystem kontinuierlich eingelesen. Abbildung 6.1 zeigt das Prinzip des Versuchsaufbaus im Wandscheibenprüfstand des WKI.

6.2.2.2 Druckversuche (Vertikallasten)

Die maximale Beanspruchbarkeit eines Verbundelementes unter Vertikallasten wurde im Prüfrahmen des WKI ermittelt. Die Lasten wurden mit einem ölhydraulischen Prüfzylinder aufgebracht. Die durch den Druckzylinder aufgebrachte Punktlast wurde mit Hilfe eines lastverteilenden Vierkanteisens in eine linienförmige Beanspruchung umgewandelt.

Während der Prüfungen wurden die Stauchung des Prüfkörpers auf beiden Seiten der Wand über die gesamte Wandhöhe mit Hilfe von Wegaufnehmern (1-WA 50 mm) mit einer Linearitätsabweichung von 0,2 % der Fa. HBM Mess- und Systemtechnik GmbH, Darmstadt, ermittelt. Hierzu wurde jeweils ein Winkel an den gegenüber liegenden Randabschlüssen direkt an diesen befestigt. Daran wurde der mit einer Zugfeder versehende Wegaufnehmer in dem oberen Randabschluss befestigt und durch eine Drahtlitze mit dem unteren Randabschluss verbunden.

Ebenso wurde das Beulen der Wände auf beiden Seiten mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern mit einer Linearitätsabweichung von 0,2 % in der Mitte der Prüfkörper ermittelt.

Die Wandelemente wurden im Bereich der Krafteinleitung und der Auflagerung gelenkig gelagert, so dass sich der Eulerfall 1 einstellen konnte.

Die hydraulische Anlage wurde von der Firma Toni Technik, Berlin, hergestellt. Der Differentialzylinder kann weg- und kraftgeregelt angesteuert werden. Bei einer Wegregelung ermöglicht die Servoventiltechnik konstante Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 1,0 mm/min und 30 mm/min.

Ein im Zylinder integriertes Wegmess-System der Firma Toni-Technik liefert die Messwerte für die weggeregelte Steuerung. Die am Prüfzylinder angebaute DMS-Messdose, ebenfalls von der Firma Toni Technik, misst direkt an der Lasteinleitung die auftretenden Kräfte. Der Weg und die Kraft stehen als analoges Spannungssignal zur Verfügung.

Die Prüfung erfolgte weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 3 mm/min.

6.2.2.3 Hygro-thermische Untersuchungen

Verformungen im Differenzklima

Das Verformungsverhalten im Differenzklima ist an Wandelementen im Originalmaßstab ermittelt worden. Die insgesamt 9 cm dicken, 100 cm breiten und 200 cm hohen Wände wurden raumabschließend in eine Doppelklimakammer des WKI montiert. Die Anschlüssen wurden so ausgebildet, dass sich die Prüfkörper zwängungsfrei verformen konnten. Die Anschlüsse nach oben und unten wurden frei drehbar ausgebildet.

Nach einer Phase der Vorklimatisierung wurden die Prüfkörper mit unterschiedlichen Klimabedingungen an den beiden Wandoberflächen beansprucht. Gleichzeitig wurde mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern das Beulverhalten aus der Wandebene heraus gemessen. Eine Seite der Wand wurde kontinuierlich mit dem Klima 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit klimatisiert.

Temperaturverhalten

Mit Hilfe von Wärmestromplatten wurde die Wärmeleitfähigkeit des Verbundelements und des Kerns an sich ermittelt. Die zu prüfendenden Elemente aus den Versuchen zur Ermittlung des Verformungsverhaltens im Differenzklima wurden zusätzlich einer Temperaturdifferenz ausgesetzt, um die Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln. Es erfolgte eine Messung in drei Stufen. Eine Seite der Doppelklimakammer wurde konstant mit 20 °C, die andere Seite wurde stufenweise auf 0 °C, - 10 °C und – 20 °C temperiert.

7. Ergebnisse

7.1 analytische Untersuchungen

7.1.1 Beanspruchung durch Längskräfte und Plattenbiegung

7.1.1.1 Steifigkeitswerte und Beanspruchungen der Bauteile

Die Wand wird als Verbundbauteil aus 3 oder, bei Vernachlässigung der Biegesteifigkeit des Kerns, aus 2 nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen nach DIN 1052 8.6.2 berechnet. Das dort angegebene Verfahren ermöglicht die Berechnung 2- und 3-teiliger beliebiger Querschnitte. Das Verfahren ist sehr gut für das vorliegende statische Modell des Pendelstabs bzw. des Einfeldträgers unter verteilten Lasten geeignet und wird im Folgenden für die Berechnungen angewendet. Für andere Systeme und Lasten etwa von Mehrfeldträgern ist dieses Verfahren nur zur Abschätzung geeignet. Eine genauere Berechnung solcher Systeme kann mit dem Verfahren nach DIN 1052 8.9 (Kreuzinger 2003) erfolgen, das eigentlich für Flächentragwerke entwickelt wurde. Das Verfahren ist für Computer gestützte Berechnungen mit einfachen Stabwerksprogrammen geeignet.



Abbildung 7.1: Darstellung eines mehrteiligen Verbundbauteils für allgemeine Wandquerschnitte

Die Berechnung als mehrteiliges Verbundbauteil ist für allgemeine Wandquerschnitte nach Abbildung 7.1 möglich. Für die Verbundsteifigkeit K/s zwischen Mittelschicht und Deckschicht 1 und 2 ergibt sich bei Wandquerschnitten mit schubweichem Kern

$$K/s = G_K \cdot \frac{2 \cdot b}{a} \tag{GI. 7.1}$$

mit

- G_K Gleitmodul der Kernschicht
- b Breite der Wand
- a Dicke der Kernschicht

Zur besseren Übersicht und da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur symmetrische Wandaufbauten mit weicher Kernschicht untersucht werden, werden im Weiteren nur die Gleichungen für symmetrische Querschnitte mit beidseitig gleicher Deckschicht bei Vernachlässigung der Biege- und Längssteifigkeit des Kerns angegeben. Die Biegesteifigkeit ergibt sich zu:

$$(\text{EI})_{\text{ef}} = 2 \cdot b \cdot \left(E_{\text{m}} \cdot \frac{d^3}{12} + \gamma \cdot E_{\text{s}} \cdot d \cdot \left(\frac{a+d}{2} \right)^2 \right)$$
(GI. 7.2)

- b Breite der Wand
- d Dicke der Deckschichten
- a Dicke der Kernschicht

E_m Elastizitätsmodul der Deckschichten bei Plattenbeanspruchung

E_s Elastizitätsmodul der Deckschichten bei Scheibenbeanspruchung

$$\boldsymbol{g} = \frac{1}{1 + \frac{\boldsymbol{p}^2 \cdot \boldsymbol{E}_s \cdot \boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{a}}{\boldsymbol{G}_K \cdot \boldsymbol{\ell}^2 \cdot 2 \cdot \boldsymbol{b}}} = \frac{1}{1 + \frac{\boldsymbol{p}^2 \cdot \boldsymbol{E}_s \cdot \boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{a}}{\boldsymbol{G}_K \cdot \boldsymbol{\ell}^2 \cdot 2}}$$
(Gl. 7.3)

Der Bemessungswert der Normalkraft in den Deckschichten beträgt

$$N_{d} = \frac{M_{d}}{(EI)_{ef}} \cdot \boldsymbol{g} \cdot \frac{(a+d)}{2} \cdot \boldsymbol{E}_{s} \cdot \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{d}$$
(Gl. 7.4)

Der Bemessungswert des Biegemomentes in den Deckschichten beträgt

$$M_{D,d} = \frac{M_d}{(EI)_{ef}} \cdot \frac{E_m \cdot b \cdot d^3}{12}$$
(GI. 7.5)

Der Bemessungswert der Schubspannung im Kern beträgt

$$\boldsymbol{t}_{\max,d} = \frac{V_{\max,d} \cdot \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{E}_s \cdot \boldsymbol{d} \cdot (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{d})}{(\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{I})_{ef} \cdot 2} \tag{Gl. 7.6}$$

7.1.1.2 Nachweis für Plattenbiegung

Die Beanspruchungen der Wände aus horizontalen Einwirkungen (Wind, Absturzsicherung, Konsollasten) sind bei den vorhandenen Stützweiten so gering, dass sie für die Bemessung der Verbundbauteile nur in Sonderfällen maßgebend werden. Der Nachweis ist mit den oben angegebenen Gleichungen ohne weiteres möglich und wird hier nicht weiter untersucht.

7.1.1.3 Nachweis für Druckkräfte

Der Nachweis erfolgt nach dem Ersatzstabverfahren nach DIN 1052 10.3, wobei die Schlankheit λ_{ef} der Wände in Anlehnung an die Nachweise für zusammengesetzte Druckstäbe nach DIN 1052 10.5.3 ermittelt wird. Die Schlankheit ergibt sich unter Verwendung der nach GI. 7.2 ermittelten effektiven Biegesteifigkeit (EI)_{ef} zu

$$\lambda_{ef} = \frac{\ell}{\sqrt{\frac{(E \cdot I)_{ef}}{(E \cdot A)_{tot}}}}$$
(Gl. 7.7)

Für den symmetrischen Wandquerschnitt ergibt sich unter Vernachlässigung der Steifigkeit des Kerns

$$(\mathbf{E} \cdot \mathbf{A})_{\text{tot}} = 2 \cdot \mathbf{E}_{\text{s}} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{d} \tag{GI. 7.8}$$

Nach DIN 1052 ist bei diesen Nachweisen mit den 5% Fraktilen der Materialkennwerte zu rechnen. Diese sind durch den Materialsicherheitsbeiwert γ_M zu teilen. Da dieses bei der Berechnung der Biegesteifigkeit (EI)_{ef} in gleicher Weise wie bei der Längssteifigkeit (EA)_{tot} erfolgt, hat diese Vorschrift in der Regel keine Auswirkung auf die berechnete Schlankheit λ_{ef} .

Nach DIN 1052 8.3 (3) ist bei druckbeanspruchten Bauteilen in den Nutzungsklassen 2 und 3 der Einfluss des Kriechens zu berücksichtigen, wenn der Anteil der ständigen Last 70% der Gesamtlast übersteigt. Die Berücksichtigung kann vereinfacht durch eine Abminderung der Steifigkeit um den Faktor 1/(1+k_{def}) bei der Berechnung des bezogenen Schlankheitsgrades λ_{rel} erfolgen. Da die Verbundwände aus Holzwerkstoffen hergestellt werden, die generell im Vergleich zu Vollholz besonders große Verformungsbeiwerte (2...4) haben, kann auch schon in Nutzungsklasse 1 und bei geringerem ständigen Lastanteil eine Berücksichtigung sinnvoll sein. Bei großen Eigenlasten und schlanken Bauteilen verringert sich die Tragfähigkeit durch das Kriechen spürbar.

Für Druckstäbe ist die folgende Bedingung einzuhalten:

$$\frac{\sigma_{c,d}}{k_c \cdot f_{c,d}} \le 1$$
(GI. 7.9)
$$k_c = \min\left\{\frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}};1\right\}$$

$$k = 0.5 \cdot \left[1 + 0.1 \cdot (\lambda_{rel,c} - 0.3) + \lambda_{rel,c}^2 \right]$$
(GI. 7.11)

$$\lambda_{\rm rel,c} = \frac{\lambda_{\rm ef}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{\rm c,k}}{E_{0,05}}} \tag{GI. 7.12}$$

Der Verbund ist nach DIN 1052 10.5.3 (8) für eine über die ganze Stablänge wirksame Querkraft nachzuweisen. Der Bemessungswert dieser Querkraft beträgt:

$V_d = F_{c,d} / (120 \cdot k_c)$	für $\lambda_{\rm ef} \leq 30$	(Gl. 7.13)
$V_{d} = F_{c,d} \cdot \lambda_{ef} / (3600 \cdot k_{c})$	für 30 < $\lambda_{\rm ef}$ < 60	(Gl. 7.14)
$V_{\rm d} = F_{\rm c,d} / (60 \cdot k_{\rm c})$	für 60 $\leq \lambda_{\rm ef}$	(Gl. 7.15)

Die Berechnung der Schubspannungen erfolgt mit den Gleichungen nach Gl. 7.6.

7.1.1.4 Drucktragfähigkeit von Verbundwänden

Die Abbildungen 7.2 bis 7.4 zeigen beispielhaft die Bemessungswerte der Drucktragfähigkeit von Wänden, wie sie sich mit den bei diesem Forschungsvorhaben vorgesehenen Materialien nach den oben gezeigten Gleichungen ergibt. Die angegebenen Tragfähigkeiten sind Bemessungswerte mit mittlerer Einwirkungsdauer und Nutzungsklasse 1 entsprechend einer Innenwand unter Eigenlast und Verkehrslast aus Wohnräumen. Untersucht wurden Wände mit Deckschichten aus Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten und OSB/4-Platten. Die Materialeigenschaften für die Gipskartonplatten und OSB/4-Platten wurden entsprechend DIN 1052 Anhang F gewählt. Die Eigenschaften der Gipsfaserplatten entsprechen der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-434. Die Dicke der Deckschichten beträgt bei den Gipsplatten 15 mm und bei den OSB/4-Platten 16 mm. Die Dicke des Kerns wurde zwischen 20 und 240 mm variiert. Die Biege und Drucksteifigkeit des Kerns wurde vernachlässigt. Der Gleitmodul des Kerns wurde zu 2 N/mm² angenommen. Dieser Wert kann als typischer Wert für die in den Versuchen verwendeten Materialien angesehen werden.

Holzwerkstoffe haben relativ große feuchteabhängige Dehnungen. Diese wirken sich bei Druckstäben ungünstig durch Vorkrümmungen aus, wenn die Deckschichten unterschiedliche Materialfeuchten haben. Bei der Bemessung wurde das zusätzliche Moment aus einer feuchtebedingten Vorkrümmung berücksichtigt, wie es unter Praxisbedingungen vorkommen kann. Der Ansatz für die Ermittlung der Größe dieser Vorkrümmung wird in 7.1.8 gezeigt.

In die Grafiken ist außer der Tragfähigkeit, die sich aus dem Knicknachweis der Gesamtwand ergibt, als gestrichelte Linie die Tragfähigkeit aus der Einleitung der Kräfte in einen unteren Randabschluss aus Vollholz eingetragen, wie sie sich aus dem Nachweis ergibt, der in 7.1.3 hergeleitet wird. Es zeigt sich, dass insbesondere bei den Wänden mit besonders tragfähigen Deckschichten, wie etwa mit OSB/4 die große Festigkeit der Platten wegen der begrenzten Tragfähigkeit des unteren Randabschlusses nicht ausgenutzt werden kann.

Die Größe der Schubspannungen im Kern der Bauteile beträgt unter der Bemessungslast bei einer Kerndicke von 80 mm 0,050 N/mm² für die OSB-Wand, 0,021 N/mm² für die

GF-Wand und 0,009 N/mm² für die GK-Wand und ist damit etwa proportional zur Längskraft. Bei dünner Kernschicht und großer Vertikallast erreicht die Schubspannung Werte, die für die Bemessung maßgebend sein können.

Die für die Verbundwand definierten Anforderungen für die Drucktragfähigkeit lassen sich mit allen vorgesehenen Konstruktionen erfüllen.



Abbildung 7.2: Tragfähigkeit von Verbundwänden mit Gipskartonplatten



Abbildung 7.3: Tragfähigkeit von Verbundwänden mit Gipsfaserplatten



Abbildung 7.4: Tragfähigkeit von Verbundwänden mit OSB/4-Platten

7.1 2 Beanspruchung durch Horizontalkräfte in Tafelebene

Für die Verbundwände ist grundsätzlich ein umlaufendes Abschlussprofil aus Holz oder einem Holzwerkstoff vorgesehen. Dieses Abschlussprofil wird so ausgebildet, dass die Lasten und Auflagerkräfte nach Abbildung 7.5 in die Tafel eingeleitet werden. Die Konstruktion entspricht dann der im Holztafelbau üblichen Wandtafel. Diese Wand kann als Schubfeld berechnet werden. Die Auflagerkräfte und der für die Verbindung Randabschluss-Deckschichten und die Deckschichten selbst maßgebende Schubfluss svo ergeben sich aus einfachen Gleichgewichtsbedingungen. Auf eine Verminderung der rechnerischen Druckkraft Fc, die nach DIN 1052 in bestimmtem Situationen für den Nachweis des Schwellendrucks zulässig ist, sollte hier verzichtet werden. Die Verminderung dieser Beanspruchung ist nur möglich, wenn der Anschluss der Beplankung an die untere horizontale Rippe nicht oder nur gering beansprucht ist, und so die Rippen entlasten kann. Die Verbundwand trägt anders als die übliche Wandtafel die vertikalen Lasten planmäßig nur über die Deckschichten ab. Die Verbindung der Deckschichten mit dem unteren Abschluss ist daher grundsätzlich stark beansprucht. Die Verminderung der Druckkraft des Randabschlusses müsste durch eine Erhöhung der Druckbeanspruchung der Deckschichten berücksichtigt werden. Wenn ein Abschlussprofil vorhanden ist, ist eine Umlagerung vom Randprofil auf die Deckschichten daher nicht sinnvoll. Auf den Sonderfall der Wand ohne Randabschlussprofil wird in 7.1.7 eingegangen.



Abbildung 7.5: Darstellung der Beanspruchungen und Auflagerreaktionen bei horizontaler Krafteinleitung mit umlaufendem Randabschluss

Die vertikalen Abschlussprofile sind für eine Kraft

$$F_t = F_c = \frac{V \cdot h}{\ell} \tag{GI. 7.16}$$

mit der Unterkonstruktion zu verbinden.

Das untere horizontale Abschlussprofil ist für die Kraft V zu bemessen.

Der Schubfluss in der Verbindung aller Abschlussprofile mit den Deckschichten beträgt an beiden Seiten

$$s_{\nu,0} = \frac{F}{2 \cdot \ell}$$
 (GI. 7.17)

Die Schubtragfähigkeit der Beplankung von Holztafeln, die nach dem Schubfeldverfahren bemessen werden, ist bei nach DIN 1052 wegen der Vereinfachungen des Modells mit einem Faktor 0,5 zu vermindern. Entsprechend sollte auch bei der Verbundwand die Schubtragfähigkeit abgemindert werden. Für Wandtafeln sieht DIN 1052 die Berücksichtigung des Beulens der Beplankung vor. Da der Kern bei der Verbundwand ein Ausbeulen verhindert, ist hier kein Nachweis erforderlich. Für die Deckschichten ist nachzuweisen:

$$\frac{s_{v,0}}{0.5 \cdot f_{v,d} \cdot d} \le 1 \tag{GI. 7.18}$$

Der Kern der Verbundwand ist nach diesem Tragmodell nicht beansprucht. Die Tragfähigkeit der Verbundwände kann durch geeignete Wahl der Verbindungsmittel und der Anschlüsse an die Unterkonstruktion den jeweiligen Beanspruchungen angepasst werden. Die Tragfähigkeit reicht für alle im Tafelbau üblichen Beanspruchungen aus.

7.1.3 Verbindung des Randabschlusses mit den Deckschichten

7.1.3.1 Schubkräfte in Wandebene

Die Schubbeanspruchungen in Wandebene werden bei den Verbundelementen wegen der im Vergleich mit den Deckschichten vernachlässigbaren Schubsteifigkeit des Kerns allein von den Deckschichten aufgenommen. Eine Verbindung des Randabschlusses ist deshalb nur mit den Deckschichten erforderlich. Diese Verbindung kann bei der vorgesehenen Ausführung mit einem zwischen den Deckschichten liegenden Abschlussprofil durch eine Klebung oder eine Nagel- bzw. Klammerverbindung erfolgen. Die Klebung hat eine im Vergleich zu mechanischen Verbindungsmitteln sehr hohe Tragfähigkeit. Das Bruchverhalten der Klebung ist aber spröde, was das Zusammenwirken mehrer Bauteile und insbesondere die Umlagerungsmöglichkeiten zwischen Bauteilen, die aus Gründen der Robustheit der Konstruktion wünschenswert ist, verhindert. Die Klebung erwies sich außerdem in den Berechnungen in 7.1.3.3 und in den Versuchen als ungünstig für die Übertragung von Druckkräften. Da die sehr hohe Tragfähigkeit der Klebung für die Verbindung nicht erforderlich ist und die Verbindung mit mechanischen Verbindungsmitteln problemlos möglich ist, wird die Verbindung als Nagel- oder Klammerverbindung nach DIN 1052 ausgeführt. Zu beachten sind hierbei die Mindesteinschlagtiefen und die Randabstände. Hieraus ergeben sich in Abhängigkeit vom verwendeten Verbindungsmitteldurchmesser Mindestabmessungen für das Abschlussprofil und eine Mindestdicke der Deckschichten, die im Bereich der auch für andere Anforderungen nötigen Abmessungen liegen.

Die Verbindung entspricht der üblichen Verbindung von Rippen mit der Beplankung im Holzrahmen- bzw. Holztafelbau. Die Verbindung ist für alle Schubbeanspruchungen, die bei der geplanten Verwendung der Verbundwände vorkommen ausreichend und kann der jeweiligen Situation angepasst werden.

7.1.3.2 Schubkräfte senkrecht zur Wandebene

Da der Kern keine wirksame direkte Verbindung mit dem Randabschluss hat, muss die Schubbeanspruchung des Kerns aus Lasten senkrecht zur Wandebene, die für die Sandwichwirkung grundlegend ist, an den Rändern über eine Zug- oder Druckbeanspruchung in die Deckschichten und von da in den Randabschluss geleitet werden. Die Zugfestigkeit des Kerns ist bei den vorgesehenen Werkstoffen so gering, dass die Kraftübertragung auf der Zugseite unter Umständen ausfällt. Die Querkraft als resultierende der Schubbeanspruchung des Querschnitts wird dann nur über Druckbeanspruchung bzw. Kontakt in die Deckschicht auf der Druckseite eingeleitet. Die Verbindung Deckschicht Randabschluss wird mit einer Zugkraft gleich der Querkraft der Wand beansprucht. Die Nagel- bzw. Klammerverbindung ist ggf. für diese Beanspruchung auf Herausziehen zu bemessen. Insgesamt ist die Größe dieser Beanspruchung, das ist die Querkraft aus direkter Windlast, Konsollast und wirksamer Querkraft aus der Längsdruckkraft, mit etwa 1 kN pro Meter Wand so gering, dass sie in der Regel vernachlässigt werden kann.

7.1.3.3 Druckkräfte

Druckbeanspruchungen in Wandebene werden wie die Schubbeanspruchungen in Wandebene, von den Deckschichten aufgenommen. Die Steifigkeit des Kerns ist klein gegenüber der Steifigkeit der Deckschichten. Eine Verbindung des Kerns mit dem Randabschluss, für die eine hohe Passgenauigkeit nötig wäre, ist deshalb nicht erforderlich.

Für den Randabschluss war zunächst ein eingeschobenes, mit den Deckschichten verklebtes Rechteckprofil vorgesehen. Die Übertragung der Druckkräfte über diese Verklebung beansprucht das Randprofil aus Holz auf Rollschub, für den dieses Material wegen seiner geringen Rollschubfestigkeit und Steifigkeit wenig geeignet ist. Um diese Schwachstelle zu beseitigen und um einen robusten Rand für den Verbundquerschnitt zu erreichen, wurde das Randprofil zu einem Hutprofil (Abbildung 7.6) ergänzt, das durch Fräsen oder Zusammensetzen aus zwei Rechteckquerschnitten wirtschaftlich hergestellt werden kann. Da keine direkte Verbindung des Abschlusses mit dem Kern erforderlich ist, kann in diesem Bereich auch eine Aussparung zur Installationsführung angeordnet werden.



Abbildung 7.6: Randabschluss mit und ohne Öffnung für Installationsführung

Durch die Ausformung als Hutprofil können die Druckkräfte nun auch an der Unterseite der Deckschichten über Kontakt weitergeleitet werden. Da für die Verbindung der Deckschichten mit dem Kern ohnehin eine Klebung erforderlich ist, sollte das Randprofil zunächst, um die optimale Verbindung zu erreichen, eingeklebt werden. Die Versuche zum Tragverhalten der Verbindung zeigten aber wider Erwarten für die eingeklebten Profile kaum bessere, teilweise wesentlich schlechtere Tragfähigkeiten als bei nur geklammerten Verbindungen.

Das Tragverhalten des Anschlusses wurde deshalb mit einer linearen FE-Simulation mit dem Programmsystem ANSYS 7 untersucht. Benutzt wurden isoparametrische 8-Knoten-Scheibenelemente (Plane42). Das verwendete orthogonal-anisotrope Materialgesetz ermöglicht es, die stark richtungsabhängigen Materialeigenschaften des Randprofils abzubilden. Für das Tragverhalten ist vor allem der große Sprung der Steifigkeiten am Übergang zwischen den Deckschichten und dem Randabschluss maßgebend. Eine Variation der Materialeigenschaften mit den für die unterschiedlichen Materialien der Deckschichten repräsentativen Eigenschaften brachte keine wesentlichen Unterschiede im Tragverhalten.

Die folgenden Bilder sind einer Simulation mit einer Deckschicht aus OSB entnommen. Als Materialeigenschaften wurden folgende Werte nach DIN 1052 angenommen:

Deckschichten	E [N/mm²] G [N/mm²]	120/4300/3200 60/1090/60
Randabschluss	E [N/mm²] G [N/mm²]	370/370/11000 69/690/69

In der Simulation ist keine Verbindung zwischen Kern und Abschlussprofil vorgesehen, so dass sich der Kern über den Bereich des Randabschlusses schieben kann, ohne irgendwelche Reaktionen zu erzeugen. Im Druckkontaktbereich an der Unterseite der Deckschichten ist das Randprofil starr mit den Deckschichten verbunden. Im seitlichen Kontaktbereich sind der Randabschluss und die Deckschichten zur Simulation des eingeklebten Profils starr verbunden. Bei der Simulation der Verbindung mit mechanischen Verbindungsmitteln sind sie gegeneinander frei beweglich. Die tatsächlich vorhandene punktuelle Verbindung über mechanische Verbindungsmittel kann in diesem ebenen Modell nicht sinnvoll nachgebildet werden. Für die Übertragung der vertikalen Kräfte ist die Nichtberücksichtigung der Verbindungsmittel unbedeutend, da die Steifigkeit von Klammern und Nägeln auf Abscheren im Verhältnis zur Steifigkeit des Kontaktes an der Unterseite der Deckschichten sehr gering ist. Bei mechanischen Verbindungsmitteln müssen die Kräfte per Lochleibung und Biegung über den kleinen Bereich der Stifte übertragen werden, für die Kontaktverbindung an der Unterseite der Deckschichten steht die gesamte Querschnittsfläche der Deckschichten zur Verfügung.

Dem geklebten Randabschluss in den Bildern 7.7 bis 7.11 links ist jeweils der Abschluss ohne Klebung gegenübergestellt. Die Abbildungen 7.7 bis 7.11 zeigen die Verformungen, Hauptdehnungen, Hauptspannungen, Schubspannungen und Querzugspannungen im Bereich des unteren Randabschlusses unter vertikaler Druckbeanspruchung jeweils mit und ohne Klebung.

Der Verlauf der Verformungen und der Hauptdehnungen (Abbildungen 7.7 und 7.8) scheint auf ein völlig anderes Tragverhalten der Varianten hinzuweisen. An den Hauptspannungen in Abbildung 7.9 erkennt man jedoch, dass die Klebung nur einen geringen Einfluss auf das Tragverhalten hat. Die großen Unterschiede in den Steifigkeiten, insbesondere bei der großen Längssteifigkeit der Deckschichten und der extrem geringen Querdrucksteifigkeit und Rollschubsteifigkeit der Schwelle, führen dazu, dass sich das Abschlussprofil da, wo es möglich ist, der Beanspruchung durch entsprechende Verformungen entzieht. Die vertikalen Lasten werden bei beiden Varianten von den Deckschichten über die Unterseite in das Abschlussprofil weitergeleitet, die Hauptspannungsbilder sind sehr ähnlich. Durch die Lastausbreitung, die von den außenliegenden dünnen Deckschichten nur im Abschlussprofil nach innen erfolgen kann, ist die Lagerung an der Innenseite steifer als an der Außenseite. Hierdurch verkrümmen sich die Deckschichten nach außen (Abbildung 7.7). Diese Verkrümmung wird bei einer Verklebung, solange sie intakt ist, verringert. Es ergeben sich hierbei aber erhebliche Querzug-
beanspruchungen im Abschlussprofil (Abbildung 7.11 links). Die Verklebung führt au-Berdem zu einer Rollschubbeanspruchung im gesamten Bereich der seitlichen Verklebung (Abbildung 7.10). Ohne Verklebung kommt es nur im Bereich der Diskontinuität beim Querschnittssprung zu großen Querzug- und Rollschubspannungen. Diese örtlichen Spannungsspitzen sind typisch für Lasteinleitungen in Teilflächen und bei Querschnittssprüngen. Sie werden durch örtliche Risse oder Plastifizierungen des Materials abgebaut und sind nicht Benmessungsrelevant.

Die Querzug- und Rollschubbeanspruchung bei der geklebten Verbindung kann wegen der geringen Querzug- und Rollschubfestigkeit des Holzes, die außerdem selbst innerhalb eines Bauteils noch großen Schwankungen unterliegt, zu frühzeitigem Versagen der Verbindung führen. Die Sicherheit der Konstruktion ist dann noch nicht gefährdet, wenn die weiterhin intakte Druckkontaktverbindung ausreicht, die Beanspruchungen allein aufzunehmen. Insgesamt ist aber kein Zusammenwirken der seitlichen Rollschubverbindung mit der Querdruckverbindung an der Unterseite zu erwarten. Für die Bemessung der geklebten Verbindung sollte deshalb nur der Kontakt an der Unterseite oder nur die seitliche Rollschubverbindung berücksichtigt werden. Da der untere Kontaktanschluss im Normalfall robuster und leistungsfähiger ist, ergibt sich kein Vorteil für die Verklebung. Der Kontakt an der Unterseite kann auch ohne Klebung sichergestellt werden. Aus statischer Sicht kann auf die Verklebung verzichtet werden.

Für die Weiterleitung der Druckkräfte über den Randabschluss ist unabhängig von der Art der Verbindung der Druckkontakt an der Unterseite der Deckschichten nachzuweisen:

 $\frac{F_{c,d}}{2 \cdot b \cdot d \cdot f_{c,90,d}} \!\leq\! 1$

Eine Erhöhung des Bemessungswertes für Druck senkrecht zur Faser über einen Beiwert oder eine vergrößerte wirksame Fläche, wie sie nach DIN 1052 für bestimmte Situationen vorgesehen ist, darf nicht angesetzt werden, da sich in dieser Situation, Ausbreitung der Druckkraft über Rollschub, keine positiver Effekt aus der Teilflächenbeanspruchung einstellt.

(Gl. 7.19)



Abbildung 7.7: Verformungen des unteren Abschlusses aus vertikaler Druckbeanspruchung

VECTOR aver-1		:	:	X	XX	X	8 8	11			-	-	+	+ +	1 1	•	5	* *	*	XXX	X		NOV	25 25	7.1
27788c=1			*	×	X	¥.	*	*	•	*	•	-	*	-	-	-			21	2	×	*		+	
ED ET			\$	*	X	3	*	-	-			-				1	1	1	24	x	2	*			
PRIML	5	4		X	X	15		-	•	•	14	**	÷	-					×	X	22	*	c	20	
FREND	1			55	14	¥.		4	-	++			44			4			×	x	×	*	÷	1	
	÷.	4	*	X	×	×	*	4	+.	÷.	55		$\mathbf{r}^{\mathbf{k}}$	-			-		*	24	12	\$	÷		
	÷		1	2		•	-	**	++	+-	-			-	. 44	-	-	-	-		~	~		1	
	2		-	-									-	-	-	-	+	-	*		~				
	\mathbf{e}	10		30	×		÷.	er.	-	10				- 1	-	•	-	•	•	8	×		1.5	22	
			*	×	×			•			-		-	-	6	•		•		8	×	\$			
	10	4	×	2	34	×		4	-		<u>.</u>			2	2	-		÷.	*	72	75	8		1	
	1		*	2	*	4			1	0.7					1		e.	٠	*	×	*	\$. *	1.1	
	8	4	×	*	×	٩			-							٠		1	*	15	*	\$			
	8		1¢	4	2	X	. •	•	3					•	•	÷.		٠	+	\$	*	×	٠		
	1	3	3	3	. 3	1	4	•	1	33					۰.	¢.	Υ.	F.	1	1	1	÷.	1	3	
	4	1	3	4	1	1	1	. •	- 5						۰.		٥.	0	1	1	£.	£	4	4	
	4	T	7	3	1	1	•	•						•	۰.	÷	•	¢	X	X	Ł	L	1	1	
	1	1	1	1	7	3		1		13					*	1	t.	£.	3	1	X	1	1	1	
	-T	н	1	3	1	1	1	1		6.9				57	٢.,	10	2	£.,	4	1	4	1	1	7	

1 VECTO	al l	. *		*	*	x	•	•	~	*	-		+	•	*	*		2	x	ж	٠	1	nive	7.1
1711	4	8		*5	v.	ъ	*	•	*	-	+	-	+	-	*	*	-	<i>µ</i>	x	x	•	1695	25	2003
BUB C	1			14	×	۴.	-		-	-		÷.	-	-	-	1			20	*				1. AL
ED-E3	5	x	٠	75	14	¥,	*	*	*	-	+	•	-	-	*	1	4	27	x	x	*	1	- 53	
PRIN	a,		*	*	×	*					-			2	-	1	1		2	20	*	2	- 6	
FRIN		x	e	*	*	*		-	27	+•		**	-	-	*	•	*	×	×	24		18		
			۴	*	*	*	*	*	-	+4	+-	-		-	-	-		,	z	×	*		10	
	Υ.	18	÷.	1		-		-	++			++	-		++		-	-		*	~	+	Υ.	
	ŝ.		4					+	-	-	+	11	-			-		-	-	-	1		- 6	
	ï	1			-	2.	4	+				-14				-	2	-	1	-	1		1	
	\mathbf{r}		. 1	100	2			10		1	\sim	1									Δ.	$\sim \epsilon$	1.5	
	×.		x	1	-				-	-	4			-	-	-				-	1		10	
	r,		-	12		4					4						4			2	Ŷ	14		
	8	1	1	1			1	1	1		-	ut.		-		1	2	•			1	100	- 57	
	£		1	1	*		•	•		-	÷	1	-	-	-				*	1	e	1	- 80	
	ţ.	1	×	2			84								-	2	•		٠	x	*	4	ţ	
	L	1	k	1	. *	×.	.*	13			10			-	-	\mathcal{L}	35		×	*	ź	1	1	
	1	1	1	1	*	×		÷									1	5	1	÷	ž	1	T.	
	1	1	1	1	r.	1	1										1	÷	4	1	1	1	1	
	1	x	1	1	A	1		- 5	1	1	÷		1	-		1	X	÷,	t	\mathcal{I}	1	1	1	

Abbildung 7.8: Hauptdehnungen des unteren Abschlusses aus vertikaler Druckbeanspruchung



Abbildung 7.9: Hauptspannungen des unteren Abschlusses aus vertikaler Druckbeanspruchung



Abbildung 7.10: Schubspannungen des unteren Abschlusses aus vertikaler Druckbeanspruchung



Abbildung 7.11: Querzugspannungen des unteren Abschlusses aus vertikaler Druckbeanspruchung

7.1.4 Auflagerdrehwinkel der Decken

Bei Außenwänden, die aus Gründen der Wärmedämmwirkung eine große Dicke haben, kann die Biegesteifigkeit der Wand so groß werden, dass die Annahme einer gelenkigen Verbindung der Wand mit den Decken nicht mehr zulässig ist. Da das obere und untere Randprofil nicht zugfest an die Decke angeschlossen ist, wird die Wand bei entsprechendem Deckendrehwinkel an der Unterseite innen und die Decke an der Oberseite der Wand außen abheben, so dass die innenseitige Deckschicht an der Oberseite und die außenseitige Deckschicht an der Unterseite alle Kräfte aufnehmen muss (Abbildung 7.12). Dieser Effekt könnte für die Weiterleitung der Druckkräfte einfach durch einen Beiwert von etwa 0,5 berücksichtigt werden. Die Wände wären dennoch wirtschaftlich, da die Lasten der Außenwände i. d. R. geringer sind als die Lasten der schlanken Innenwände. Aus der Verformung ergibt sich für eine Wand der Höhe I und einer Dicke a unter der Druckkraft F aber auch eine große Querkraft in Höhe von etwa $V = F \cdot a/l$, die sich aus der Überleitung der Kräfte von der einen Deckschicht in die andere ergibt. Bei einer Wandhöhe von etwa 2,5 m und einer Wanddicke von 0,25 m beträgt diese Kraft etwa 1/10 der Längskräfte. Diese Querkraft ist wesentlich größer als die Querkräfte aus allen anderen Situationen. Eine Querkraft in dieser Größe kann durch die Materialien, die für den Kern vorgesehen sind nicht aufgenommen werden. Für solche Wände sollte eine Randabschluss gewählt werden, der planmäßig nur die innenseitige Deckschicht beansprucht (Abbildung 7.12 b) und c)). Die außenseitige Deckschicht dient dann nur zur Erhöhung der Biegesteifigkeit und zur Knickaussteifung und könnte entsprechend dünner ausgebildet werden. Diese Konstruktion sollte in einem weiterführenden Forschungsprojekt untersucht werden. Bisher sind aus dem Holzbau keine Untersuchungen zu diesem Thema bekannt, obwohl das Problem auch bei anderen Außenwandkonstruktionen, etwa bei Tafeln mit profiliertem Querschnitt der Rippen, in gleicher Art besteht.



Abbildung 7.12: a) Exzentrische Lasteinleitung durch Auflagerdrehwinkel bei dicken Außenwänden, b) Außenwand mit planmäßig einseitiger Lagerung der inneren Deckschicht, c) Konstruktion des Randabschlusses zur planmäßig einseitigen Lagerung der Wand

7. 1.5 Konsollasten

Nichttragende Wände müssen in der Lage sein, Konsollasten aus Schränken und Regalen aufzunehmen. Hierzu ist eine charakteristische Linienlast von 0,4 kN/m anzunehmen, die in einem Abstand von 0,3 m von der Oberfläche der Wand wirkt. Das aus dieser Exzentrizität folgende Moment wird über ein Kräftepaar aufgenommen, das ebenfalls einen Hebelarm von 0,3 m hat (Abbildung 7.13). Die Größe dieser Einwirkung ist für die Verbundwände gering und für die Bemessung nicht relevant. Wegen der geringen Querzugfestigkeit des Materials des Kerns kann die Lasteinleitung der Zugkraft aus dem Moment allerdings kritisch sein.



Abbildung 7.13: Konsollast

Die Querzugbeanspruchung unter einer horizontalen Zugkraft kann näherungsweise ermittelt werden, indem man die Deckschicht als auf dem Kern gebetteten Balken betrachtet. Die Steifigkeit der Bettung kann beim vorliegenden System jedoch nicht genau angegeben werden, da sich die ganze Konstruktion mitverformen kann. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten wurde die Wandkonstruktion deshalb in einer FE-Simulation untersucht. Die folgenden Bilder zeigen die Ergebnisse der Simulation an einer Wand mit einem 160 mm dicken Kern und Deckschichten aus 16 mm OSB. Als Last wurde eine Einheitslast von 1,0 kN/m als horizontale Zuglast oben und im Abstand von 0,3 m darunter als Drucklast angenommen. Dieses entspricht etwa der 1,5-fachen nach DIN 4103 und DIN 1055 anzusetzenden Bemessungslast von 1,5 \cdot 0,4 = 0,6 kN/m.

In Abbildung 7.14 sieht man stark überhöht die Verformungen der Wand. Der Maximalwert der horizontalen Verformung unter der Last von 1 kN/m beträgt 0,4 mm. Man sieht auf der linken lastabgewandten Seite die weiche S-förmige Verformung der gesamten Wand. Die rechte Deckschicht ist durch die Lasteinleitung wesentlich stärker gekrümmt, sie wirkt bei der stark überhöhten Darstellung der Verformungen fast wie geknickt. Die größte örtliche Biegespannung der Deckschicht beträgt an der Lasteinleitungsstelle 1,02 N/mm². Die Querzugspannung unter der Konsollast von 1 kN/m erreicht an der Stelle der Lasteinleitung ein Maximum von 0,010 N/mm². Wie in Abbildung 7.15 zu erkennen ist, fällt der Wert schnell auf weniger als die Hälfte ab, so dass eine geringfügige lokale Überschreitung des Bemessungswertes der Querzugfestigkeit wegen der Umlagerungsmöglichkeiten hingenommen werden könnte.

Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Materialien und Dicken für die Beplankung ergaben teilweise geringfügig höhere Querzugbeanspruchungen. Für das Material des Kerns ergibt sich aus der Einleitung der Zugkraft aus einer Konsollast die Forderung nach einem Bemessungswert der Querzugfestigkeit von etwa 0,01 N/mm2, wenn kein genauerer rechnerischer oder experimenteller Nachweis geführt werden soll.



Abbildung 7.14: Verformungen aus Konsollast Abbildung 7.15: Querzugspannungen aus Konsollast

7.1.6 Wände mit Öffnungen

Nach dem Konzept für die Verbundwände lassen sich Öffnungen für Türen und Fenster aus den großflächig hergestellten Wänden nachträglich herausschneiden. Die Steifigkeit und Tragfähigkeit der Deckschichten reicht zumindest bei kleineren Öffnungen aus, um die Kräfte aus dem Bereich der Öffnungen in die Nachbarbereiche zu übertragen und dort aufzunehmen. Im normalen Tafelbau, reichen die Verbindungen zwischen den einzelnen Platten in der Regel aus, um die Schubkräfte aufnehmen zu können. Zugfeste Verbindungen, die für die Übertragung von Kräften aus dem Bereich der Öffnung nach Schubfeldtheorie oder bei Berechnung als Rahmentragwerk erforderlich sind, sind nur sehr schwer herstellbar. Wände mit Öffnungen werden im Tafelbau deshalb in einzelne rechteckige Tafeln ohne Öffnung aufgeteilt. Die gestörten Bereiche werden nur als Lasteinzugsgebiet für die Nachbarbereiche berücksichtigt Bei der Verbundwand können die großflächigen Deckschichten, da sie nicht gestoßen sind, auch Druck- Zug- und Biegebeanspruchungen aufnehmen. Der Nachweis der Tragfähigkeit kann an einfachen ingenieurmäßig gewählten Rahmenmodellen erfolgen, wobei nur die Steifigkeiten der Deckschichten berücksichtigt werden. Die für übliche Rahmentragwerke viel zu dünnen Deckschichten, die sofort Kippen bzw. ausbeulen würden, werden durch die Kernschicht ausgesteift. Beim Nachweis der Tragfähigkeit sollten die Festigkeiten, da mit grobvereinfachten Systemen gerechnet wird, nur zu etwa 50% ausgenutzt werden. Beulen beziehungsweise Knicken und Kippen kann näherungsweise durch das Berechnen eines Ersatzdruckstabes aus über den Kern nachgiebigverbundenen Deckschichten berücksichtigt werden. Die genauere Untersuchung solcher Tragsysteme könnte ggf. in einem gesonderten Forschungsprojekt erfolgen.

7.1.7 Überlagerung von Beanspruchungen

Allgemeines

Alle Einwirkungen sind nach den Regelungen der DIN 1055-100 und DIN 1052 zu kombinieren und die Konstruktion für die ungünstigste Kombination zu bemessen. Einige Sonderfälle sind im Folgenden untersucht.

Einzellasten

Die Verbundwand ist nicht geeignet größere Einzellasten aufzunehmen (Abbildung 7.16). Einzellasten müssen, wenn sie durch die Verbundwand aufgenommen werden sollen, durch ein Verteilerholz auf eine für die Tragfähigkeit der Verbundwand ausreichende Länge verteilt werden. Da dieses wirtschaftlich und konstruktiv nur für geringe Kräfte möglich ist, müssen größere Einzellasten, wie auch im Holztafelbau üblich, von zusätzlichen Rippen übertragen werden.



Abbildung 7.16: Verbundwand unter Streckenlast sowie unter Streckenlast und Einzellast mit zusätzlicher Rippe

Wände ohne Zugverankerung oder ohne Druckrandrippe

Wenn die vertikale Last einer Wand ausreichend groß ist, um die Ankerkraft zu überdrücken, ist für die Wand kein Zuganker erforderlich. Wenn außerdem die Drucktragfähigkeit des Verbundquerschnitts ausreicht, entfällt zumindest aus statischer Sicht die Notwendigkeit der vertikalen Abschlussprofile. Die Größe der Druckbeanspruchung kann entsprechend den Gleichungen für den Spannungsnachweis mit klaffender Fuge aus dem Grundbau bzw. Mauerwerksbau erfolgen, wobei ein linearer Spannungsverlauf angenommen wird (Abbildung 7.17 a). Grundsätzlich sind aus Gründen der Lagesicherheit Wände ohne Zuganker jedoch nur möglich, wenn die Wirkungslinie der resultierenden Kraft aus F und V innerhalb der Unterseite der Wand verläuft. Damit sind bei Kleintafeln, wie in Abbildung 7.17 dargestellt nur sehr geringe Horizontalkräfte möglich. Wenn bei der Planung auf die Lage und eine ausreichende Länge der aussteifenden Wände geachtet wird, sind jedoch durchaus Grundrisse denkbar, bei denen eine Abtragung der Horizontalkräfte durch besonders wirtschaftliche Wände ohne Verankerung und ohne vertikale Randabschlüsse erfolgen kann.

Eine etwas größere Beanspruchbarkeit für Horizontalkräfte ist mit der Annahme einer konstanten Druckspannung (Abbildung 7.17 b) im unteren Anschluss möglich. Bei duktilen Materialien ist ein solcher Spannungsverlauf im Sinne der Traglasttheorie möglich. Die Druckverbindung bei Holzkonstruktionen quer zur Faser hat normalerweise einen großen plastischen Bereich, so dass hierfür eine Traglastberechnung zulässig ist. Die Traglasttheorie ist im Holzbau gegenwärtig noch nicht anwendbar, da es noch keine ausreichenden Untersuchungen und Erfahrungen damit gibt. Insbesondere fehlen für die hier vorliegende Anwendung die bei der Bemessung einzuhaltenden Bedingungen und die den Grenzzustand definierenden Kennwerte wie zulässige Fugenweiten im abhebenden Bereich, zulässige plastische Verformungen und Spannungen bei plastifizierender Druckschwelle. Abbildung 7.18 zeigt die vertikalen Spannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit in einer Verbundwand aus einer FEM-Simulation mit linear-plastischer Kraftdehnungsbeziehung im unteren Kontaktbereich. Die Berechnung wurde bei einer maximalen Verformung von 100 mm abgebrochen. Über die FE-Methode ist die Berechnung der Systeme mit entsprechenden nichtlinearen Materialgesetzen problemlos möglich. Für die praktische Anwendung ist eine Simulation noch immer zu aufwendig. Über Parameterstudien lassen sich die Einflüsse abschätzen und vereinfachte mechanische Modelle entwickeln, die dann zu einfachen Bemessungsgleichungen nach Traglasttheorie führen.



Abbildung 7.17: Wände ohne vertikalen Randabschluss: a) mit linearer Spannungsverteilung, b) mit konstanter Spannungsverteilung



Abbildung 7.18: Druckspannungsverlauf in einer Verbundwand ohne vertikale Randabschlüsse nach einer nichtlinearen FEM-Simulation mit linear- vollplastischer Kraftdehnungsbeziehung im Druckkontaktbereich: a) F/V = 5/1, b) F/V = 10/1

Als Sonderfall ist auch eine Konstruktion denkbar, bei der ein Zuganker und der Randabschluss auf der Zugseite vorhanden ist, auf der Druckseite jedoch nicht, oder bei der der Randabschluss mit der Unterkonstruktion nicht ausreichend steif verbunden ist. In diesem Fall kann der Nachweis mit dem statischen Modell nach Abbildung 7.19 a), oder bei Annahme eines plastischen Grenzzustandes nach Abbildung 7.19 b) erfolgen. Durch die Horizontalkraft V erhöht sich bei Wänden ohne Abschlussprofil an der Druckseite die Druckbeanspruchung der Wand bei kurzen Wänden erheblich. Die Tragfähigkeit für Horizontallasten ist bei kurzen Wänden und bei Wänden mit geringer Auflast dennoch erheblich größer als bei Wänden ohne Anker. In vielen Fällen wird die Drucktragfähigkeit für solche Konstruktionen ausreichen. Solche Wände können jedoch nur Horizontalkräfte in einer Richtung aufnehmen, da sie auf der anderen Seite keinen Randabschluss und keinen Anker haben. Da die Horizontallasten üblicherweise aus Wind- oder Aussteifungslasten in jeder Richtung wirken können, sind bei solchen aussteifenden Systemen immer mindestens 2 Wandabschnitte mit Ankern an gegenüberliegenden Seiten erforderlich, da für die entsprechende Kraftrichtung jeweils nur der Abschnitt mit der passenden Zugverankerung wirksam ist.



Abbildung 7.19: Wände ohne Randabschluss an der Druckseite

7.1.8 Verformungen und Beanspruchungen aus Feuchtedifferenzen

Holzwerkstoffe haben im Verhältnis zu anderen Baustoffen große feuchteabhängige Dehnungen. Bei Vollholz sind diese senkrecht zur Faser besonders groß und führen zu der Forderung, Holz immer mit Gleichgewichtsfeuchte einzubauen. Praktisch bedeutet dieses, dass Holzbauteile aus technisch getrocknetem Holz herzustellen sind. Bei Wänden aus Holzwerkstoffen ergeben sich in dieser Hinsicht keinerlei Probleme. Bei sehr dünnen raumabschließenden Wänden aus Materialien mit großen Ausdehnungskoeffizienten kann aber auch schon ein unterschiedliches Klima in den anliegenden Räumen zu Verformungen führen, die die Gebrauchstauglichkeit und unter Umständen, etwa bei auf Druck beanspruchten Wänden, auch die Tragsicherheit beeinträchtigen. Aus diesem Grunde wurden die Verformungen solcher Wände abgeschätzt.



Abbildung 7.20: Dampfdruckverlauf in Verbundwänden bei Deckschichten mit unterschiedlichem Wasserdampfdiffusionswiderstand

Für die Berechnung dieser Verformungen muss die Differenz der mittleren Materialfeuchte der beiden Deckschichten bekannt sein. Die Feuchte des Kerns kann wegen der geringen Steifigkeit des Kerns vernachlässigt werden. Die Feuchte der Deckschichten wird durch den Wasserdampfteildruck in den anliegenden Räumen und durch den daraus folgenden Wasserdampfdruckverlauf in der Wand beeinflusst. Abbildung 7.19 zeigt beispielhaft mögliche Situationen für den Wasserdampfdruckverlauf in Wänden. Bei Deckschichten mit einem im Verhältnis zum Kern großen Diffusionswiderstand beträgt der Dampfdruckunterschied zwischen den Mittelebenen der Deckschichten etwa 50% des Dampfdruckunterschieds der Räume. Bei Deckschichten mit geringem Dampfdiffusionswiderstand oder ähnlichem Dampfdiffusionswiderstand wie dem Kern kann der Dampfdruckunterschied der Mittelebenen der Deckschichten mit dem Dampfdruckunterschied der Räume gleichgesetzt werden. Auf der sicheren Seite liegend wird zur Abschätzung der Verformungen für die Deckschichten jeweils die Gleichgewichtsfeuchte zur Feuchte des Raumes auf der zugehörigen Seite angesetzt.

Die Krümmung eines Stabes mit einem Mittelabstand der Deckschichten a_1 und einer Dehnungsdifferenz der Deckschichten $\Delta \epsilon$ ergibt sich bei zwängungsfreier Lagerung des Stabes zu

 $\kappa = \Delta \epsilon / a_1$

(Gl. 7.20)

Die seitliche Verformung des Stabes u ergibt sich als Höhe des Stichs eines Kreisbogens mit dem Radius $1/\kappa$ und der Bogenlänge I. Bei dem bei Wänden im Verhältnis zur Bogenlänge extrem großen Krümmungsradius ergibt sich die seitliche Verformung des Stabes ausreichend genau zu:

$$\mathbf{u} = \frac{\Delta \varepsilon}{8 \cdot a_1} \cdot \ell^2 \tag{GI. 7.21}$$

Diese Gleichung wurde für typische Materialeigenschaften und Feuchtedifferenzen ausgewertet. Für Innenwände wurde eine Holzfeuchtedifferenz von 6%, für Außenwände von 12% angesetzt. Die Abbildungen 7.21 und 7.22 zeigen die horizontalen Verformungen der Wände in % der Wandlänge in Abhängigkeit von der Wandschlankheit für Ausdehnungskoeffizienten der für Deckschichten verwendbaren Werkstoffe. Die Verformungen liegen bei üblichen Wandschlankheiten in der Größenordnung der in den Bemessungsnormen vorgeschriebenen Imperfektionen. Bei der Bemessung sind diese Verformungen also näherungsweise durch die Imperfektionsannahmen abgedeckt.



Abbildung 7.21: Verformungen aus Feuchtedifferenzen der Deckschichten bei Innenwänden



Abbildung 7.22: Verformungen aus Feuchtedifferenzen der Deckschichten bei Außenwänden

Die oben hergeleiteten Gleichungen gelten streng nur für Stäbe und nicht für flächige Bauteile. Für flächige Bauteile wurde deshalb eine Vergleichsrechnung mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen b/l durchgeführt. Abbildung 7.23 zeigt die Verformungen einer Platte mit statisch bestimmter, zwängungsfreier Lagerung. Die verformte Struktur hat die Form eines Kugelsegments. Die größte Verformung ergibt sich nach der o. g. Gleichung, wenn als die Länge I die Länge der Diagonalen eingesetzt wird.



Abbildung 7.23: Höhenlinien, Verformungen aus Feuchtedifferenz, zwängungsfrei gelagerte Platte

In Abbildung 7.24 sieht man, dass sich die Verformungen bei einer Linienlagerung an der Ober- und Unterseite, wie sie bei Wänden durch die Verbindung zu den Decken üblicherweise gegeben ist, zylinderförmig einstellt. Nur an den seitlichen Rändern ergibt sich eine abweichende Form. Der Maximalwert der Verformung wird durch die Höhe der Wand bestimmt und weicht nur geringfügig von der Verformung eines Stabes mit einer Länge gleich der Höhe der Wand ab. Für die Abschätzung der Verformungen einer Wand aus feuchtebedingten Dehnungen kann deshalb die oben und unten liniengelagerte Wand wie ein Stab mit einer Länge gleich der Höhe der Wand betrachtet werden.



Abbildung 7.24: Höhenlinien, Verformungen aus Feuchtedifferenz, oben und unten liniengelagerte Platte

7.2 Experimentelle Untersuchungen

7.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen an kleinen Prüfkörpern

7.2.1.1 Ergebnisse der Untersuchungen am Verbundquerschnitt

Die Werte in den Tabellen 7.1 und 7.2 sind Mittelwerte aus Versuchserien mit jeweils 5 Prüfkörpern. In Tabelle 7.2 ist im Vergleich zu den Ergebnissen der Prüfungen an streifenförmig verklebten Prüfkörpern ein Spalte mit aufgenommen worden, in der Ergebnisse von Prüfungen an Prüfkörpern mit vollflächiger Verklebung der Deckschichten mit dem Kern aufgeführt sind (Gipsfaserplatte + Holzfaserdämmplatte ρ = 320 kg/m³, vollflächig verklebt).

Kennwerte in N/mm ²	OSB + Holzfaser- dämmplatte ρ = 320 kg/m ³	OSB + Holzfaser- dämmplatte ρ = 250 kg/m ³	OSB + Waben- karton	OSB + Well- pappe
Biegefestigkeit in Längsrichtung	3,80	2,69	2,46	3,27
E-Modul	384	288	197	271
Biegefestigkeit in Querrichtung	2,47	1,60	1,23	1,93
E-Modul	284	257	111	551
Schubfestigkeit in Längsrichtung	0,10	0,05	0,04	0,04
Schub-Modul	4,2	3,3	2,6	1,9
Schubfestigkeit in Querrichtung	0,10	0,07	0,02	0,09
Schub-Modul	3,6	2,9	1,0	4,5
Zugfestigkeit quer zur Tafelebene nur der Kern	0,12	0,06	0,04	0,83
Zugfestigkeit quer zur Tafelebene Verbundquerschnitt	0,04	0,02	0,01	0,10
Druckfestigkeit quer zur Tafelebene nur der Kern	0,59	0,30	0,12	0,68
Druckfestigkeit quer zur Tafelebene Verbundquerschnitt	0,61	0,41	0,13	0,79
Rohdichte des Kerns kg/m ³	310	249	24	85

Tabelle 7.1: Ergebnisse aus den Voruntersuchungen zur Ermittlung von Materialkennwerten mit Deckschichten aus OSB

Tabelle 7.2: Ergebnisse aus den Voruntersuchungen zur Ermittlung von Materialkennwerten mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten

Kennwerte in N/mm²	Gipsfaserplatte + Holzfaserdämmplatte p = 320 kg/m ³ vollflächig verklebt	Gipsfaser + Holzfa- serdämmplatte ho = 320 kg/m ³	Gipsfaser + Holzfa- serdämmplatte p = 250 kg/m ³	Gipsfaser + Waben- karton	Gipsfaser + Wellpappe
Biegefestigkeit in Längs- richtung	3,33	2,50	1,39	0,99	0,96
E-Modul	548	377	238	285	344
Biegefestigkeit in Quer- richtung	2,83	2,09	1,32	0,87	1,23
E-Modul	534	350	234	179	545
Schubfestigkeit in Längs- richtung	0,25	0,11	0,03	0,03	0,05
Schub-Modul	6,5	3,2	1,7	1,9	2,6
Schubfestigkeit in Quer- richtung	0,23	0,13	0,04	0,02	0,05
Schub-Modul	6,9	4,0	2,3	1,1	3,1
Zugfestigkeit quer zur Tafelebene Verbundquer- schnitt		0,03	0,02	0,02	0,09
Druckfestigkeit quer zur Tafelebene Verbundquer- schnitt		0,66	0,35	0,12	0,57
Rohdichte des Kern kg/m ³	310	310	249	24	85

Aus den Ergebnissen der Prüfungen an Prüfkörpern mit einem Kern aus Holzfaserdämmplatten lässt sich erwartungsgemäß deutlich ein Einfluss der Rohdichte der Holzfaserdämmplatten erkennen. Die Prüfungen an Prüfkörpern mit einem Kern aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von ca. 320 kg/m³ haben durchweg höhere Werte geliefert als die Prüfungen an Prüfkörpern mit einem Kern aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von ca. 250 kg/m³.

An den Prüfkörpern mit einem Kern aus Wabenkarton wurden nahezu durchgängig die schlechtesten Werte ermittelt. Bei den Prüfungen an Prüfkörpern mit einem Kern aus Wellpappe konnten teilweise – aber nicht durchgängig – Werte ermittelt werden, die höher waren als bei Prüfkörpern mit einem Kern aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von ca. 320 kg/m³.

Biegeversuche

In Abbildung 7.25 ist die mit einem Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem Kern aus Wabenkarton bestückte Prüfmaschine abgebildet. Die in den Tabellen 7.1 und 7.2 angegebenen Werte sind an dem Verbundelement mit den Abmessungen für den gesamten Verbundquerschnitt ermittelt worden. Die Vorgehensweise wurde angelehnt an die Durchführung der Biegeversuche bei Spanplatten, die in den Deckschichten auch andere Materialeigenschaften aufweisen als in den Mittelschichten. In Abbildung 7.26 ist als typisches Versagensbild eines Prüfkörpers nach einem Biegeversuch ein Schub-

bruch zwischen Kern und Deckschichten in Auflagernähe mit einem Kern aus Wabenkarton dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Tabelle 7.2 lässt sich ein Einfluss der Art der Verklebung daran erkennen, dass die Werte der Prüfungen mit Prüfkörpern, bei denen die Deckschichten vollflächig mit dem Kern verklebt waren, durchgängig um den Faktor 1,3 bis 1,5 höher waren als bei Prüfkörpern, bei denen die Deckschichten streifenförmig mit dem Kern verklebt waren.



Abbildung 7.25: Biegeprüfung mit der Dreipunktprüfung an einem Prüfkörper mit Deckschichten aus OSB und einem Kern aus Wabenkarton



Abbildung 7.26: Typisches Versagensbild bei den Biegeprüfungen mit einem Kern aus Wabenkarton

Schubversuche

In den Tabellen 7.1 und 7.2 sind jeweils die Mittelwerte der Prüfserien angegeben. In Abbildung 7.27 ist ein Prüfkörper mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem Kern aus Wellpappe dargestellt. In Abbildung 7.28 ist als typisches Versagensbild ein Abscheren der Deckschichten vom Kern der Prüfkörper zu erkennen.

Aus den Ergebnissen der Tabelle 7.2 lässt sich ein Einfluss der Art der Verklebung daran erkennen, dass die Werte der Prüfungen mit Prüfkörpern, bei denen die Deckschichten vollflächig mit dem Kern verklebt waren, durchgängig um den Faktor 1,1 bis 2,3 höher sind als bei den Prüfkörpern, bei denen die Deckschichten streifenförmig mit dem Kern verklebt waren.

Da einige Werte sehr niedrig waren und große Streuungen aufwiesen, können hier nur Tendenzen aufgezeigt werden.



Abbildung 7.27: Prüfkörper im Schubversuch mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem Kern aus Wabenkarton



Abbildung 7.28: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers im Schubversuch mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten und einem Kern aus Wabenkarton

Zug- und Druckversuche

Aus den Werten in Tabelle 7.1 ist deutlich zu erkennen, dass bei allen Prüfkörpern die Verklebung der Deckschicht mit dem Kern den Schwachpunkt darstellt. Bei den Querzugprüfungen des Kerns wurden durchweg um den Faktor 3 bis 4 höhere Werte gemessen als bei den Querzugprüfungen des Verbundquerschnittes. Bei den Prüfungen mit einem Kern aus Wellpappe lag der Faktor sogar über 8. Das Versagen trat dabei nicht in der Klebefuge sondern im Material des Kerns auf. Durch die nur streifenförmige Verklebung konzentrierten sich die Kräfte auf den Bereich des Klebstoffauftrages. Bei einer vollflächigen Verklebung der Deckschichten mit dem Kern werden die Werte der "Zugfestigkeit quer zur Tafelebene Verbundquerschnitt" gleich sein mit den Werten der "Zugfestigkeit quer zur Tafelebene nur der Kern". Da alle Werte aber gering waren und große Streuungen aufwiesen, sollen hier ebenfalls nur Tendenzen aufgezeigt werden.

Die Werte der "Druckfestigkeit quer zur Tafelebene nur der Kern" und "Druckfestigkeit quer zur Plattenebene Verbundquerschnitt" sind erwartungsgemäß vergleichbar. Die Unterschiede sind innerhalb der Schwankungsbreite der Materialeigenschaften zu sehen.

7.2.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen am Randabschluss

In Tabelle 7.3 sind die Mittelwerte der ermittelten Maximalkräfte und Bettungsmodule aus einer Serie von jeweils 6 Prüfkörpern unterschiedlicher Anschlussvarianten des Randabschlusses aufgeführt. Die Belastungsrichtung verlief rechtwinklig zum Randabschluss. Weiterhin wurden Untersuchungen über das Tragverhalten der Anschlussvarianten bei Beanspruchung parallel zum Randabschluss und unter einem Winkel von 45° durchgeführt. Im Anhang 1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen ausführlich in Diagrammen dargestellt.

Kennwerte	OSB + Recht- eckprofil geklebt	OSB + Hutpro- fil geklebt	OSB + Hutpro- fil geklammert	Gipsfaser + Rechteckprofil geklebt	Gipsfaser + Hutprofil geklebt	Gipsfaser + Hutprofil ge- klammert
Maximalkraft [kN/20 cm]	11,4	30,6	30,1	10,0	18,7	30,3
Bettungsmodul [N/mm]	13867	25537	17477	13757	20066	16504

Tabelle 7.3: Maximalkräfte und Bettungsmodule unterschiedlicher Varianten des Randabschlusses

In den Abbildungen 7.29 und 7.30 erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten maximalen Kräfte der geprüften Anschlüsse bei Beanspruchung rechtwinklig zum Randabschluss. Die Ergebnisse geben nur Werte für den Randabschluss an kleinen, fehlerfreien Proben wieder und berücksichtigen keine Fertigungstoleranzen und Unregelmäßigkeiten des Holzes. Die Werte beziehen sich immer auf eine 20 cm lange Anschlussfläche und sind Mittelwerte aus jeweils 6 Prüfkörpern. Deutlich sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Anschlussvarianten zu erkennen.

Es zeigte sich bei den Prüfungen mit Beanspruchung rechtwinklig zum Randabschluss, dass der geklammerte Randabschluss mit dem Hutprofil eine geringfügig höhere Steifigkeit gegenüber dem ausschließlich geklebten Randabschluss hat, aber eine wesentlich höhere Tragfähigkeit. Der geklebte Randabschluss mit Rechteckprofil weist erwartungsgemäß die niedrigsten Werte auf, da ein sprödes Versagen eintritt und das Holz des Randprofils auf Rollschub beansprucht wird.



Gipsfaserplatten

Abbildung 7.29: Maximale Prüfkraft in N als Mittelwert aus einer Serie von jeweils 6 Prüfkörpern an 20 cm langen Prüfkörpern mit Deckschichten aus Gipsfaserplatten. Beanspruchung des Prüfkörpers rechtwinklig zum Randabschluss.



Abbildung 7.30: Maximale Prüfkraft in N als Mittelwert aus einer Serie von jeweils 6 Prüfkörpern an 20 cm langen Prüfkörpern mit Deckschichten aus OSB. Beanspruchung des Prüfkörpers rechtwinklig zum Randabschluss.

7.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an großen Prüfkörpern

7.2.2.1 Ergebnisse der Schubversuche (Horizontallasten)

Die Wandelemente sollen zur Gebäudeaussteifung mit herangezogen werden. Für diesen Anwendungsbereich ist die Aufnahme und Weiterleitung von Horizontalkräften wichtig. Diese werden im herkömmlichen Holztafelbau in die Kopfrippe eingeleitet. Die Wandtafel leitet diese Kräfte dann wiederum weiter in das Fundament oder andere lastabtragende Bauteile. Im herkömmlichen Holztafelbau übernehmen die vertikalen Randrippen eine entscheidende Funktion, da sich in diesen ein Kräftepaar bildet, welches dem Moment entgegenwirkt, das sich aus Horizontalkraft und der Tafelhöhe um den Wandfuß bildet.



Abbildung 7.31: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schubprüfungen an Wandtafeln mit umlaufendem Randabschluss

Abbildung 7.31 zeigt zusammengefasst die maximalen Horizontalkräfte aus den Schubprüfungen an Wandtafeln mit umlaufendem Randabschluss. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wahl des Deckschichtmaterials einen erheblichen Einfluss auf das Tragverhalten hat. In Abbildung 7.32 sind die Ergebnisse der Schubprüfungen an Wandtafeln mit teilweisem Randabschluss dargestellt. Auch hier zeigt sich der Einfluss des Deckschichtmaterials auf das Tragverhalten. Bei diesen Varianten wird aber im Vergleich zu den umlaufenden Randabschlüssen ein größerer Einfluss des Kernmaterials auf die Tragfähigkeit erkenntlich. Im Anhang 2 sind die Prüfprotokolle zu den einzelnen Prüfungen aufgeführt.



Abbildung 7.32: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schubprüfungen an Wandtafeln mit teilweisem Randabschluss

Setzt man einen globalen Sicherheitsfaktor von 3 an, so erfüllen sämtliche geprüften Varianten mit umlaufendem Randabschluss die zu Beginn definierten Anforderungen an das Tragverhalten unter horizontaler Beanspruchung.

Die Tragfähigkeit der Variante mit teilweisem Randabschluss ist erheblich geringer. Da auf der Zugseite ein Randabschluss zur Verankerung erforderlich ist, die Zugseite aber bei den typisch in beiden Richtungen wirkenden Horizontallasten aber wechselt, sollte im Normalfall ein umlaufender Randabschluss vorgesehen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zum einen die Wahl der Deckschicht einen erheblichen Einfluss auf das Tragverhalten der Wandelemente hat, zum anderen beeinflusst das Kernmaterial das Tragverhalten, wobei der Einfluss des Kerns bei umlaufendem Randabschluss geringer ist als bei teilweisem Randabschluss. Der Einfluss des Kerns ist in den aufgeführten Beispielen so deutlich zu erkennen, weil das gesamte Wandelement mit dem Kern gefüllt war. Durch die Verklebung der Deckschichten mit dem Randabschluss und dem Kern erfolgte auch eine teilweise Verklebung des Kerns mit dem Randabschluss.

Da auch Elemente z.B. mit einem Installationskanal herstellbar sein sollen, muss der Fall betrachtet werden, dass der Kern keinen Kontakt zum Randabschluss hat. Bei den Elementen mit umlaufendem Randabschluss konnte kein signifikanter Einfluss des Kernmaterials auf das Tragverhalten unter horizontaler Beanspruchung festgestellt werden. Daher und aus den Ergebnissen der analytischen Untersuchungen kann unterstellt werden, dass Elemente z.B. mit einem Installationskanal unabhängig von der Art des Kernmaterials realisierbar sind.

Das Tragverhalten und die Tragfähigkeit eines Verbundelements im Lastfall "Wind in Wandebene" werden somit von vielen Eigenschaften beeinflusst:

- Art und Dicke des Deckschichtmaterials
- Art und Material des Randabschlusses
- Art der Verbindung zwischen Deckschicht und Randabschluss
- Steifigkeit der Verbindung des vertikalen Randabschlusses mit der Unterkonstruktion
- Umlaufender / nicht umlaufender Randabschluss
- Art und Dicke des Kernmaterials
- Anschluss des Kerns an den Randabschluss

Vorgenannte Eigenschaften sind in Bezug auf ihren Einfluss auf das Tragverhalten unterschiedlich stark zu bewerten. Die Höhe des Einflusses ist durch analytische Methoden abschätzbar. Die Konstruktion kann weitestgehend an die Anforderungen bei unterschiedlichen Anwendungen angepasst werden.

7.2.2.2 Ergebnisse der Druckversuche (Vertikallasten)

Abbildung 7.33 zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse mit der maximalen Kraft in kN pro laufenden Meter Wandlänge. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus Prüfserien mit jeweils 3 Einzelprüfungen.

Die angegebene Kraft in kN/m ist die Kraft bei Versagen des Elementes. Das Versagenskriterium war grundsätzlich ein Versagen der Klebefuge zwischen der Deckschicht und dem Kern oder innerhalb des Kerns. Dieses Versagen wurde durch die unterschiedliche Ausbildung des Randabschlusses mehr oder weniger schnell herbeigeführt. Das geklammerte Hutprofil erwies sich dabei als am besten geeignet.

Im Anhang 3 sind Diagramme der einzelnen Prüfserien aufgeführt, aus denen das Beulverhalten in Anhängigkeit von Prüfkraft und Prüfzeit ersichtlich wird.



Abbildung 7.33: Maximale Vertikalkraft der Verbundelemente in kN/m

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wird offensichtlich erkennbar, dass die Art des Randabschlusses, mit oder ohne Hutprofil, einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten der Wand hat. Die Dicke der Wand hat bei üblichen Außenwanddicken über 16 cm keinen wesentlichen Einfluss mehr auf das Tragverhalten der Wand unter Normalbeanspruchung, da die Tragfähigkeit des Randabschlusses in der Regel maßgebend wird. Das Tragverhalten der Wand kann z.B. durch größere Beplankungsdicken weiter erhöht werden. Bei statisch geringer beanspruchten Wänden kann eine Optimierung der Beplankungsdicke zu dünneren Beplankungen erreicht werden. Weiterhin lässt sich durch die Materialwahl und durch die Ausführung des Randabschlusses die Tragfähigkeit und das allgemeine Tragverhalten der Verbundelemente beeinflussen.

Wichtige Parameter für den Kern sind die Querzugfestigkeit, um ein frühzeitiges Aufspalten des Verbundelementes durch Versagen der Querzugfestigkeit zu verhindern, und die Festigkeit der Klebeverbindung zwischen Kern und Deckschicht. Bei den Prüfungen wurde beobachtet, dass bei allen Prüfkörpern ein Versagen durch Aufspalten des Kerns an den Plattenfugen oder durch Ablösen der Deckschichten vom Kern auftrat.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse der Vertikallastbeanspruchungen, dass selbst der schwächste Prüfkörper mit einer maximalen Beanspruchung von ca. 75 kN die Anforderungen an das Tragverhalten von 20 kN/m in vertikaler Richtung mit einem globalen Sicherheitsfaktor von 3 erfüllen würde. Eine maximale Bruchkraft von fast 300 kN/m wurde bei einem geklammerten Prüfkörper erreicht, der mit Deckschichten aus OSB und einem Hutprofil als Randabschluss hergestellt war.

7.2.2.3 Ergebnisse der hygro-thermischen Untersuchungen

Verformungen im Differenzklima

Da der geplante Wandverbundquerschnitt auch als Raumabschluss von unterschiedlich klimatisierten Räumen oder als Außenwand eingesetzt werden soll, durfte der zu entwickelnde Querschnitt sich nicht übermäßig infolge von Klimadifferenzen zwischen den beiden Bauteiloberflächen verformen. Als Grenzwert wurde ein Stichmaß von ca. 3 mm bei einer raumhohen, also ca. 2,5 m, und ca. 8 cm dicken Wand definiert. Dieses Maß ist angelehnt an die Empfehlungen der DIN 18202 Toleranzen im Hochbau.

In Abbildung 7.34 sind die Verformungen in Plattenmitte aus der Wandebene heraus für den Prüfkörper mit Gipsfaserplatten als Deckschicht in Abhängigkeit vom Wechselklima auf einer der beiden Wandoberflächen aufgeführt. Eine Seite der Wand wurde kontinuierlich mit dem Klima 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit klimatisiert. In Abbildung 7.35 sind die Verformungen in Plattenmitte aus der Wandebene heraus für den Prüfkörper mit OSB als Deckschicht in Abhängigkeit vom Wechselklima aufgeführt. Auch hier wurde eine Seite der Wand kontinuierlich mit dem Klima 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit klimatisiert.



Beulen Verbundquerschnitt Weichfaserplatte mit Gipsfaserplatte

Abbildung 7.34: Verformungen in Plattenmitte (halbe Wandhöhe) aus der Wandebene heraus für ein Wandelement mit Gipsfaserplatten als Deckschicht und Holzfaserdämmplatten als Kern in Abhängigkeit vom Differenzklima



Abbildung 7.35: Verformungen in Plattenmitte (halbe Wandhöhe) aus der Wandebene heraus für ein Wandelement mit OSB als Deckschicht und Holzfaserdämmplatten als Kern in Abhängigkeit vom Differenzklima

Zum Abgleich der gemessenen Werte an den Wandelementen wurden kleine Materialprüfkörper mit den großen Prüfkörpern im gleichen Klima gelagert, um Längen- und Materialfeuchteänderungen unter Luftfeuchtigkeitsänderungen zu ermitteln.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass sich erwartungsgemäß Verformungen infolge von unterschiedlicher Klimatisierung der Wandoberflächen einstellen. Die Verformungen sind aber trotz der Möglichkeit der zwängungsfreien Einstellung der Verformungen relativ gering. Die Platten beulten sich je nach Klima um weniger als 2 mm zu jeder Seite aus. Um den Einfluss einer Einspannung zu ermitteln, wurden an einem Prüfkörper die frei drehbaren Lager durch eine Einspannung ausgetauscht. Die Folge dieser Änderung der Auflagerbedingungen war ein wesentlich geringeres Beulverhalten unter Einfluss eines Differenzklimas. Die seitlichen Ränder der Prüfwand waren bei dieser Prüfung frei beweglich. In der Bauausführung werden keine freien Wandränder einem Differenzklima unterzogen, so dass aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen der Schluss gefolgert werden kann, dass das Beulverhalten infolge des Einflusses eines Differenzklimas zwar Berücksichtigung finden muss, konstruktive Maßnahmen, wie Verschraubung der Elemente untereinander, aber verhindern, dass diese Verformungen zu Schäden führen. Eine Untersuchung an realitätsnahen Abmessungen bei Wandelementen von mindestens ca. 5 m Länge und Anschlüssen ist in diesem Forschungsvorhaben nicht vorgesehen gewesen, wird aber noch als sinnvoll angesehen, so dass weitere Untersuchungen bis zur Praxisreife durchgeführt werden sollten.

Temperaturverhalten

Die Verbundelemente müssen als Außen-, aber auch als Innenwand, einen möglichst großen Wärmedurchlasswiderstand aufweisen, um eine Raumtemperierung energiesparend betreiben zu können. In herkömmlichen Tafelkonstruktionen bilden die Rippen, im Vergleich zur Dämmung zwischen den Rippen, eine Wärmebrücke. Die Dämmung kann auf ihre ausschließliche Funktion der Wärmedämmung optimiert werden. In den zu untersuchenden Verbundelementen übernimmt die Dämmung (Kern) eine tragende Funktion, so dass die Festigkeitseigenschaften neben den Wärmedämmeigenschaften betrachtet werden müssen. Die bisher untersuchten Varianten sind hauptsächlich auf ihre Festigkeitseigenschaften untersucht worden, da etwas schlechtere Wärmedämmeigenschaften werden können. Mit höheren Festigkeitseigenschaften gehen in der Regel schlechtere Wärmedämmeigenschaften einher.

Abbildung 7.36 zeigt die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit Hilfe der Messung von Grenzschichttemperaturen und des Wärmestroms an einer Weichfaserplatte. Abbildung 7.37 zeigt die Ableitung der Wärmeleitfähigkeit für drei Mitteltemperaturen an einem 66 mm dicken Kern aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von 250 kg/m³. Abbildung 7.38 zeigt die Ableitung des Wärmedurchlasskoeffizienten für drei Mitteltemperaturen.



Abbildung 7.36:; Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit Hilfe von Messungen der Grenzschichttemperaturen und des Wärmestroms; hier: Holzfaserdämmplatte

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lässt sich erkennen, dass bei gleicher Dicke ein Verbundelement mit einem Kern aus der bei den Untersuchungen verwendeten Holzfaserdämmplatte mit einer Rohdichte von 250 kg/m³ vergleichbare Wärmedämmeigenschaften erzielt, wie eine herkömmliche Holztafelkonstruktion mit einem Holzanteil von ca. 17 % und einer Gefachdämmung mit der WLG 040.



Abbildung 7.37: Ableitung der Wärmeleitfähigkeit für drei Mitteltemperaturen; hier: 66 mm dicker Kern aus Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von 250 kg/m³



Abbildung 7.38: Ableitung des Wärmedurchlasskoeffizienten für drei Mitteltemperaturen

8. Vergleich Anforderungen – Versuchsergebnisse

Zusammenfassend werden die zu Beginn gestellten Anforderungen an die Verbundelemente den Versuchsergebnisse gegenüber gestellt.

Eigenschaft	Anforderung	Ergebnis
Anforderung an die	Tragfähigkeit	
aufnehmbare Hori- zontalkräfte	mindestens 5 kN/m	5 kN/m sind bei umlaufendem Randabschluss prob- lemlos realisierbar, bei teilweisem Randabschluss können mit konstruktiven Maßnahmen wie z.B. dickeren Deckschichten die geforderten Kräfte auf- genommen werden
aufnehmbare Verti- kalkräfte als Linienlas- ten	mindestens 20 kN/m	20 kN/m können von nahezu jeder der untersuchten Konstruktion aufgenommen werden, mit entspre- chenden konstruktiven Maßnahmen können auch noch größere Kräfte aufgenommen werden
aufnehmbare Verti- kalkräfte als Einzellas- ten	keine	über gesonderte Einzeltragglieder
Konsollasten (Hänge- schränke)	mindestens 0,4 kN/m	0,4 kN/m mit den untersuchten Konstruktionen realisierbar
kraftschlüssige Ver- bindung zwischen den Bauteilen	möglich	durch einen umlaufenden Randabschluss ist eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Bauteilen realisierbar
Bauphysikalische An	forderungen	
Verformungsverhalten im Differenzklima	< 3 mm über die ge- samte Wandhöhe	bei schlanken, freistehenden Wänden können die Verformungen größer werden, als maximal gefor- dert; bei Außenwänden sind die Forderungen reali- sierbar, da diese in der Regel relativ gedrungen sind; konstruktive Maßnahmen, wie z.B. kraftschlüssige Verbindung mit anderen Bauteilen, sorgen dafür, dass die Verformungen im Differenzklima kleiner als 3 mm sind
Anforderungen an den Wärmeschutz	WLG des Kerns kleiner als 055 ansonsten Anforde- rungen nach DIN 4108-2	die verwendeten Holzfaserdämmplatten für den Kern hatten eine Wärmeleitzahl von 0,054 W/mK Die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 können über eine Variierung der Wanddicke erfüllt werden.
Anforderungen an d	ie Fertigungstechni	k
Abmessungen	nur durch Transport- möglichkeiten einge- schränkt	die Größe der zu fertigenden Elemente ist zur zeit an die Plattenformate der Deckschichten gebunden, die Platten des Kerns können innerhalb der Kon- struktion gestoßen werden; Plattenstöße der Deck- schichten benötigen besondere konstruktive Maß- nahmen und Nachweise
Bearbeitbarkeit	mit üblichen Holzbear-	uneingeschränkt möglich

9. Weiterreichende Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens und Ausblick

9.1 Anforderungen an die Baustoffe

Die in den vorher beschriebenen Abschnitten erwähnten Anforderungen an die Bauteile sind durch Optimierung innerhalb des Forschungsvorhabens erreicht worden. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde nachgewiesen. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen führen zu Erkenntnissen über notwendige Eigenschaften an die einzelnen Baustoffe, um funktionsfähige Wandverbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände gestalten zu können.

9.1.1 Anforderungen an den Kern (Dämmschicht)

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine höhere Querzug- und Schubfestigkeit des Kerns vorteilhaft ist, da bei sehr niedriger Querzugfestigkeit unter Vertikalbeanspruchung ein Versagen durch Erreichen der Festigkeit eintreten kann.

Weiterhin sind aufgrund der Anforderungen an das Bauteil Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit gestellt. Da diese vor allem bei üblichen Holzfaserdämmplatten in dem nach heutigem Wissen zur Verfügung stehenden Rohdichtebereich nahezu proportional zur Querzugfestigkeit und zur Rohdichte ansteigt, muss ein Optimum gefunden werden. Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass sich bei einer Rohdichte von ca. 230 kg/m³ bis ca. 250 kg/m³ eine geeignete Kombination aus ausreichender Wärmeleitfähigkeit und ausreichender Festigkeit und Steifigkeit bildet. Durch weitere Optimierung der Holzfaserdämmplatten durch die Hersteller können unter Umständen noch bessere Ergebnisse erzielt werden.

Eine hohe Drucksteifigkeit in Plattenebene wäre erst dann sinnvoll, wenn der Wert der Drucksteifigkeit so hoch wird, dass der Kern an sich zur direkten Übertragung von Lasten mitwirken kann. Der Druck-E-Modul der Holzfaserdämmplatte mit 250 kg/m³ Rohdichte liegt um ca. den Faktor 10 bis 15 niedriger als bei den verwendeten OSB. Bei Deckschichten aus zwei 12 mm dicken OSB wäre somit eine Kerndicke von ca. 240 mm bis 360 mm ausreichend, um mit dem Kern die gleiche Drucksteifigkeit in Plattenrichtung zu erlangen, wie mit der 2 mal 12 mm dicken Deckschicht. Dadurch wird aber die Knick- und Biegesteifigkeit nicht in gleichem Maße erhöht. Außerdem wäre eine exakte Passung des Kerns an den Randabschluss erforderlich, die Unterbringung von Versorgungskanälen wäre eingeschränkt möglich.

Je nach geplantem Anwendungsbereich ist eine individuelle Anpassung nötig.

Aus raumklimatischen Gesichtspunkten ist eine gute Wasserdampf-Diffusionsfähigkeit von Vorteil. Ein μ -Wert zwischen ca. 5 und ca. 10 erweist sich als vorteilhaft.

Weiterhin muss der Kern geeignet sein, um mit den Deckschichten verklebt zu werden.

9.1.2 Anforderungen an die Deckschichten

Die Deckschichten erweisen sich als vorteilhafter, je größer die Zug- und Druckfestigkeit sowie -steifigkeit ist. Je nach Anwendungsbereich sind die Werte hinsichtlich der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit anzupassen. Eine Optimierung ist durch die Art und die Menge des verwendeten Klebers und die Art und Weise des Kleberauftrages möglich. Eine geschlossene, vollflächige Verklebung mit einem Kleber auf Polyurethan-Basis wirkt je nach Dicke des Klebstofffilmes wie eine Dampfsperre. So ist es durchaus denkbar, die eine Deckschicht mit einem vollflächigen Klebstofffilm auf der Dämmschicht zu verkleben, die andere Seite streifenförmig oder gar nur punktuell. Besonders bei an sich diffusionsoffenen Deckschichten, wie Gipsplatten, bieten sich hier interessante Möglichkeiten.

Weiterhin muss die Deckschicht ein möglichst stark eingeschränktes Längenänderungsverhalten bei Feuchte- und Temperaturänderungen aufweisen. Dies ist umso wichtiger, je schlanker das Wandbauteil ist. Die Verformungen des gesamten Wandbauteils infolge Dehnungen der Deckschichten steigen überlinear mit der Schlankheit der Wand. Die in den Prüfungen verwendeten OSB können dabei durchaus schon als untere Grenze betrachtet werden. Werkstoffe mit ausgeprägterem Dehnverhalten in Plattenebene unter Feuchte- bzw. Temperaturänderungen können als wenig geeignet betrachtet werden. Gipsplatten sind in dieser Hinsicht sehr gut geeignet.

Eine weitere Eigenschaft, die die Deckschicht aufweisen sollte, ist die direkte Beschichtbarkeit z.B. mit Tapeten oder Innenputzen. Auch hier ist das Dehnverhalten in Plattenebene von großer Bedeutung. Die Verwendung von Holzwerkstoffen wird unter dem vorgenannten Gesichtspunkt als eher nachteilig betrachtet. Um bei diesen eine tapezierfähige oder verputzbare Oberfläche zu bekommen, ist eine zusätzliche Bekleidung mit einer Gipswerkstoffplatte erforderlich.

9.1.3 Anforderungen an den Kleber

Der Kleber muss in der Lage sein, auch unter Feuchtigkeitseinwirkung dauerhaft den Kern mit den Deckschichten miteinander zu verbinden. Für die Verklebung von Holz auf Holz gibt es ausgereifte Klebersysteme auf Kunstharzbasis, die in der industriellen Holzwerkstoffherstellung oder bei der Herstellung von geklebten Holztafeln seit Jahren Verwendung finden. Diese haben aber in der Regel den Nachteil, dass sie Wärme und hohen Druck benötigen, um eine ausreichende Verbindung herstellen zu können. Klebstoffe auf Polyurethan-Basis sind in der Regel kostenintensiver, benötigen aber keinen hohen Druck, um eine funktionsfähige Klebeverbindung realisieren zu können. Wärme beschleunigt die Aushärtung, ist aber nicht zwingend notwendig.

Weiterhin ist die Eigenschaft der Bildung einer Dampfsperre für gewisse Anwendungsbereiche von Vorteil. Somit sind die filmbildenden und Wasserdampfdiffusions-Eigenschaften von Bedeutung.

Je nach Anwendungsbereich und Einsatzgebiet der Wandelemente und nach Fertigungsmöglichkeiten muss eine Optimierung der Klebeverbindung durchgeführt werden. Die in den Versuchen verwendeten Kleber auf Polyurethan-Basis haben sich als grundsätzlich geeignet erwiesen.

9.1.4 Anforderungen an die Fertigungstechnik

Die Fertigungstechnik muss gewährleisten, dass eine sachgerechte Verklebung erfolgen kann. Ansonsten sind die üblichen Anforderungen gestellt, wie sie auch bei der Fertigung von geschlossenen Holztafelelementen gestellt sind. Durch die vermehrte Anwendung von Klebstoffen auf Polyurethan-Basis, die kalt und ohne hohen Druck verarbeitet werden können, kann eventuell auf aufwendige Pressvorrichtungen verzichtet werden. Die Anforderungen hinsichtlich der Eignung zum Verkleben der einzelnen Bauteilschichten an den Betrieb sind aber im Zulassungsverfahren zu klären. Während dieses Forschungsvorhabens sind ausschließlich Kleber auf Polyurethan-Basis verwendet worden. Grundsätzlich sind aber auch andere Klebstoffe wie z.B. Phenolharze, modifizierte Melaminharze oder andere denkbar. In einem eventuellen Zulassungsverfahren sind die jeweiligen Eigenschaften in Verbindung mit den verwendeten Baustoffen zu ermitteln.

9.2 Möglichkeiten der Nutzung

Die Möglichkeiten der Umsetzung der Ergebnisse stellen sich in prinzipiell zu unterscheidenden Varianten dar, wobei diese Aufzählung nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Grundsätzlich muss eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die zu fertigenden Elemente erwirkt werden. Je nach Art der Umsetzung sind spezifische Anforderungen in der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festzulegen.

9.2.1 Baukastensystem mit vorgegebenen Elementabmessungen und Vertrieb

über den Handel

Es ist vorstellbar, dass in industrieller Fertigung Systemelemente mit vorgegebenen Abmessungen hergestellt und über den Handel verkauft werden. Eventuelle Sondermaße müssen auftragsbezogen gefertigt werden. Diese Art der Fertigung und des Vertriebes wird im Möbelbau bereits durchgeführt. Eine Fertigung tragender Wände stellt aber höhere Sicherheitsanforderungen. Ein Branche, die ähnliche Sicherheitskriterien erfüllen muss und die teilweise vergleichbare Vertriebsstrukturen aufweist, ist die Blockhausindustrie.

Wegen der hohen Sicherheitsanforderungen wäre es denkbar, einen verantwortlichen Montageleiter und z.B. die Bereitstellung eines Mobilkranes in einem gewissen Umfang bereits beim Verkauf der Elemente mit anzubieten. Die Montage auf der Baustelle würde dann von angeleiteten Laien erfolgen. Daher müssen die Verbindungen auf der Baustelle mit einfach handhabbaren Verbindungsmittel wie z.B. Schrauben gewährleistet werden. Ähnlich wie bei der Möbelfertigung sind komplett vorgefertigte Elemente mit vorgebohrten Löchern für Schrauben und andere Beschläge denkbar.

9.2.2 individuelle Elementfertigung durch die Fertighausindustrie

Eine weitere Möglichkeit der Umsetzung kann von der Fertighausindustrie aufgegriffen werden. Diese kann ihr bisher verwendetes System durch Verbundelemente austau-



Abbildung 9.1: Skizze einer Außenwand; oben: herkömmliches Holztafelelement; unten: Holztafelelement mit Verbundquerschnitten

schen. In diesem Fall wäre die Produktion eines Endloselementes denkbar, welches bei den geforderten Elementbreiten gekappt und mit einer Randeinfassung versehen wird. Je nach Größe und Anzahl der Fenster und Türen, kann ein Ausschneiden der Öffnungen aus dem Endloselement sinnvoll sein oder die Fertigung von gesonderten Elementen für die Öffnungen. Eine Optimierung kann aber erst dann durchgeführt werden, wenn die Kosten zur Herstellung solcher Elemente bekannt sind. In Abbildung 9.1 ist ein solches Element dargestellt. Die roten Linien sollen die noch zu verwendenden Hölzer darstellen. Ansonsten besteht das Element nur aus Dämmung mit einer beidseitigen Beplankung.

9.2.3 individuelle Elementfertigung durch handwerklich orientierte Unternehmen

Handwerklich orientierte Unternehmen können z.B. durch Erwerb von Lizenzen die Produktion und Montage von Elementen aus Verbundquerschnitten übernehmen. Inhaber der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung könnte in diesem Fall eine externe Stelle sein, die dann durch Vergabe der Lizenzen in unterschiedlichen Produktionsstätten herstellt. Eine Eignung zur Herstellung der geklebten Elemente muss innerhalb einer Fremdüberwachung überprüft werden. Eine vergleichbare Struktur ist bei Herstellung und Vertriebs von Nail-Web-Trägern zu finden.

9.2.4 Fertigung einer Sandwichplatte

Die Holzwerkstoffindustrie könnte die Möglichkeit aufgreifen, eine z.B. 16 cm oder 20 cm dicke Platte im Großformat zu fertigen, aus welcher dann die einzelnen Elemente in beliebigen Formen geschnitten werden. Analog zur Möbelfertigung, in der großformatige Platten mit Hilfe einer Verschnittoptimierung in kleine Elemente zerlegt werden, können auch bei dem entwickelten Sandwichelement z.B. Giebeldreiecke, Brüstungselemente und Erkerelemente aus einer großen Sandwichplatte geschnitten werden. Die Ränder der einzelnen Elemente, die nahezu beliebige Abmessungen aufweisen können, werden wie in Abbildung 9.2 angedeutet, mit einem Profil versehen, in welches dann der Randabschluss gesteckt und mit den Deckschichten befestigt wird.



Platte und Profil miteinander verbinden

Abbildung 9.2: mögliche Vorgehensweise bei der Fertigung einer Sandwichplatte: oben: 1. großformatige Platte wird aufgetrennt, Endlosprofil abgelängt; mitte: 2. Schmalflächen der Platten werden profiliert; unten: 3. Platten und Randprofil werden zusammengefügt

10. Veröffentlichungen

Im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben sind bereits folgende Veröffentlichungen durchgeführt worden:

Präsentation auf der Abschlusssitzung des Projektbegleitenden Ausschusses am 04.12.2003: "Abschlussergebnisse aus dem Forschungsvorhaben "Verbundquerschnitte aus Holzwerstoffen für lastabtragende Wände""

WKI-Kurzbericht Nr. 27/03 "Grundsätzliche Eignung von Verbundquerschnitten aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände"

Präsentation auf dem 16. Hildesheimer Informationstag Holzbau HITH, Hildesheim, 11.02.2004 "Verbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände"

WKI-Kurzbericht Nr. 28/03 "Verformungen von Wandverbundelementen und Holzweichfaserplatten im Differenzklima"

WKI-Kurzbericht Nr. 29/03 "Steifigkeit von Wandverbundelementen aus Holzwerkstoffen bei Horizontalbelastung"

Artikel in der Fachzeitschrift ", bauen mit holz" 03/2004 ", Rationalisierte Herstellung von Holzbauteilen"

Folgende Veröffentlichungen werden bis zum Juli 2004 getätigt:

Posterpräsentation mit Bericht auf der "8th World Conference on Timber Engineering" vom 14.06. bis 17.06.2004 in Lahti/Finnland "Rationalized manufacture of structural wood components"

Internetveröffentlichung des internationalen Vereins für technische Holzfragen (iVTH)
11. Förderung

Das Forschungsvorhaben "Verbundquerschnitte aus Holzwerkstoffen für lastabtragende Wände" wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und den internationalen Verein für Technische Holzfragen (iVTH) gefördert.

12 Literatur

(1) Aicher, S. und von Roth, W. 1987. Ein modifizierts γ -Verfahren für das mechanische Analogon: dreischichtiger Sandwichverbund – zweiteiliger verschieblicher Verbund. Bautechnik 64 (1): 21-29.

(2) Aicher, S. 1987. Bemessung biegebeanspruchter Sandwichbalken mit dem modifizierten γ -Verfahren. Bautechnik 64 (3): 79-86.

(3) Kreuzinger, H. 1995. Träger und Stützen aus nachgiebig verbundenen Querschnittsteilen. Informationsdienst Holz, Holzbauwerke, Step 1, B11, Arbeitsgemeinschaft Holz e. V. Düsseldorf.

(4) Aicher, S. 1984. Festigkeitsuntersuchungen an Platten- und Scheibenbeanspruchten Sandwichelementen aus Spanplattendeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaumkern, Dissertation, Universität Hamburg.

(5) Kreuzinger, H. 2003. Flächentragwerke – Berechnung und Konstruktion. Forschungsbericht TU München, Fachgebiet Holzbau

13. Zusammenfassung

Das Forschungsziel war die Entwicklung von modularen Verbundelementen bei denen die Kleinteiligkeit des klassischen Holztafelbaus nicht mehr gegeben ist. Der Kern soll wärmedämmende und tragende Funktionen gleichzeitig erfüllen. Das Element soll als Meterware herstellbar sein. Dabei sollte die grundsätzliche Machbarkeit erforscht werden.

Das Forschungsziel ist in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) und dem Institut für Baukonstruktion und Holzbau der Technischen Universität Braunschweig mit analytischen und experimentellen Untersuchungsmethoden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) erreicht worden.

Es bieten sich neue Möglichkeiten der rationalisierten Herstellung von Holzgebäuden, die die internationale Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen steigern, deutsche Arbeitsplätze sicher und kostengünstigeres Bauen ermöglichen können.

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben bilden den Grundstein für innovative und ökologische Wandkonstruktionen, die dem Holzbau weitere Chancen eröffnen.

Forschungsstelle 1		Forschungsstelle 2		
Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) Bienroder Weg 54 E 38108 Braunschweig		Technische Universität Braunschweig Institut für Baukonstruktion und Holzbau Schleinitzstraße 21a 38106 Braunschweig		
Institutsleiter	Projektleiter	Institutsleiter	Projektleiter	

Prof. Dr. Rainer Marutzky Dipl.-Ing. Johann W. Herlyn Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel Dipl.-Ing. Theo Schönhoff

Unterschriften