# ТЛП

### Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

# Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen

### Forschungsstelle:

Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter Arcisstraße 21 80335 München

#### **Projektbearbeitung:**

Dipl.-Ing. Martin Gräfe Andreas Hipper M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wild M.Sc. MBA

### **Projektleitung:**

Dr.-Ing. Philipp Dietsch

#### Laufzeit

Laufzeit 01/2016 bis 05/2018

Das Vorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-15.49

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Zitiervorschlag: Gräfe, M., Dietsch, P., Hipper, A., Wild, M., Winter, S. *Vorspannung von Brettsperrholzkonstruktionen*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. München 2018



# Inhaltsverzeichnis

1	Last	tausbre	itung in Plattenebene	1
	1.1	Frages	stellung	1
	1.2	Finite-	Elemente-Studie	2
		1.2.1	Untersuchungsziel und Vorgehensweise	2
		1.2.2	Geometrie und Materialparameter	3
		1.2.3	Modellierung	5
			1.2.3.1 Modelleigenschaften	5
			1.2.3.2 FE-Netz	6
		1.2.4	Lastaufbringung	6
		1.2.5	Auswertung der FE-Modelle	7
		1.2.6	Ergebnisse	8
			1.2.6.1 Einfluss des Querlagenanteils - nicht schmalseitenverklebt	8
			1.2.6.2 Einfluss des Querlagenanteils schmalseitenverklebt	9
			1.2.6.3 Einfluss der Schmalseitenverklebung	0
			1.2.6.4 Einfluss der Bauteilhöhe	11
			1.2.6.5 Einfluss des Positionierung der Lasteinleitungsplatte	12
			1.2.6.6 Einfluss streuender Materialeigenschaften	14
			1.2.6.7 Einfluss der Querdehnzahl	16
			1.2.6.8 Verformungen	16
			1.2.6.9 Normalspannungsverteilung	17
		1.2.7	Zwischenergebnis	8
	1.3	Mecha	nische Versuche	8
		1.3.1	Versuchsaufbau	8
			1.3.1.1 Versuchskonzept	8
			1.3.1.2 Überlegungen zur Messtechnik	8
			1.3.1.3 Beschreibung des Bauteils zur Messung der vertikalen Spannungs-	
			verteilung	20
			1.3.1.4 Kalibrierung	22
		1.3.2	Versuchskörper	22
		1.3.3	Versuchsdurchführung	23
			1.3.3.1 Montage und Belastungseinrichtung	23
			1.3.3.2 Ablauf der Versuche, Laststufen	26
		1.3.4	Wandhöhen 750 mm und 1500 mm	26
		1.3.5	Berechnung der Lastverteilung aus den Versuchsergebnissen	27
		1.3.6	Versuchsergebnisse und Kurvenanpassung	27
	1.4	Vergle	ich FE-Studie - Versuchsergebnisse	29
	1.5	Bewer	tung und Schlussfolgerung	30
		1.5.1	Fähigkeit zur Lastumlagerung	30

#### Inhaltsverzeichnis



Literaturverzeichnis			
1.5.6	Fazit	34	
1.5.5	Übertragung auf asymmetrische Fälle	31	
1.5.4	Ansatz einer gemittelten Spannungsverteilung	31	
1.5.3	Einfluss der Auflagersteifigkeit	31	
1.5.2	Stabilitätsnachweise	31	

# ТЛП

# 1 Lastausbreitung in Plattenebene

# 1.1 Fragestellung

Für das in diesem Forschungsvorhaben betrachtete Vorspannkonzept werden hohe Kräfte aus den Spannlitzen konzentriert an den Stirnkanten der Brettsperrholzplatten eingeleitet, ähnlich wie an sonstigen Einzellasten in Plattenebene, beispielsweise an Auflagern von Unterzügen oder Stützen.

Neben der Frage nach der lokalen Tragfähigkeit (Kapitel **??**) ist daher zu klären, wie sich solche Einzelasten in Plattenebene ausbreiten. Diese Information wird beispielsweise gebraucht, wenn Spannungsnachweise in bestimmtem Abstand zur Lasteinleitung geführt werden müssen, oder um die für Knicknachweise relevanten Spannungen zu ermitteln.

Die Verteilung der eingeleiteten Kräfte ergibt sich im Wesentlichen aus den Faktoren Schubsteifigkeit, Dehnsteifigkeit in Längs- und Querrichtung, sowie der Auflagersteifigkeit. Die Lastverteilung in einer bestimmten Schnittfuge einer Platte rechtwinklig zur Kraftrichtung ist immer nichtlinear, ihre Größe nimmt mit steigendem senkrechtem Abstand zur Achse der einwirkenden Kraft ab. Bei Brettsperrholz kommt hinzu, dass die einzelnen Bretter sich infolge natürlicher Streuung mehr oder weniger stark in ihren Eigenschaften unterscheiden, wenn sie ohne Schmalseitenverklebung verarbeitet sind wirken sich zudem die Fugen zwischen den Brettern aus.

Für die praktische Anwendung und Bemessung wurde daher eine Rechengröße zur Charakterisierung der Verteilung eingeführt, der *Lastausbreitungswinkel*. Er beschreibt den Winkel zwischen der Senkrechten am Rand der Lasteinleitungsfläche und dem Punkt auf einer horizontalen Schnittebene, an dem die Summe der *außerhalb* liegenden Kraftanteile weniger als 5 % der Gesamtkraft entspricht (vgl. Abbildung 1.1). Zur Bestimmung dieses Winkels für verschiedene Brettsperrholzaufbauten und weitere Parameter wurden eine umfangreiche Finite-Elemente-Studie und eine Versuchsserie durchgeführt und ausgewertet.

# ПЛ



Abbildung 1.1: Lastausbreitung infolge einer Einzellast in Plattenebene

# 1.2 Finite-Elemente-Studie

# 1.2.1 Untersuchungsziel und Vorgehensweise

Die Parameterstudie wurde im Vorfeld der versuchstechnischen Untersuchung durchgeführt, um zunächst rechnerisch die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften zu bestimmen und einzugrenzen. Sie sollte außerdem zur Erweiterung der Kenntnisse über die Versuchsergebnisse hinaus beitragen, indem durch die rechnerische Modellierung ein größeres Untersuchungsspektrum ermöglicht wurde. Ziel war die Ermittlung des Lastausbreitungswinkels bei Einleitung von Einzellasten in Plattenebene von Brettsperrholzbauteilen bei verschiedenen geometrischen und mechanischen Randbedingungen. Das Finite-Elemente-Modell wurde von [?] mit der Software RFEM, Version 5.05.0030 der Dlubal GmbH erstellt. Betrachtet wurden insbesondere die folgenden Parameter:

- Schmalseitenverklebung ja/nein
- variierender Querlagenanteil
- natürliche Streuung von Materialeigenschaften



- Einfluss verschiedener Literaturangaben zu den elastischen Materialparametern, insbesondere der Querdehnzahl
- Einfluss der Lage der Lasteinleitungsfläche relativ zu den Brettlagen
- Einfluss des Verhältnisses Breite/Höhe einer Brettsperrholzplatte

### 1.2.2 Geometrie und Materialparameter

Das FE-Modell wurde einheitlich mit einer Höhe (z-Richtung in Abbildung 1.2) von 3000 mm entsprechend einer praxistypischen Wandhöhe erstellt. Modelle mit davon abweichenden Höhen zwischen 2000 und 5000 mm wurden für die Modellierung des Einflusses verschiedener Wandhöhen (Abschnitt 1.2.6.4) genutzt. Die Wandbreite (x-Richtung in Abbildung 1.2) wurde jeweils so gewählt, dass die Spannungen im Fußauflager an den Seiten gegen Null gehen. Es ergaben sich daraus Breiten von maximal 5000 mm. Die Wandstärke wurde einheitlich mit 160 mm gewählt, bestehend aus fünf Brettlagen mit Orientierung der Decklagen in z-Richtung.





Abbildung 1.2: Gesamtansicht des räumlichen FE-Modells ([?])

Die Stärke der Querlagen ergibt sich aus dem jeweils verwendeten Querlagenanteil, entsprechend lässt sich die Stärke der Längslagen bestimmen:

$$t_{quer} = 160mm * \frac{AnteilQuerlagen[\%]}{100 * n_{Querlagen}}$$
(1.1)

Der Querlagenanteil wurde in 5 % Schritten von 10 bis 50 % variiert, was zu folgenden BSP-Aufbauten geführt hat:



Querlagenanteil [%]	Lagenaufbau	Gesamtdicke der Querlagen [mm]
10	<b>48</b> - 8 - <b>48</b> - 8 - <b>48</b>	16
20	<b>42,7</b> – 16 – <b>42,7</b> – 16 – <b>42,7</b>	32
25	<b>40</b> - 20 - <b>40</b> - 20 - <b>40</b>	40
30	<b>37,3</b> - 24 - <b>37,3</b> - 20 - <b>37,3</b>	48
40	<b>32</b> - 32 - <b>32</b> - 32 - <b>32</b>	64
50	<b>26,7</b> - 40 - <b>26,7</b> - 40 - <b>26,7</b>	80

 Tabelle 1.1: verwendete Lagenaufbauten und Querlagenanteile

Die Materialparameter wurden mit Ausnahme des Modells zur Variation der Querdehnzahl und der stochastisch verteilten Materialeigenschaften entsprechend [?] wie folgt angenommen:

E-Modul [ $N/mm^2$ ]			Schubmodul $[N/mm^2]$			Poissonzahl [–]		
L	R	Т	LR	TR	TL	LR	TR	TL
10.000	800	450	600	40	650	0,027	0,6	0,033

Tabelle 1.2: Materialparameter nach ?

Diese Werte gelten für Fichtenholz bei einer Holzfeuchte von 12,0 %. Sie entsprechen weitgehend den Werten aus EN 338:2016 für die Festigkeitsklasse C24. Der Rollschubmodul variiert erheblich u. a. mit der Dicke der Querlagen, weshalb hier die Berücksichtigung des Lagenaufbaus sinnvoll sein kann [?]. Da in der betrachteten Anwendung allerdings kein Rollschub auftritt und der Rollschubmodul daher keine Rolle spielt, wurde darauf verzichtet.

### 1.2.3 Modellierung

### 1.2.3.1 Modelleigenschaften

Die Verbindungen der einzelnen Bretter untereinander wurden als ideal starr angenommen. Die Fugen zwischen den Brettern bei nicht schmalseitenverklebtem BSP wurden mit 2,0 mm Breite angenommen und als isotropes linear elastisches Material mit  $E = G = 1 * 10 - 10N/mm^2$ und  $\nu = 0$ modelliert. Dies hatte den Grund, dass bei im Modell "leeren" Zwischenräumen die Netzbildung wesentlich ungleichmäßiger und rechenintensiver wurde und zu diversen numerischen Problemen führte.

Die Lasteinleitungsplatte wurde mit einer 50 mm dicken Stahlplatte der Kantenlängen 320 mm x 160 mm realisiert, was sich auch (anhand der Lasteinleitungsversuche) als realistische praxistaugliche Variante bestätigt hat. Der Stahl wurde als linear-elastisches isotropes Material wie folgt definiert:  $E = 210.000N/mm^2, G = 8.100N/mm^2, \nu = 0, 296.$ 



Die Auflagerung am Wandfuß wurde mit gelenkigen Punktlagern realisiert, welche als ideal starr in z-Richtung und frei verschieblich in x- und y-Richtung definiert wurden. Die Lager wurden entsprechend der Netzweite alle 20 mm angebracht. Um das Modell im Raum zu fixieren, wurden zusätzlich am Wandkopf einwertige Punktlager angebracht, welche aber keine Kräfte aufnahmen und zu keinen Zwangsspannungen führten.

# 1.2.3.2 FE-Netz

Aufgrund der einfachen rechteckigen Geometrie des Modells konnte ohne Schwierigkeiten eine gleichmäßige Netzstruktur erreicht werden. Die Maschenweite  $l_{FE}$  wurde mit 20 mm festgelegt, als idealer Kompromiss zwischen Modellierungsgenauigkeit und benötigter Rechenzeit. Das Diagonalenverhältnis  $D_1/D_2$  wurde mit 1 festgelegt, was zu vorwiegend quadratischen Maschen führt und die Qualität der Rechenergebnisse verbessert, da unregelmäßige oder spitzwinkelige Maschen vermieden werden. Eine Netzverfeinerung an Ecken oder Auflagerpunkten war nicht erforderlich. (vgl. Abbildung 1.3)



Abbildung 1.3: FE-Netz, Ansicht und Parameter ([?])

# 1.2.4 Lastaufbringung

Die Last wurde als gleichmäßig verteilte Flächenlast auf die Stahlplatte aufgebracht. Sie wurde so bemessen, dass für jedes Modell die Druckspannung in den Längslagen identisch war. Die erwünschte Druckspannung wurde als im Dauerzustand maximal aufnehmbare Spannung wie folgt definiert:

$$\sigma_0 = k_{mod} * \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \tag{1.2}$$



Die resultierende Druckspannung auf die Lasteinleitungsplatte ergibt sich daraus unter Berücksichtigung des Längs- zu Querlagenverhältnisses entsprechend:

$$\sigma_{Stahl} = \sigma_0 * \frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$$
(1.3)

Je nach Querlagenanteil wurde somit auf die Stahlplatte eine Druckspannung von 4,8  $N/mm^2$  (für Querlagenanteil 50 %) bis zu 9,7  $N/mm^2$  (für Querlagenanteil 0 %) aufgebracht. Die entsprechende Gesamtkraft lag zwischen 248 kN und 496 kN.

#### 1.2.5 Auswertung der FE-Modelle

Um die Rechenergebnisse der weiteren Auswertung zugänglich zu machen, wurden zunächst die Auflagerkräfte an den Punktlagern aus dem jeweiligen FE-Modell entnommen und in eine Tabellendatei übertragen. Hierbei war es ausreichend, jeweils nur eine Hälfte des Modells seitlich der vertikalen Symmetrieachse in der Mitte zu betrachten. Die Auflagerkraft konnte danach als Diagramm mit einer Kraftkoordinate in y- und der Wandbreite in x-Richtung aufgetragen werden (Beispiel vgl. Abbildung 7). Die Auflagerkräfte wurden dabei in Druckspannungen längs zur Faser in den Längslagen umgerechnet.

Anschließend wurde auf Basis dieser Spannungsverteilung der Lastausbreitungswinkel ermittelt. Allgemein ergibt sich der Winkel gemäß Abbildung 1.1 b) zu

$$\alpha = \arctan\left(\frac{b}{h}\right) \tag{1.4}$$

Es stellt sich hierbei jedoch die Frage, wie der "Nullpunkt" (die Horizontalkoordinate, bei der die Druckspannungen erstmals Null sind) definiert wird. Wenn der tatsächliche Nullpunkt verwendet wird (Abbildung 1.4 a)), ergeben sich unrealistisch "breite" Verteilungen, da die Spannungen asymptotisch auslaufen und zudem die betragsmäßig wesentlich größeren Spannungen im mittleren Bereich nicht quantitativ berücksichtigt werden. Andere Ansätze bestehen darin, entweder die letzten 5 % der Anzahl der Messwerte "abzuschneiden" oder den Schnitt auf 5 % der Spannungshöhe zu legen (vgl. Abbildung 1.4 b) und c)). Beide Möglichkeiten wurden verworfen. Gewählt wurde schließlich der Ansatz nach Abbildung 1.4 d), bei dem 5 % des Flächenintegrals (und somit der tatsächlichen Kräfte) "abgeschnitten" werden. Diese Lösung wurde unter Berücksichtigung aller Aspekte als die ingenieurmäßig sinnvollste Variante ausgewählt.

Die notwendige Integration erfolgte numerisch auf Basis der Auflagerkräfte getrennt für die jeweiligen FE-Modelle, aus der x-Koordinate bei 5 % der Kräfte ergibt sich nach Formel 1.4 der gesuchte Winkel.

# ТЛП



Abbildung 1.4: Verschiedene Ansätze zur Berechnung des Lastausbreitungswinkels ([?])

# 1.2.6 Ergebnisse

# 1.2.6.1 Einfluss des Querlagenanteils - nicht schmalseitenverklebt

Die Rechenergebnisse sind im Diagramm Abbildung 1.5 dargestellt. Es zeigt sich deutlich der Einfluss der einzelnen Brettbreiten, die Brettfugen ergeben deutliche Schwankungen über die Bauteilbreite. Ein Einfluss des Querlagenanteils ist eindeutig erkennbar. Es ergeben sich rechnerisch die folgenden Winkel:

QL-Anteil [%]	10	20	30	40	50
Winkel [°]	21	23	25	27	28

 Tabelle 1.3: Tabelle Lastausbreitungswinkel – nicht schmalseitenverklebt

# ПП



Abbildung 1.5: Einfluss des Querlagenanteils, nicht schmalseitenverklebt

# 1.2.6.2 Einfluss des Querlagenanteils schmalseitenverklebt

Die Rechenergebnisse sind im Diagramm Abbildung 1.6 dargestellt. Gut erkennbar ist die gleichmäßige Spannungsverteilung ohne Schwankungen infolge der Fugenspalte. Ein Einfluss des Querlagenanteils ist eindeutig erkennbar. Die Verteilung ist insgesamt etwas breiter als bei der Variante ohne Schmalseitenverklebung. Es ergeben sich rechnerisch die folgenden Winkel:

QL-Anteil [%]	10	20	30	40	50
Winkel [°]	24	26	27	28	30

Tabelle 1.4: Ta	belle Lastausbreitungswinkel – schmalseitenverklebt
-----------------	---

# ТЛП



Abbildung 1.6: Einfluss des Querlagenanteils, schmalseitenverklebt

# 1.2.6.3 Einfluss der Schmalseitenverklebung

Zur qualitativen Verdeutlichung der der Ergebnisse werden nur die Varianten mit 10 % und 50 % Querlagenanteil dargestellt und ausgewertet (vgl. Abbildung 1.7). Es zeigt sich deutlich der Unterschied der beiden Varianten, der sich in den maximalen Spannungen, der Verteilungsbreite, und dem Maß der Spannungsschwankungen infolge der Brettfugen ausdrückt.

Die Modelle mit schmalseitenverklebten Lamellen erhalten geringere Spitzenwerte der Druckspannungen in der Bodenfuge, bei einer gleichzeitig breiteren Lastverteilung. Die errechneten Winkel sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

QL-Anteil [%]	10	20	30	40	50
Winkel [°] SSV	24	26	27	28	30
Winkel [°] nicht SSV	21	23	25	27	28

Tabelle 1.5: Tabelle Lastausbreitungswinkel – Einfluss der Schmalseitenverklebung

# ТШП



(a) 10 % Querlagenanteil

(b) 50 % Querlagenanteil

Abbildung 1.7: Einfluss der Schmalseitenverklebung

### 1.2.6.4 Einfluss der Bauteilhöhe

Die Höhe einer Wandscheibe wirkt sich auf die Breite der Lastverteilung aus. Ein äquivalenter Effekt ergibt sich bei unterschiedlichen Steifigkeiten der Auflagerung am Wandfuß. Zur Untersuchung des Einflusses wurden sieben Wände mit Höhen zwischen 2000 mm und 5000 mm in 500 mm Schritten modelliert. Als Basis wurde ein Aufbau mit 25 % Querlagenanteil ohne Schmalseitenverklebung ausgewählt und entsprechend Abschnitt 1.2.4 belastet. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 1.8 und Tabelle 1.6 dargestellt.

Wandhöhe [mm]	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Winkel [°]	26	26	24	24	23	23	23

Tabelle 1.6: Tabelle Lastausbreitungswinkel – Vergleich Wandhöhen

# Ш



Abbildung 1.8: Einfluss unterschiedlicher Wandhöhen

Die Lastausbreitungswinkel nehmen mit steigender Wandhöhe ab. Die Unterschiede sind jedoch gering, und können für praktisch auftretende Wandhöhen vernachlässigt werden. Es erscheint gerechtfertigt, für Wandhöhen zwischen 2,0 m und 5,0 m einen einheitlichen Winkel zu verwenden. Für den Fall geringerer Höhen als 2,0 m liegt der Ansatz dieses Winkels auf der sicheren Seite.

# 1.2.6.5 Einfluss des Positionierung der Lasteinleitungsplatte

Es wurde untersucht, inwieweit die Positionierung der Lasteinleitungsplatte relativ zu den Längslagen des Brettsperrholzes einen Einfluss auf die Lastverteilung hat. Im hier betrachteten Fall einer 320 mm breiten Stahlplatte, 160 mm breiten Lamellen und einem fünfschichtigen BSP-Aufbau kann die Lastübertragung auf die Hirnholzfläche entweder auf sechs oder Lamellen stattfinden (vgl. Abbildung 1.9). Untersucht wurde eine symmetrische Positionierung auf neun Lamellen (a), eine symmetrische Positionierung auf sechs Lamellen (b) und eine asymmetrische Positionierung (c). In den Fällen a) und c) findet somit eine Lastübertragung auf die Lamellen 1, 3, 4, 6, 7, 9 nur in Teilflächen des Hirnholzes statt.

# ТЛП



Abbildung 1.9: Verschiedene Anordnungen der Lasteinleitung relativ zu den Längslagen

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 1.10 dargestellt. Die Unterschiede sowohl bezüglich der Größe der Druckspannungen als auch der Breite der Lastverteilung sind sehr gering. Die errechneten Lastausbreitungswinkel unterscheiden sich maximal um 1°. Die konkrete Anordnung der Bretter in einem Bauteil relativ zur Lasteinleitungsplatte ist somit für praktische Zwecke irrelevant und kann vernachlässigt werden.





(a) Positionen a und b (symmetrisch 9 und 6 Lamellen) (b) Positionen a und c (9 Lamellen symmetrisch und asymmetrisch)



### 1.2.6.6 Einfluss streuender Materialeigenschaften

Üblicherweise werden die Materialeigenschaften von Holz und Holzprodukten als über das untersuchte Bauteil konstant verteilt angenommen. Dies trifft bei realen Bauteilen jedoch nicht zu, da die Eigenschaften des Naturproduktes Holz relativ stark streuen und statistisch verteilt sind. Die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Bretter innerhalb des Werkstoffes Brettsperrholz können sich daher relativ stark voneinander unterscheiden, durch die Keilzinkung in der Produktion u. U. sogar innerhalb eines Brettes. Die Sortierung erfolgt i. d. R. auf die Festigkeitsklassen C16 oder C24, wobei typischerweise ca. 95 % der unsortierten Bretter in das fertige Endprodukt verarbeitet werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Rechnungen wurde der Einfluss dieser Streuung auf die Lastverteilung untersucht [?]. Als Datenbasis konnten die einzeln dynamisch mit der Sortiermaschine *Precigrader* gemessenen Steifigkeitseigenschaften von insgesamt 4331 Fichtenholzlamellen für die Brettschichtholzproduktion aus (Stapel et al. 2015) verwendet werden.

Die Lamellen hatten die folgenden Eigenschaften:



	Anzahl	Ausschuss	$E_{mean}[N/mm^2]$	S	$E_{min}[N/mm^2]$	$E_{max}[N/mm^2]$
unsortiert	4331	0	11.258	2896	1294	24.148
sortiert C24	4131	200	11.504	2729	2180	24.418

Tabelle 1.7: Eigenschaften der Brettlamellen für das stochastische Modell

Jede Wandscheibe besteht aus 93 Brettlamellen, welche für insgesamt 10 Modelle mit stochastisch verteilten Materialeigenschaften per Zufallsgenerator aus den nach C24 sortierten Lamellen aus Tabelle 1.7 entnommen wurden. Die Eigenschaften dieser Lamellen wurden 10 FE-Modellen individuell zugewiesen und die entsprechenden Lastverteilungen berechnet. Als Referenzmodell wurde ein identischer Wandaufbau mit einheitlichen Materialkennwerten nach [?] verwendet. Basis war das Wandmodell mit 25 % Querlagenanteil ohne Schmalseitenverklebung. Die Auswertung der Spannungsverteilung ist im Diagramm Abbildung 1.11 dargestellt.

Es zeigen sich Unterschiede in den Spitzenwerten der Druckspannungsverteilung, vor allem im Bereich der Lasteinleitung. Erwartungsgemäß ziehen dort zufällig positionierte Lamellen mit hoher Steifigkeit Kräfte an, während sie sich im umgekehrten Fall der Last entziehen und diese an benachbarte Lamellen weitergeben. Hin zu den Rändern der Wandscheibe nehmen diese Unterscheide deutlich ab.

Die berechneten Lastausbreitungswinkel schwanken hingegen geringer zwischen 20 und 25 °, bei einem entsprechenden Winkel des Referenzmodells von 24 °.



Abbildung 1.11: Ergebnisse der Wandscheiben mit streuenden Materialeigenschaften



### 1.2.6.7 Einfluss der Querdehnzahl

Es wurden zwei Modelle mit ansonsten identischen Eigenschaften einmal mit einer Poissonzahl  $\nu$  = 0 und einmal mit den Werten nach [?] untersucht und hinsichtlich der resultierenden Spannungsverteilung verglichen. Die Ergebnisse sind im Diagramm Abbildung 1.12 dargestellt. Die Ergebnisse sind nahezu identisch, unterschiedliche Eingaben für die Querdehnzahlen haben in der vorliegenden Untersuchung keinen relevanten Einfluss auf die Spannungsverteilung und somit den Lastausbreitungswinkel.



Abbildung 1.12: Vergleich unterschiedlicher Querdehnzahlen

# 1.2.6.8 Verformungen

Die maximalen Verformungen in z-Richtung der untersuchten Wandtypen liegen bei ca. 1,3 mm direkt an der Lasteinleitung. Ein typisches Verformungsbild ist in Abbildung 1.13 dargestellt. Erwartungsgemäß sind die Verformungen bei höherem Querlagenanteil geringer, was auf die bessere Querverteilung zurückzuführen ist.

# ТШП



**Abbildung 1.13:** Typische Verformungen $u_z$ , Wand mit 25 & Querlagenanteil bei voller Last nach Abschnitt 1.2.4

# 1.2.6.9 Normalspannungsverteilung

Eine typische Normalspannungsverteilung  $\sigma_z$  infolge einer Einzellast am Wandkopf ist in Abbildung 1.14 dargestellt. Direkt unterhalb der Lasteinleitung treten die größten Spannungen auf, sie nehmen mit steigendem Abstand relativ schnell ab.



Abbildung 1.14: Typische Normalspannungsverteilung  $\sigma_z$  in einer Wandscheibe



# 1.2.7 Zwischenergebnis

Aus den Ergebnissen der Finite-Elemente-Studie können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der Querlagenanteil hat einen deutlichen Einfluss auf die Breite der Spannungsverteilung.
- Schmalseitenverklebung führt zu einem gleichmäßigen Kraftverlauf in der Lagerfuge am Wandfuß, und insgesamt zu einer 2 ° bis 3 ° breiteren Lastverteilung.
- Die Querdehnzahl des Holzes und streuende Materialparameter haben einen geringen bis vernachlässigbaren Einfluss.
- Die Wandhöhe hat in praktisch auftretenden Bereichen einen geringen bis vernachlässigbaren Einfluss, ebenso wie variierende Positionen der Lasteinleitung relativ zu den Lamellen.
- Unterschiedliche Lamellenbreiten wurden nicht untersucht. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse ist aber davon auszugehen, dass steigende Lamellenbreiten mit einem größeren Lastausbreitungswinkel einhergehen; ähnlich dem Effekt der Schmalseitenverklebung.
- Die rechnerischen Ergebnisse für den Lastausbreitungswinkel liegen über alle FE-Modelle zwischen 21  $^\circ$  und 30  $^\circ.$

Auf Basis dieser Untersuchung wurden entsprechende mechanische Versuche konzipiert, um die Rechenergebnisse an realen Bauteilen zu verifizieren.

# 1.3 Mechanische Versuche

### 1.3.1 Versuchsaufbau

### 1.3.1.1 Versuchskonzept

Ziel der Untersuchung war es, die Druckspannungsverteilung längs der Aufstandslinie einer rechteckigen Brettsperrholzscheibe mit einer an der Oberseite wirkenden Einzellast zu messen. Wichtig war hierbei, dass die Auflagerung möglichst steif ist, und dass die untere Schnittkante vollflächig auf dem Element zur Messung der Spannungen aufliegt. Zu berücksichtigen war auch der inhomogene Aufbau und die lokal schwankenden Steifigkeiten des Brettsperrholzes. Leichte Unebenheiten der Aufstandsfläche mussten ausgeglichen werden, um einen vollflächigen Kraftschluss zu erzielen.

### 1.3.1.2 Überlegungen zur Messtechnik

Für die praktische Realisierung dieser Messungen wurden verschiedene technische Lösungsmöglichkeiten diskutiert:



- die Messung mit Druckmessfolien, z. B. Fabrikat Tekscan<sup>®</sup> Messprinzip hierbei ist, dass in eine Kunststofffolie eingebettete Mikrokapseln mit Farbstoff bei bestimmten Drücken aufplatzen und einen entsprechenden sichtbaren Farbabdruck ergeben. Anhand der Intensität der Färbung kann auf die Druckspannung geschlossen werden (Abbildung 1.15). Nachteil ist die nur einmalige Verwendbarkeit einer Folie.
- Die Messung mit flächigen, elektronischen Drucksensoren Diese werden von verschiedenen Herstellern angeboten und basieren auf Kapazitätsänderungen der in bestimmtem Raster auf einer Trägerfolie angebrachten Drucksensoren. Nachteil ist der hohe Preis für den Sensor und spezielle Auswerteelektronik.
- 3. Die Messung der Materialdehnungen mit auf den Pr
  üfk
  örper aufgebrachten Dehnmessstreifen Nachteil hierbei ist die gr
  öße Streuung der Elastizit
  ätseigenschaften des Holzes in den einzelnen Brettern und lokal aufgrund von 
  Ästen und sonstiger Unregelm
  äßigkeiten. Von einer bestimmten gemessenen Dehnung kann daher nicht zuverl
  ässig auf die an der Messstelle vorliegende mechanische Spannung geschlossen werden.
- 4. die Messung mit nebeneinander linienförmig angeordneten Kraftmessdosen.
- 5. Die indirekte Messung über die Stauchungen in einem unter dem Holz-Prüfkörper angeordneten Stahlbauteil.



**Abbildung 1.15:** Messergebnis einer Druckmessfolie unter einem dreischichtigen Brettsperrholzprobekörper. Gut sichtbar wird die Kraftübertragung über die Hirnholz-flächen und der Abdruck der Jahrringe.

Nach intensiver Diskussion wurden die Möglichkeiten 1) bis 4) als nicht praktikabel, aus Kostengründen nicht vertretbar oder technisch nicht sinnvoll ausgeschlossen. Gewählt wurde schließlich eine Lösung entsprechend Variante 5), die nachfolgend beschrieben wird.



#### 1.3.1.3 Beschreibung des Bauteils zur Messung der vertikalen Spannungsverteilung

Aus Stahlblechen S235JC+C, blank, Toleranzfeld h11 wurde ein lineares Messelement in Form eines geschweißten I-Trägers hergestellt. Der Steg hatte einen Querschnitt von 8 mm x 100 mm, der Obergurt 30 mm x 200 mm. Der Obergurt und der Steg wurden quer mit Sägeschnitten eingeschlitzt, um einzelne, nebeneinanderliegende Messabschnitte zu erhalten. An diese wurde beidseitig jeweils mittig ein Dehnmesstreifen aufgeklebt, um die Stauchungen im Stahl zu messen. Inklusive Schnittbreite waren die so hergestellten T-förmigen Messabschnitte 100 oder 50 mm breit, wobei die 16 schmalen Abschnitte mittig angeordnet wurden, und die je sechs breiten Abschnitte an den Enden. Diese Aufteilung hatte den Grund, einerseits nicht unnötig viele DMS-Messstellen zu erhalten, und andererseits in der Mitte eine gute Auflösung in Längsrichtung zu erreichen. Die Maße des Bauteils sind im Konstruktionsplan im Anhang **??** dargestellt, vgl. auch Abbildung 1.16.

Um die Abschnitte des Obergurtes gegen seitliches Ausweichen zu sichern, wurden längs beidseitig zwei HEA 140 montiert, und an die dafür vorgesehenen Laschen mit Schweißpunkten angeheftet (Abbildung 1.17). Diese HEA-Profile hatten einen horizontalen Abstand von 1 mm zum Obergurt des Messbauteils, um eine Beeinflussung des Messergebnisses zu verhindern.

Auf diese Weise wurde ein linearer Kraftaufnehmer der Länge 2000 mm, der Breite 200 mm mit einer Auflösung von 50 mm in der Mitte und 100 mm am Rand hergestellt. Zur Messung der Stauchung der einzelnen Stahlabschnitte wurde beidseitig jeweils ein Dehnmesstreifen vom Typ xx aufgeklebt (Abbildung 1.18). An den 28 Messstellen wurden somit insgesamt 56 DMS eingebaut. Die Erfassung der Daten erfolgte mit einem DMS-Messverstärker der Fa. PEEKEL und der zugehörigen Software Autolog 2000.

Die gesuchte Kraft in jedem Messabschnitt ergibt sich rechnerisch aus dem Mittelwert der Stauchungen beider DMS. Ausmitten der resultierenden einwirkenden Kraft auf dem Obergurt in Längsrichtung des Bauteils werden systembedingt kompensiert, da die DMS jeweils mittig angeordnet sind und sich somit Biegeanteile um die Querachse nicht auf die Anzeige der Stauchungen in vertikaler Richtung auswirken. Kraftausmitten in Querrichtung und somit resultierende Biegeanteile um die Längsachse werden kompensiert durch die Bildung des Mittelwertes der beiden DMS auf der linken und rechten Seite. Die Ermittlung der Spannungen im Stahl und daraus der einwirkenden Kraft auf die einzelnen Messstellen erfolgte rechnerisch unter Annahme eines einheitlichen E-Moduls von 200.000  $N/mm^2$ . Die ermittelten Kräfte sind dementsprechend nicht als Absolutwerte zu definieren, da der tatsächliche E-Modul des Stahl unbekannt ist.

Unter der Annahme, dass der Stahl auf der ganzen Länge des Bauteils konstante Eigenschaften hat, entsprechen die relativen Unterschiede der einzelnen Messstellen den tatsächlichen Verhältnissen. Nur hierauf kommt es bei der gesuchten qualitativen Spannungsverteilung zur Ermittlung des Lastausbreitungswinkels an.





**Abbildung 1.16:** Zeichnung des Stahlbauteils zur Messung der Druckspannungen in der Plattenaufstandsfläche









(a) Zeichnung zur Anordnung der DMS

(b) angeklebter DMS

Abbildung 1.18: Anordnung der Dehnmesstreifen



# 1.3.1.4 Kalibrierung

Leichte Ungenauigkeiten in der Herstellung (Sägeschnitte) und eventuelle Streuungen in den Materialeigenschaften führen zu gewissen Abweichungen der einzelnen Messstellen in der Stauchungs-Dehnungs-Beziehung. Vor der Messung wurden daher die einzelnen Messstellen des Messträgers kalibriert, um lokale Differenzen zwischen einwirkender und angezeigter Kraft rechnerisch berücksichtigen zu können. Hierzu wurde für jede Messstelle ein Korrekturfaktor ermittelt, um die gemessene Dehnung mit der bekannten Kraft aus der Prüfmaschine in ein korrektes Verhältnis zu setzen.

Die einzelnen Messstellen wurden zentrisch in einer kalibrierten Prüfmaschine (Typ Zwick-Roell 500 kN) in mehreren Stufen bis zur planmäßigen Maximallast belastet und die angezeigten Stauchungen der DMS aufgezeichnet. Aus dem Mittelwert der beiden Stauchungen links und rechts ergibt sich die reine Stauchung infolge der Druckspannung, Biegespannungen in x und y-Richtung fallen heraus. Der Korrekturfaktor für jede Messstelle ergibt sich wie folgt:

$$k = \frac{\varepsilon_{ideal}}{\varepsilon_i} \tag{1.5}$$

 $\varepsilon_{ideal}$  ist die Stauchung, die sich für die jeweilige Messstellenbreite unter Annahme eines E-Moduls des Stahls von 200.000  $N/mm^2$ ergibt. Bei der anschließenden Versuchsauswertung wurde jeder Messwert mit diesem Korrekturfaktor multipliziert. Die Korrekturfaktoren lagen an allen Messstellen zwischen 0 und 4,3 %.

# 1.3.2 Versuchskörper

Verwendet wurden rechteckige Brettsperrholzplatten gemäß Zulassung abZ Z-9.1-501 der Typen LE-NO 150, 170 und 200 im jeweiligen standardmäßigen Schichtaufbau. Die Platten hatten Abmessungen von 150 cm x 220 cm, und wurden der serienmäßigen Produktion im Werk Aichach entnommen. Es wurden ausschließlich Bretter der Sortierung C24 verwendet. Die Holzfeuchte lag im Mittel bei 11,0 % rF, die Rohdichte bei 400  $kg/mm^3$ .

Nach Abschluss der Versuche mit 150 cm Höhe wurden die Platten auf eine Höhe von 75 cm halbiert und eine weitere Versuchsserie durchgeführt. Die Platten entsprachen dem üblicherweise zu erwartenden Zustand, es wurden keine Auffälligkeiten, Beschädigungen oder Fehlstellen festgestellt. Der Fugenabstand der Längslagen war gleichmäßig gering und betrug großenteils unter 1 mm.

Nr.	Wandstärke [mm]	Lagenaufbau	Querlagenanteil [%]
1	200	<b>34 - 24 -</b> 24 <b>- 34 -</b> 24 <b>- 24 - 34</b>	25
2	150	<b>34</b> - 24 - <b>34</b> - 24 - <b>34</b>	32
3	170	<b>34</b> – 34 – <b>34</b> – 34 – <b>34</b>	40

Tabelle 1.8: Daten der Versuchskörper

# 1.3.3 Versuchsdurchführung

### 1.3.3.1 Montage und Belastungseinrichtung

Der Messträger wurde auf dem Stahlbeton-Fußboden der Versuchshalle in ein ca. 5 mm dickes Bett aus selbstverdichtendem, hochfestem Vergussmörtel eingesetzt. Dieses diente dazu, eine vollflächige, "satte" Auflagerung zu gewährleisten und leichte Unebenheiten auszugleichen. Gleichzeitig wurde so eine möglichst große Steifigkeit sichergestellt (Abbildung 1.19 a) und b)).

Jeder Versuchskörper wurde anschließend an der Unterseite mit einer dünnen dehnbaren Plastikfolie überzogen ("Frischhaltefolie"), und eine solche auch auf dem Messträger aufgebracht. Zwischen Versuchskörper und Messträger (bzw. zwischen die beiden Folien) wurde ebenfalls eine dünne Schicht aus mineralischem Quellvergussmörtel mit einer Dicke von maximal 2 mm und einer Körnung von 1 mm aufgebracht, um einen vollflächigen und kraftschlüssigen Druckkontakt zwischen Stahl und Holz zu gewährleisten. Der Versuchskörper wurde vertikal ausgerichtet und bis zum Abbinden des Vergussmörtels fixiert (Abbildung 1.19 c)).

Die Last wurde durch einen vertikal angeordneten Hydraulikzylinder auf eine Lastverteilungsplatte aus Stahl mit den Abmessungen 300 x 200 x 50 mm aufgebracht, welche jeweils mittig auf der Oberkante der Platten positioniert wurde.

# ТЛП



(a) Einheben des Messbauteils in das Mörtelbett auf dem Hallenboden



(b) fertig montiertes Messbauteil mit angeschlossenen DMS



(c) Aufgießen des Vergussmörtels zwischen Holz- und Stahlbauteil



(d) fertig montierter Prüfkörper

Abbildung 1.19: Montagevorgang der Wandprüfkörper

# ТШ



Abbildung 1.20: BSP-Prüfkörper fertig montiert vor der Messung



Abbildung 1.21: Lasteinleitungsplatte und Hydraulikzylinder an der Oberkante des BSP-Prüfkörpers



### 1.3.3.2 Ablauf der Versuche, Laststufen

Die Belastung wurde in Anlehnung an EN 408 so aufgebracht, dass die jeweilige Maximallast innerhalb von 300 s erreicht wurde. Die Last wurde dann weitere 300 Sekunden konstant gehalten. Die gemessenen Dehnungen wurden in diesen 300 s alle 5 s aufgezeichnet und über diese Zeit gemittelt. Jeder Versuchskörper wurde in drei Laststufen (Tabelle 1.9) belastet und die jeweiligen Dehnungen, bzw. Stauchungen im Stahl aufgezeichnet. Die Laststufen ergeben sich aus folgenden Druckspannungen auf die jeweilige Netto-Längslagenfläche:

Laststufe	Rechenansatz
1	$f_{c,netto} = k_{mod} * 0, 5/1, 3$ $k_{mod} = 0, 6$
2	$f_{c,netto} = k_{mod}/1, 3  k_{mod} = 0, 6$
3	$f_{c,netto} = k_{mod}/1, 3  k_{mod} = 0, 9$

Der Hintergrund dieser Ansätze ist, dass die mittlere Laststufe 2 den maximal im Dauerzustand aufnehmbaren Druckspannungswert repräsentiert, Laststufe 3 den maximal kurzzeitig aufnehmbaren Druckspannungswert, und die Laststufe 1 dazu dient, ein eventuell abweichendes Tragverhalten bei geringerer Last zu untersuchen. Der in Tabelle 1.10 unter BSP Typ 200 *mm*, Laststufe 3 genannte Wert von 654 kN war zwar geplant, konnte aber wegen der begrenzten Belastbarkeit des Testrahmens nicht durchgeführt werden. Der BSP-Typ 200 mm wurde daher nur mit den Laststufen 1 und 2 geprüft.

BSP-Typ	Netto-Fläche [cm <sup>2</sup> ]	Laststufe	Druckspannung $[N/mm^2]$	Kraft $[kN]$
		1	4,9	148
150	306	2	9,7	297
		3	14,5	445
170	306	1	4,9	148
		2	9,7	297
		3	14,5	445
		1	4,9	220
200	450	2	9,7	441
		3	14,5	654 *)

Tabelle 1.10: Laststufen, Druckspannungen und Kräfte \*) siehe Erläuterung im Text

### 1.3.4 Wandhöhen 750 mm und 1500 mm

Das Messverfahren hat planmäßig funktioniert, die Dehnungen im Stahl konnten mit plausiblen Werten gemessen, und daraus die Spannungen in der Bodenfuge der Brettsperrholzplatten bestimmt



werden. Allerdings wurde im Versuchsverlauf eine Änderung der Wandhöhe erforderlich: Es wurde ursprünglich eine Wandhöhe von 1500 mm gewählt, und mit diesen Versuchskörpern die Messungen durchgeführt. Die Messergebnisse dazu befinden sich im Anhang **??**. Die Spannungen verteilen sich glockenkurvenförmig, allerdings ist die Länge der Messtrecke, bzw. die Wandbreite zu gering, das die Spannungen am Rand gegen Null gehen. Eine sinnvolle Auswertung war daher nicht möglich. Die Wandscheiben wurden entsprechend auf 750 mm Höhe gekürzt. Mit dieser Höhe konnten sinnvolle Messergebnisse und Auswertungen erreicht werden, welche im folgenden Abschnitt 1.3.5 und dem zugehörigen Anhang **??** dargestellt werden.

#### 1.3.5 Berechnung der Lastverteilung aus den Versuchsergebnissen

Gemessen wurden die Dehnungen im Stahl, gesucht sind jedoch die Druckspannungen im Holz, bzw. deren Verteilung über die Länge der Aufstandsfläche an Wandfuß. Es sind somit folgende Umrechnungen erforderlich:

$$\varepsilon_i = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \tag{1.6}$$

$$\sigma_{Stahl} = E \cdot \varepsilon_i \tag{1.7}$$

$$F_i = \sigma_{Stahl,i} \cdot A_{Stahl,i} \tag{1.8}$$

$$\sigma_{Holz,i} = \frac{F_i}{\Sigma t_l \cdot b_i} \tag{1.9}$$

Die so ermittelten Druckspannungen in der Längslagen des Brettsperrholzes wurden nun in Diagrammen über der mit der Wandhöhe normierten Wandbreite aufgetragen (Anhang **??**).

#### 1.3.6 Versuchsergebnisse und Kurvenanpassung

Ziel der Versuche war eine mit den FE-Ergebnissen vergleichbare Angabe für den Lastausbreitungswinkel. Um diesen zu bestimmen, mussten daher die diskret verteilten Messwerte, bzw. errechneten Spannungswerte in eine mathematisch definierte stetige Funktion überführt werden. Aus dieser Funktion konnte anschließend das Integral bestimmt, und der 95 %-Wert als "definierter Nullpunkt" (vgl. 1.2.5) ermittelt werden. Als Kurventyp wurde die Gaußsche Glockenkurve (Formel 1.10) gewählt, da diese auch bei ähnlichen Spannungsverteilungen, z. B. in der Bodenmechanik) die beste Abbildung liefert (? Diese kann für den hier vorliegenden Fall vereinfacht werden, vgl. Formel (1.11).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$$
(1.10)



$$f(x) = a \cdot e^{-(\frac{x}{b})^2}$$
(1.11)

Die Kurvenanpassung erfolgte anschließend mit dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate mit Hilfe der Software MATLAB und den dort implementierten Curve-Fitting Algorithmen. Ein typisches Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 1.22 dargestellt. Die Auswertungen aller Versuche und Laststufen mit 750 mm Wandhöhe befinden sich im Anhang **??**.



Abbildung 1.22: Beispiel einer Auswertung mit Curve-Fitting in MATLAB

Die mit dem Curve-Fitting in MATLAB, der Integralbildung und dem "Abschneiden" von 5 % der Gesamtkraft an den äußeren Rändern ermittelten Lastausbreitungswinkel sind in Abbildung 1.23 dargestellt. Auffällig ist, dass die erste Laststufe die "breiteste" Verteilung ergibt, höhere Lasten führen zu einer größeren Spannungskonzentration in der Mitte. Tendenziell wird das Ergebnis der FE-Studie bestätigt, wonach ein größerer Querlagenanteil zu einer breiteren Lastverteilung führt. Vergleich FE-Studie - Versuchsergebnisse

# ТЛП



Abbildung 1.23: berechnete Lastausbreitungswinkel, Wandhöhe 750 mm, aus [?]

# 1.4 Vergleich FE-Studie - Versuchsergebnisse

Um eine abschließende Aussage zu dem gesuchten Lastverteilungsverhalten treffen zu können, werden die Ergebnisse der FE-Studie mit denen der Versuche verglichen. Es werden die Messergebnisse der Laststufe 2 zu diesem Vergleich herangezogen, da diese der rechnerischen Belastung aus der FE-Studie entspricht. Die ermittelten Lastausbreitungswinkel sind in der folgenden Tabelle 1.11 und Abbildung 1.24 gegenübergestellt:

Querlagenanteil [%]	Winkel, FEM-Analyse $[^{\circ}]$	Winkel, Versuch $[^\circ]$
10	21	_
20	23	_
25	_	21,9
30	25	-
32	_	23,2
40	27	23,2
50	28	-

Tabelle 1.11: Vergleich FE-Studie - Versuch

# ТUП



Abbildung 1.24: Lastausbreitungswinkel in Abhängigkeit des Querlagenanteils in FE-Analyse und Versuch

Sowohl bei den FE- als auch den Versuchsergebnissen ist eine Zunahme des Lastausbreitungswinkels mit dem Querlagenanteil festzustellen. Insgesamt liegen die Messergebnisse leicht unter den jeweiligen rechnerischen Werten, die Abweichungen betragen 2,1° bis 3,8°. Diese Winkel-abweichung entspricht einer Länge der Bodenfuge von 27,5 mm bis 49,8 mm. Angesichts der Breite der Messstellen von 50 mm bzw. 100 mm erscheint diese Abweichung als eher klein.

Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Versuchsergebnisse recht gut mit den Rechenwerten übereinstimmen. Der vermutete Zusammenhang zwischen Lastverteilung und Querlagenanteil konnte bestätigt werden.

# 1.5 Bewertung und Schlussfolgerung

# 1.5.1 Ansatz der TU Graz

*Bogensperger* et. al. haben in [?] und [?] eine analytische Herangehensweise an die Frage der Lastverteilung unter Einzellasten vorgestellt. Diese basiert auf Differentialgleichungen, die in vergleichbarer Form auch z. B. die der Bestimmung von Spannungsverteilungen im elastischen Halbraum unter Einzelfundamenten oder bei der Berechnung von Flächentragwerken angewendet werden können. Die vorgeschlagene Lösung ergibt sich aus einer Fourier-Reihenentwicklung, für die eine periodische Last im gleichmäßigen Abstand L auf eine unendlich ausgedehnte Wand angenommen wird. Diese ist allerdings nur durch Softwareeinsatz zu lösen, weshalb eine Näherungslösung entwickelt wurde.

# ПП



Abbildung 1.25: Lastverteilung in einer BSP-Scheibe, aus [?]

Eingangsgröße der vorgeschlagenen Berechnung ist die Wandhöhe h, die Breite der Lasteinleitung  $b_p$  die Dehnsteifigkeiten in x- und y-Richtung, sowie die Schubsteifigkeit. Diese Materialeigenschaften werden als "verschmiert" über die Wandstärke angenommen, sowie entsprechende Vereinfachungen getroffen, beispielsweise in der Annahme  $E_{90} = 0$ . Die Rechnung geht weiterhin davon aus, dass in den Längs- und Querlagen Material der gleichen Sortierklasse, bzw. Steifigkeit verwendet wird.

Die vorgeschlagene Berechnung ist trotz dieser Vereinfachungen komplex, weshalb für typische Fälle entsprechende Diagramme vorgestellt werden. Es wurde auch ein frei zugängliches onlinebasiertes Bemessungstool entwickelt.

Eines dieser Diagramme ist in Abbildung **??** dargestellt. Es zeigt den Verlauf der wirksamen Lastverteilbreite  $b_{eff}$  über die Wandhöhe in Abhängigkeit der Lasteinleitungsbreite für eine fünfschichtige BSP-Wand mit einheitlicher Lamellenstärke von 40 mm (Querlagenanteil 40 %) und Orientierung der Decklagen in Kraftrichtung.

Die Ablesung ergibt nach Formel **??** einen Lastausbreitungswinkel nach der Definition in Abbildung 1.1 von ca. 11,8 ° für eine Breite der Lasteinleitung von 0,25 m. Weitere Werte wurden beispielhaft in Tabelle 1.11 für eine Wandhöhe h = 3,0 m ausgewertet. Die ermittelten Werte sind deutlich kleiner als die in den FE-Studien und Versuchen ermittelten ca. 20 ° - 25 °. Der wesentliche Grund hierfür ist die Annahme einer "wirksamen Lastverteilbreite". Diese ergibt sich nach Formel **??** aus einer angenommenen gleichmäßigen Verteilung der in der Mitte der tatsächlichen Spannungsverteilung maximal auftretenden Druckspannungen über die gesamte Lastverteilbreite. Somit ist es nachvollziehbar, dass der Ansatz nach Bogensperger zu anderen (kleineren) Lastverteilungsbreiten kommt. Diese entsprechen zwar einem mathematisch-ingenieurmäßigen Ansatz, aber nicht den realen Verhältnissen.

$$\alpha[^{\circ}] = atan\left(\frac{\left(\frac{b_{eff} - b_p}{2}\right)}{h}\right)$$
(1.12)

(1.13)

# ТUП



**Abbildung 1.26:** Diagramm aus **?**, wirksame Lastverteilbreite  $b_{eff}$  bei einer fünfschichtigen BSP-Wand in Abhängigkeit der Wandhöhe und der Breite der Lasteinleitung



**Abbildung 1.27:** Vergleich der Ansätze zur Lastverteilung nach TU Graz (rot) und dem eigenen Vorschlag (grün)

### 1.5.2 Sonstige Literaturangaben

In verschiedenen Publikationen von BSP-Herstellern und anwendungsorientierten Rechenbeispielen (z. B. ?) wird die Annahme von 15 ° als Lastausbreitungswinkel empfohlen. Es konnte nicht verifiziert werden, woher diese Angabe stammt. Der Winkel erscheint jedoch eher als eine untere Grenze sinnvoll zu sein, die in jedem Fall angenommen werden kann wenn sonst keine genaueren Daten bekannt sind.

# 1.5.3 Fähigkeit zur Lastumlagerung

Bei einer lokalen Lasteinleitung in eine Brettsperrholzplatte besteht die Möglichkeit, dass sich Lasten umlagern wenn einzelne Bretter die Grenze ihrer elastischen Tragfähigkeit erreichen, das Gesamttragverhalten ist ausgesprochen duktil. Die Spitzenspannungen in der Mitte der Lastverteilungskurve direkt unter der Lasteinleitung werden sich daher zu den Rändern hin verlagern, wenn lokal die Druckfestigkeit überschritten wird.

### 1.5.4 Stabilitätsnachweise

Die Ermittlung der Lastverteilbreite dient bei druckbeanspruchten Wandscheiben i. d. R. zur Führung eines Stabilitätsnachweises in Wandmitte. Hierbei ist zu beachten, dass der Spitzenwert der Druckspannung in Wandmitte recht schnell zu den Rändern hin abklingt, und der an höchsten beanspruchte mittlere Bereich von den weniger beanspruchten Rändern "gestützt" wird. Ein einachsiger Stabilitätsnachweis mit einem *repräsentativen Wandstreifen* (z. B. Ersatzstabverfahren nach DIN EN 1995-1-1) liegt somit bei Ansatz der maximalen Druckspannungen erheblich auf der sicheren Seite.

# 1.5.5 Einfluss der Auflagersteifigkeit

Sowohl die Untersuchungen von **?**, als auch die eigenen Versuche und Rechnungen gehen von einer ideal starren Auflagerung am Wandfuß aus. Die tatsächliche Auflagersteifigkeit ist immer geringer als dieser idealisierte Wert. Häufig dürfte sogar eine erhebliche Nachgiebigkeit der Auflagerung vorliegen, z. B. immer dann, wenn die betrachtete Wand an ihrer Unterkante auf einem anderen Holzbauteil aufgelagert ist. Jede Nachgiebigkeit der Auflagerung führt zu einer "breiteren" Lastverteilung, da sich die zunächst an höchsten belasteten Bereiche direkt unter der Lasteinleitung der Kraft teilweise entziehen, und diese nach weiter außen weiterleiten. Dieser Effekt wurde durch eine eigene FE-Studie bestätigt (vgl. Abschnitt 1.2).

Die angegebenen Lastausbreitungswinkel sind daher immer als Minimalwerte bei starrer Auflagerung zu verstehen. Die tatsächlich auftretenden Spannungen sind daher geringer als auf diese Weise ermittelt, und die Lastübertragung am Wandfuß gleichmäßiger. Dies führt zu einem zusätzlichen Sicherheitsgewinn bei allen Spannungs-, Verformungs- und Langzeitbetrachtungen.



# 1.5.6 Ansatz einer gemittelten Spannungsverteilung

Aus den oben genannten Gründen ist es aus Sicht der Autoren gerechtfertigt, die Breite der Lastverteilung mit dem beschriebenen Lastausbreitungswinkel zu bestimmen, und die einwirkende Kraft gleichmäßig über diese Breite zu verteilen. Diese Vorgehensweise ist auch in anderen Materialien (Stahl, Mauerwerk, Beton) üblich. So wird z. B. im Mauerwerksbau (DIN 1053) ein einheitlicher Lastausbreitungswinkel von 30° angenommen, die Kräfte dürfen gleichmäßig verteilt werden. Im Stahlund Betonbau gilt analog ein Winkel von 45°.

# 1.5.7 Übertragung auf asymmetrische Fälle

Die beschriebenen Finite-Elemente-Berechnungen und Versuche wurden alle mit einer symmetrischen Lasteinleitung in der Mitte einer ungestörten rechteckigen Wandscheibe durchgeführt.

In realen Anwendungen kommt es häufig vor, dass die Lasteinleitungen am Wandrand angeordnet sind, oder auch Öffnungen (z. B. für Fenster) in der Nähe der Lasteinleitungen vorhanden sind (Abbildung 1.25). In diesen Fällen ergibt sich keine symmetrische Lastausbreitung, sondern eine asymmetrische in Abhängigkeit der vorliegenden Geometrie.



Abbildung 1.28: mögliche Lasteinleitungspositionen an einer realen Wandscheibe

Es werden nachfolgend konstruktive Empfehlungen angegeben, wie in typischen derartigen Fällen sinnvollerweise zu verfahren ist. Diese Empfehlungen basieren auf eigenen Rechnungen und Versuchen, und wurden mit der Projektarbeitsgruppe im Hinblick auf eine die Praxistauglichkeit abgestimmt. In hier nicht abgedeckten Sonderfällen oder im Zweifelsfall ist eine gesonderte Berechnung zur Ermittlung der tatsächlich vorliegenden Spannungen durchzuführen. Aus Sicht der Autoren dürfen die folgenden Ansätze verwendet werden:

- Bei Lasteinleitungen in der N\u00e4he eines Plattenrandes breitet sich die Kraft auf der ungest\u00f6rten Seite mit dem "ungest\u00f6rten"Lastausbreitungswinkel aus. Auf der Seite des Plattenrandes findet die Lastausbreitung ebenfalls mit diesem Winkel statt, bis der Plattenrand erreicht ist (Abbildung 1.26, linke Bildh\u00e4lfte).
- Öffnungen werden entsprechend wie Wandränder behandelt. Unterhalb solcher Öffnungen darf eine weitere Lastausbreitung mit demselben Winkel angenommen werden (Abbildung 1.26, rechte Bildhälfte).
- Zum Plattenrand ist ein Abstand von mindestens der halben Breite der Lasteinleitungsplatte, oder einer vollen Lamellenbreite einzuhalten, je nachdem, was den größeren Wert ergibt.
- Gleiches gilt für den Abstand vertikal zur Kraftrichtung von Öffnungen jeder Art (Abbildung 1.26, rechte Bildhälfte).
- Die Lastverteilung in der Bodenfuge oder in beliebiger Höhe der Wandscheibe darf für alle Spannungs- und Stabilitätsnachweise als konstant angenommen werden. Die Größe der Spannungen ergibt sich aus dem Nettoquerschnitt der BSP-Platte, und der im jeweils betrachteten horizontalen Schnitt vorliegenden Lastverteilbreite entsprechend dem angenommenen Lastverteilungswinkel. Die Spitzenwerte der Spannungen werden daher etwas unterschätzt, das Kraftgleichgewicht ist aber immer eingehalten.
- Lastverteilungen aus mehreren Lasteinleitungen werden rechnerisch nicht überlagert, sondern grenzen aneinander an (Abbildung 1.27).

# Ш







Abbildung 1.30: rechnerische Berücksichtigung mehrerer Lasteinleitungen nebeneinander

### 1.5.8 Fazit

Anhand von Versuchen und einer Finite-Elemente-Studie wurden Empfehlungen erarbeitet, wie die Lastverteilung unterhalb von lokalen Lasteinleitungen auf die Schmalseiten von Brettsperrholzplatten rechnerisch angenommen werden kann. Damit ist es auf relativ einfache Weise möglich, die für Spannungs- und Stabilitätsnachweise benötigten mechanischen Spannungen infolge lokaler Lasteinleitung zu bestimmen.

Die Empfehlungen gelten für die hier vorgestellten Randbedingungen und Grenzen des Untersuchungsumfangs. In hier nicht erfassten Sonderfällen sollten entsprechende Rechnungen zur Ermittlung der im Einzelfall konkret vorliegenden Spannungsverteilung durchgeführt werden, um eine realitätsgetreue Nachweisführung zu ermöglichen.

- Es darf für baupraktische und rechnerische Zwecke eine konstante Druckspannungsverteilung in der Fuge am Wandfuß sowie in jeder horizontalen Schnittebene angenommen werden.
- Der Ausbreitungswinkel der Druckspannungen unter Einzellasten auf die Schmalseiten der Wand darf für Anteile der Querlagen zwischen 20 % und 50 % mit 25° angenommen werden.
- Der Einfluss der Wandhöhe darf bei üblichen Verhältnissen vernachlässigt werden.
- Bei Lasteinleitungen in der Nähe von Rändern oder Aussparungen in der Wandfläche sollte nach Kapitel 1.5.5 und Abbildung 1.27 vorgegangen werden.
- Wenn sich benachbarte Lastverteilungsbereiche rechnerisch überschneiden, werden die Spannungen nicht überlagert, sondern die Verteilungsbreiten entsprechend reduziert (vgl. Abbildung 1.27).

Diese Empfehlungen gelten für folgende Randbedingungen:

- Verwendung von Brettsperrholz entsprechend DIN EN 16351 mit oder ohne Schmalseitenverklebung mit mindestens 20 % Querlagenanteil.
- Lasteinleitung in Richtung einer der beiden Brettlagenrichtungen, d. h. unter 0° oder 90°.
- Im Bereich der Lastausbreitung vollflächige Auflagerung der Wand.
- Anordnung der Lasteinleitungen nach den konstruktiven Randbedingungen aus Kapitel 1.5.5 und Abbildung 1.27.